

Untersuchung formschlüssiger Stützkonstruktionen für das FLM-Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr. Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Tim Krautwald

aus

Herdecke

Dortmund, 2021

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Stand und Bedeutung der FLM-Technologie	1
1.2 Problemstellung Stützkonstruktion	2
2 Stand der Technik	5
2.1 Prozessbeschreibung des FLM-Verfahrens	5
2.1.1 Terminologie nach VDI-Richtlinie 3405	6
2.1.2 Additive Fertigungsverfahren nach DIN 8580	7
2.1.3 Entwurf der DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06	8
2.1.4 Komponenten eines FLM-Systems	9
2.1.5 Ausgangsmaterial	14
2.2 Arten von Stützkonstruktion im FLM-Verfahren	18
2.2.1 Differenzierung	18
2.2.2 Stützstruktur bei Ein- und Multimaterialsystemen	18
2.2.3 Polymerkombinationen bei Multimaterialsystemen	22
2.2.4 Geometrischer Aufbau von Stützkonstruktionen	29
2.3 Kontaktmaterial der Bauplattform	33
2.3.1 Haftungsmechanismen	36
2.3.2 Thermoplaste ohne etabliertes Stützmaterial	38
2.4 Thermisch induzierter Bauteilverzug	40
2.4.1 Voraussetzungen	40
2.4.2 Mechanismus	40
2.4.3 Auswirkungen auf Druckprozess und -objekt	44
2.4.4 Abhilfemaßnahmen	47
2.5 Softwaretechnische Stützstrukturgenerierung	50
2.5.1 Voraussetzungen	50
2.5.2 Automatische Generierung	51
2.5.3 Manuelle Platzierung und Entfernung von Stützstruktur	60
2.6 Formschlüssige Kunststoffverbindungen	61
2.6.1 Fokussierung	61
2.6.2 Formschlüssige Verbindungen im FLM-Verfahren	61

2.6.3	Formschlüssige Verbindungen in anderen Verfahren	67
3	Zielsetzung	71
4	Lösungsweg	74
4.1	Grundlegendes Vorgehen	74
4.2	Das Konzept Mikroverzahnung	74
4.2.1	Fallunterscheidungen	75
4.2.2	Anforderungen an die Mikroverzahnung	78
4.2.3	Entfernen der Stützkonstruktion	79
4.2.4	Betrachtung verschiedener Grundkonzepte	80
4.2.5	Bewertung der Konzepte	82
4.3	Ausarbeitung der Schnittstellen	85
4.3.1	Strömung der Schmelze und Druckaufbau	85
4.3.2	Lösung der Fallunterscheidungen	90
4.3.3	Füllung der Stützkonstruktion	98
4.3.4	Gegenseitige Blockierung von Stützelementen	99
4.3.5	Kollisionsproblematik	100
4.4	Softwaretechnische Umsetzung	102
4.4.1	Notwendige Zusatzfunktionen	102
4.4.2	Datenfluss und Verarbeitungskonzept	103
4.4.3	Modellverarbeitung im Slicer und Grundeinstellung	105
4.4.4	Manipulation und Visualisierung des G-Code	107
4.5	Vorbereitung empirischer Versuche	113
4.5.1	Probengeometrie	113
4.5.2	Zugprüfanlage und Aufnahmevorrichtung	114
4.5.3	Ablauf der Zugprüfung	116
4.5.4	Thermoplaste für die Probenfertigung	117
4.5.5	Probenfertigung	118
4.6	Empirische Versuche	123
4.6.1	Vorgehen	123
4.6.2	Statistische Grundlagen	124
4.6.3	Definition des Versuchssystems	128
4.6.4	Auslegung der Versuchspläne	133
4.6.5	Versuchsdurchführung	137
4.6.6	Diskussion der Versuchsergebnisse	138
4.7	Modellanpassung	146
4.7.1	Beschreibungsmodell für flache Winkel	146
4.7.2	Beschreibungsmodell für steile Winkel	151
4.7.3	Praktischer Einsatz der Modelle	156

4.8	Fertigung von Demonstratoren	157
4.9	Ausformen der Stützstruktur	159
4.9.1	Allgemeines Vorgehen	159
4.9.2	Plastische Deformation	160
4.9.3	Elastische Deformation	160
4.9.4	Auflösen	162
4.10	Dauerhafte formschlüssige Verbindungen	163
4.11	Grundlegende Gestaltungsregeln	166
4.12	Vergleich von Anforderungen und Ergebnissen	167
5	Wirtschaftliche Bedeutung	170
5.1	Erschließung neuer Anwendungsfelder	170
5.2	Reduzierung von Betriebsmitteln	171
5.3	Vereinfachung von Entfernung und Postprozess	173
5.4	Einsparungen im Druckprozess	174
6	Abschließende Betrachtung	176
6.1	Rückblick und Realisierung der Zielsetzung	176
6.2	Ausblick und weitere Forschungsfelder	177
6.3	Fazit	179
	Literatur	181
A	Anhang	i
A.1	Detailaufnahmen der Proben des VP 30°	i
A.2	Detailaufnahmen der Proben des VP 0°	ix
A.3	Strukturformeln für auflösbares Stützmaterial	xvii

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
3DP	3D-Printing (dt.: 3-D-Drucken)
AMF	Additive Manufacturing File Format
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
FDM	Fused Deposition Modelling
FLM	Fused Layer Modelling / Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Surface Tessellation Language
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
BVOH	Butenediol-Vinylalkohol-Copolymer
HIPS	High Impact Polystyrene, dt.: hochschlagfestes Polystyrol
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PDMS	Polydimethylsiloxan
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimide
PET(G)	Polyethylenterephthalat(modifiziert m. Glycol)
PLA	Polylactic Acid
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylene
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PPSU	Polyphenylsulfon
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA / PVOH	Polyvinylalkohol
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymere
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
<i>Slicer</i>	Software zur Bahngenerierung
<i>UM 3</i>	<i>Ultimaker 3</i>

1 Einleitung

1.1 Stand und Bedeutung der FLM-Technologie

Das Fused Layer Manufacturing (FLM dt.: Schmelzschichtung) ist ein additives Fertigungsverfahren, das bereits vor über 25 Jahren erfunden und unter dem Markennamen *Fused Deposition Modeling* (FDM) von S. Scott Scrump patentiert wurde. Durch seine vergleichsweise einfache Anwendung, Robustheit und geringen Investitionskosten sind die sogenannten 3-D-Drucker im Spektrum von Hobbyanwendung bis professioneller Kleinserienfertigung vertreten. Einfache Geräte sind bereits für wenige hundert Euro zu erwerben, während professionelle Anlagen mehrere zehntausend Euro kosten können [Woh19]. Damit ist das Verfahren vergleichsweise günstig und aufgrund der geringeren Komplexität beispielsweise im Gegensatz zu laserbasierten Verfahren wie dem Selective Laser Sintering (SLS) leichter auf die Bedürfnisse des Bedieners anpassbar. Durch das Auslaufen der Patente *US5340433A* im Jahr 2009 und *US5503785A* im Jahr 2016, welche die FDM-Technologie grundlegend und die Stützkonstruktion im Speziellen behandeln, wurde das Fertigungsverfahren für einen breiteren Anwenderkreis zugänglich. Der entstehende Wettbewerb hatte einen Preisverfall und die Entstehung neuer kostengünstiger Drucksysteme insbesondere im Bereich der Desktop-Geräte zur Folge. Dies hat zu einer starken Verbreitung dieser Maschinen und einer damit einhergehenden regen Forschungsaktivität in den verschiedenen Disziplinen geführt.

Eine Recherche der Anzahl an Veröffentlichung¹ liefert 3151 wissenschaftliche Publikationen im Jahr 2019. Die Technologie befindet sich trotz ihrer längeren Existenz in einer ausgeprägten Entwicklungsphase. Fortlaufend werden neue Anwendungsfelder mit neuen Anforderungen erschlossen, die eine Erweiterung des Verfahrens notwendig machen und Forschungsbedarf darstellen. Auch eine Betrachtung der themenspezifischen Nachrichtenportale zeigt, dass noch immer sprunghafte Entwicklungsschritte stattfinden, die grundlegend neue Verfahrensvarianten hervorbringen.

Beispielsweise hat sich das Spektrum der herstellbaren Bauteilgrößen auf sehr feine Druckobjekte für den Einsatz als Implantat in der Medizintechnik bis hin zu

¹Suchmaschine *ScienceDirect* Suchbegriff *Fused Deposition Modeling*, geprüft am 15.01.2020

großvolumigen Körpern wie Bootsrümpfen und prototypischen Fahrzeugkarosserien erweitert. Wurde anfänglich überwiegend Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) verarbeitet, so hat die Polymerwissenschaft auf die besonderen Anforderungen an Thermoplaste für den 3-D-Druck reagiert und u. a. eine reduzierte thermische Schrumpfung und bessere Verschweißung des extrudierten Materials forciert sowie das generelle Materialspektrum erweitert. Einsatzgebiete beschränken sich nicht nur auf die Entwicklung von Prototypen, sondern erstrecken sich auch auf Kleinserienfertigung von Kunststoffteilen für Endprodukte, betriebliche Hilfsmittel wie Montagehilfen und medizinische Komponenten beispielsweise für die Orthopädietechnik. Die FLM-Technologie hat damit Felder besetzt, die für ihre spezifischen Stärken wie geringe Kosten und umfangreiches Materialspektrum, aber auch Schwächen wie Oberflächenqualität und notwendige Stützkonstruktionen geeignet sind.

1.2 Problemstellung Stützkonstruktion

Diese Arbeit behandelt die Entwicklung formschlüssig wirkender Stützkonstruktionen für die FLM-Technologie und versucht die bestehenden Schwächen insbesondere bei der Verarbeitung von teilkristallinen Thermoplasten zu lösen. Aktuelle Stützkonstruktionen besitzen mehrere Nachteile, die nachfolgend zusammengefasst sind und die Notwendigkeit sowie das Potenzial der Weiterentwicklung verdeutlichen.

Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren besitzt FLM ein großes Materialspektrum an verarbeitbaren Thermoplasten, wodurch eine auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmte Werkstoffauswahl möglich ist. Was einerseits ein Vorteil ist, setzt gleichzeitig voraus, dass stets ein passendes Partnermaterial für den Aufbau einer Stützkonstruktion verfügbar ist. Dabei wird eine Vielzahl von Anforderungen an dieses Material gestellt, welche die Auswahl stark einschränkt. Mit der FLM-Technologie sind grundsätzlich die meisten Thermoplaste aus dem Bereich der Spritzguss- und Extrusionsverfahren verarbeitbar, aber nur vergleichsweise wenige verfügbar. Der Mangel an geeigneten Werkstoffkombination für Bau- und Stützmaterial sowie die benötigte Anlagentechnik erschweren überdies die Erweiterung des Materialspektrums. Weiterhin muss stets eine passende Bauplatte vorhanden sein (vgl. Kapitel 2.1.4), da nicht alle Platten- und Stützmaterialien untereinander kompatibel sind und eine ausreichende Haftung aufbauen. Existiert eine passende Kombination aller am Prozess beteiligten Komponenten, so muss diese vorgehalten und vor der Verwendung materialspezifisch konditioniert werden. Für den Anwender wird das Verfahren dadurch komplexer und u. a. in Form von zusätzlichem Lager- sowie Rüstaufwand kostenintensiver. Eine vereinheitlichte Lösung für die Stützkon-

struktion und die Bauplatte, die eine Vielzahl von Baumaterialien abdeckt, ist aus den genannten Gründen wünschenswert.

Stützkonstruktionen aus dem gleichen Material wie das Bauteil zu fertigen, ist zwar in den meisten Fällen möglich, stellt allerdings einen ungünstigen Kompromiss zwischen erreichbarer Oberflächenqualität und Trennbarkeit der Kontaktflächen dar. Einfachere Drucksysteme verwenden diese Technik aus wirtschaftlichen Gründen, da nur ein Extrusionsstrang benötigt wird. Der Grad zwischen vollständiger Verbindung und unzureichender Anhaftung zwischen Bau- und Stützmaterial ist hierbei allerdings besonders schwierig einzustellen. Die vollflächige Abstützung des Bauteils ist durch die Gefahr einer vollständigen Verschweißung nahezu ausgeschlossen. Als Kompromiss wird eine unvollständig gefüllte gitterartige Stützkonstruktion verwendet, die nur teilweise am Bauteil anliegt und die Gefahr des Einfallens ungestützter Flächen in sich birgt. Die Entfernung derartiger Strukturen ist aufwändig und hinterlässt an den Kontaktstellen häufig eine unzureichende Oberflächenqualität. Bei Verwendung von größeren Düsenquerschnitten zur Materialeextrusion, die häufig bei großvolumigen Bauteilen zum Einsatz kommen, sind diese Problemstellungen besonders ausgeprägt, da die Größe der Fehlstellen ebenfalls mit skaliert wird. Eine vollflächige Abstützung überhängender Bauteilkonturen sowie eine weniger arbeitsintensive Entfernung der Stützkonstruktion sind anzustreben.

Stützstrukturen selbst sind ein reines Abfallprodukt und werden nach Abschluss des Fertigungsprozesses entsorgt. Aufgrund der geringen absolut anfallenden Menge sowie der Kontamination und thermischen Schädigung wird dieser Abfall üblicherweise nicht dem Recycling zugeführt. Eine anteilige Mischung mit neuem Modellmaterial wie beim Selective Laser Sintering (SLS) ist ebenfalls nicht ohne erneute Extrusion eines Filaments möglich. Da das Verfahren Stützkonstruktionen jedoch zwingend voraussetzt, sollte der verwendete Thermoplast möglichst universell einsetzbar, kostengünstig und einfach in der Verarbeitung sein. Letztgenannter Aspekt schließt u. a. eine hohe realisierbare Druckgeschwindigkeit, starke Haftung an Bauteil und Bauplatte während und einfache Ablösung nach Beendigung des Druckprozesses sowie einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit ein. Eine Eignung für das Recycling ist ebenfalls wünschenswert und kann besonders für kostenintensive Hochleistungsthermoplaste wie Polyetheretherketon (PEEK) von wirtschaftlichem Interesse sein.

Ein besonderes Augenmerk dieser Arbeit liegt auf dem Einsatz teilkristalliner Thermoplaste als Baumaterial, da die Herstellung geeigneter Stützkonstruktionen für diese eine besondere Herausforderung darstellt. Die durch die Kristallisation bedingte nicht lineare und ausgeprägte Schrumpfung dieser Thermoplaste während

der Abkühlung auf Bauraumtemperatur und der resultierende Bauteilverzug müssen vom Stützmaterial aufgenommen werden. Ablösungen zwischen Bauplatte, Stützkonstruktion und Bauteil während des Druckprozesses sind besonders kritisch und können zu Kollisionen mit Düse und Druckkopf führen. Auch wenn eine Stützkonstruktion dieses Verhalten nicht gänzlich aufheben kann, so darf sie kein kritisches Versagen der Schnittstellen zulassen. In jedem Fall stellt der Verzug eine geometrische Abweichung vom digitalen Modell dar und muss daher minimiert werden. Nach eigenen Erfahrungen können teilkristalline Thermoplaste wie Polyamid 12 (PA 12) im FLM-Verfahren sehr belastbare und duktile Verbindungen zwischen den abgelagerten Schichten aufbauen. Durch diese grundsätzlich positive Eigenschaft gestaltet sich die Entfernung von Stützkonstruktionen aus Baumaterial besonders bei großen Kontaktflächen äußerst mühselig.

In Kombination mit den genannten umfangreichen Anforderungen ist die Auswahl und Einrichtung aller Prozessgrößen eine komplexe Problemstellung, welche die Flexibilität des Verfahrens einschränkt. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz besitzt das Potenzial, die beschriebenen Hürden in der Verarbeitung teilkristalliner Thermoplaste zu mindern, die Etablierung anforderungsgerechter Thermoplaste zu vereinfachen und das Verfahren insgesamt wirtschaftlicher zu gestalten.

2 Stand der Technik

2.1 Prozessbeschreibung des FLM-Verfahrens

Das Fused-Layer-Manufacturing (FLM) ist eines der ältesten additiven Fertigungsverfahren und entspricht grundlegend dem *Fused-Deposition-Modeling (FDM)*. Es handelt sich dabei um den Markennamen der Firma *Stratasys Ltd. (Stratasys)*, die bereits 1989 das Patent *US5121329A: Apparatus and method for creating three-dimensional objects* auf das Verfahren angemeldet und erteilt bekommen hat. Das FLM-Verfahren findet weite Verbreitung, da es zu den additiven Fertigungsverfahren mit dem geringsten Anlagenaufwand gehört [Woh19].

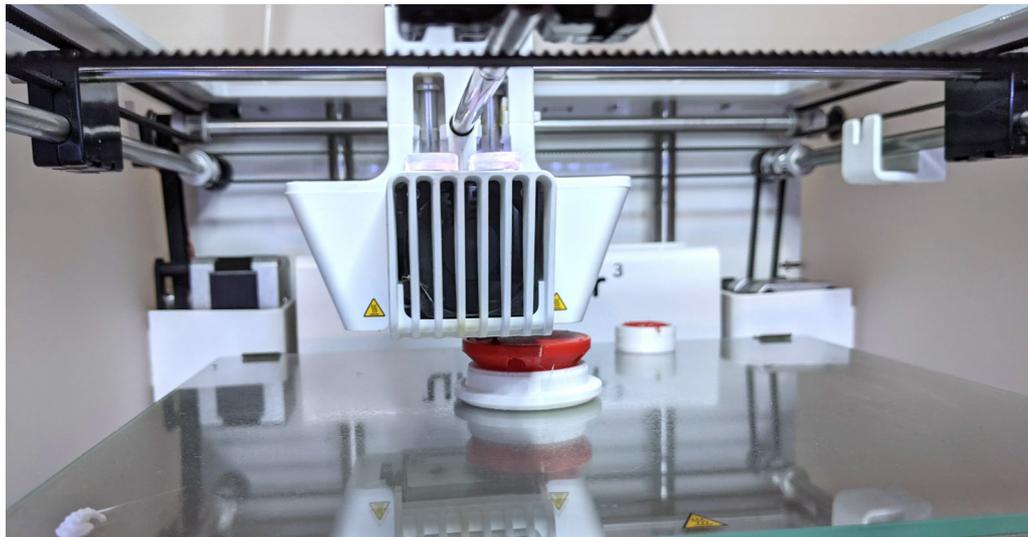


Abb. 2.1: Fertigungsprozess beim *Ultimaker 3*: Bauteil mit Stützkonstruktion

Zum Aufbau des Bauteils bewegt sich der Druckkopf in horizontaler x- und y-Richtung relativ zur Bauplattform und legt Bahnen aus aufgeschmolzenem thermoplastischem Kunststoff entsprechend der eingegebenen Bauteilkontur ab [Hor14]. Nach Fertigstellung jeder Schicht erfolgt das Anfahren der nächsten xy-Ebene in vertikaler z-Richtung, was üblicherweise durch eine Zustellbewegung der Bauplattform um 0,1 mm bis 0,3 mm realisiert wird. Ein ebenfalls verbreitetes Konzept ist die Bewegung der Plattform in y-Richtung und des Druckkopfes in der xz-Ebene.

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, setzt sich das Druckobjekt aus dem Bauteilmaterial (dunkel) und einem optionalen Stützmaterial (hell) zum Aufbau der Stützkonstruktion zusammen. Die Konstruktion dient dabei der Realisierung von Überhängen, die mehr als einen bestimmten Winkel in den freien Raum zeigen. Dieser Überhangwinkel hängt von mehreren Prozessparametern wie Lagengeometrie und Kühlung ab. Als erster Anhaltswert kann 45° genannt werden. Während des Schichtaufbaus wird in jeder Lage abwechselnd Bau- und Stützmaterial an der durch den *Slicer* (Software zur Berechnung der abzulegenden Bahnen und Schichten) berechneten Position aufgebracht. Das abgelegte Stützmaterial bleibt bis zum Ende des Druckprozesses mit dem Bauteil verbunden, auch wenn die abstützenden und fixierenden Eigenschaften nach Verfestigung des Baumaterials teilweise nicht mehr nötig sind. Nach Abschluss des Prozesses wird das abgekühlte Teil dem Fertigungssystem entnommen und die Stützstruktur manuell oder automatisiert i. d. R. durch Auswaschen in einem geeigneten Fluid entfernt.

2.1.1 Terminologie nach VDI-Richtlinie 3405

Die VDI-Richtlinie 3405 schlägt für das FLM-Verfahren die nachfolgende Nomenklatur vor. Abbildung 2.2 zeigt die beheizten Düsen 1, mit Hilfe derer ein Auftrag Linie-für-Linie 2 erfolgt, der über mehrere Schichten hinweg das Bauteil 3 generiert. Die Bauplatte 5 wird durch die Bauplattform 6 in Richtung des Schichtaufbaus bewegt.

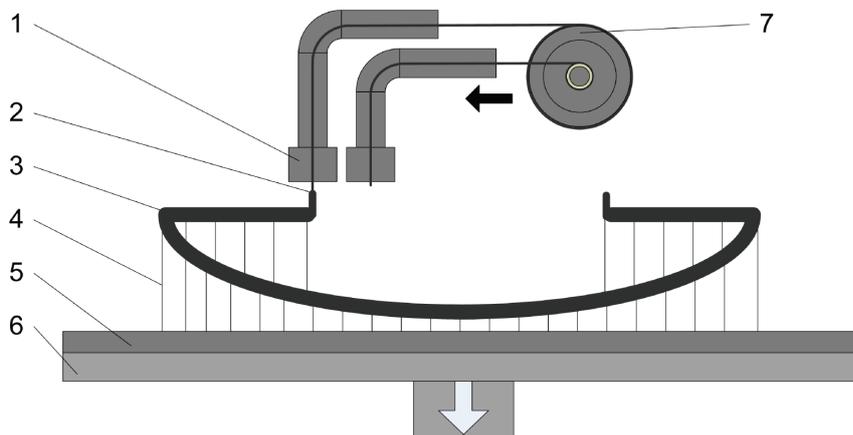


Abb. 2.2: Aufbau und Benennung des Fused Layer Manufacturing (FLM) nach VDI-Richtlinie 3405 [VDI3405]

Häufig ist für stark überhängende Konturen oder die Haftung des extrudierten Materials an der Bauplatte 5 eine zusätzliche Stützkonstruktion 4 erforderlich. Die Bauplatte kann z. B. eine Kunststofffolie, eine Glasplatte oder eine aufgetragene Beschichtung sein, die der Haftvermittlung dient. Sie wird durch die Bauplattform getragen und häufig samt dieser durch einen Hubtisch 6 in Richtung des Schichtaufbaus bewegt.

baus verfahren. Der Materialvorrat 7 für ein oder mehrere beheizte Düsen speichert das verwendete Material häufig in Form von drehbar gelagerten Spulen [VDI3405].

2.1.2 Additive Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Unter den Begriff der Additiven Fertigungsverfahren fallen verschiedenste Technologien, die sich sowohl im grundlegenden Füge- und Ablegemechanismus als auch in den eingesetzten Materialien unterscheiden. Neben den im FLM-Verfahren verwendeten amorphen und teilkristallinen Thermoplasten werden u. a. photoaktive Harze, Keramikmaterialien, Metalle sowie Papiere und Mischungen dieser eingesetzt. Die eigentliche Erzeugung der späteren Schicht kann beispielsweise sowohl durch das Abfahren einer Kontur unter Extrusion von Schmelze als auch durch die Belichtung des vollständigen Schichtvolumens wie im *CLIP-Verfahren* (*Continuous Liquid Interface Production*) erfolgen.

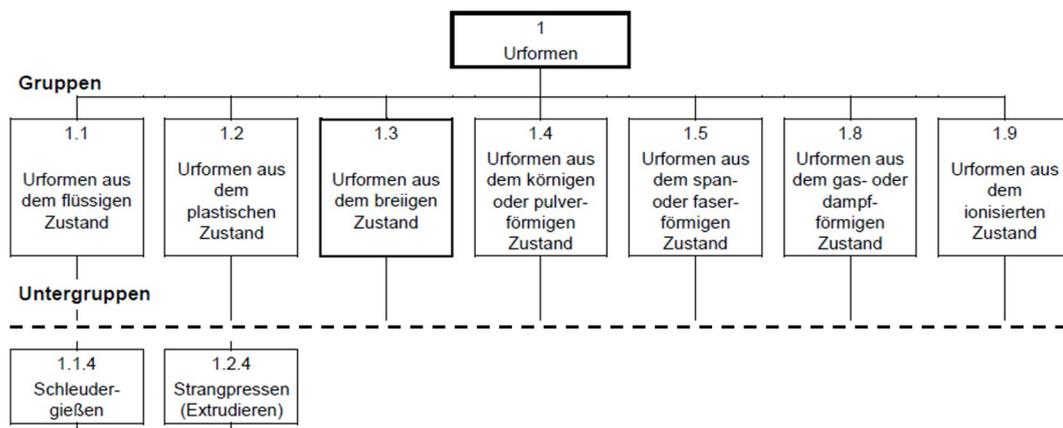


Abb. 2.3: Zuordnung des FLM-Verfahrens (Ordnungsnummer 1.2.4) nach DIN 8580 [DIN8580]

Eine Möglichkeit, die zunehmende Anzahl an Prozessvarianten zu strukturieren, ist nach der DIN 8580 (Deutsches Institut für Normung). Diese Norm kann herangezogen werden, um jedem Fertigungsverfahren eine systematische Ordnungsnummer zuzuordnen. Dabei erfolgt die Einteilung zunächst in die Hauptgruppe, welche auf der Schaffung oder Änderung der Form oder einer Änderung der Stoffeigenschaft basiert. In der nächsten Ebene wird nach der Art des Ausgangszustandes differenziert. So kann beispielsweise aus dem festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand eine Form geschaffen werden. Die abschließende Einteilung in eine Untergruppe trägt einen konkreten verfahrensspezifischen Namen wie Spritzgießen oder Sandformen. Abbildung 2.3 zeigt die Einordnung des FLM-Verfahrens in die Baumstruktur. Dem Verfahren kommt die Ordnungsnummer 1.2.4 zu, was sich als Urformen aus dem plastischen Zustand durch Extrusion zusammenfassen lässt [DIN8580].

2.1.3 Entwurf der DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06

Der Entwurf der DIN EN ISO /ASTM 52900 stellt die am weitesten fortgeschrittene und aktuellste Einteilung der additiven Fertigungsverfahren dar. Durch die internationale Zusammenarbeit von ISO (Internationale Organisation für Normung) und ASTM International (American Society for Testing and Materials) wird eine fundierte Basis für den gesamtheitlichen Umgang mit den Additiven Fertigungstechnologien erarbeitet. Dabei wird nicht nur eine differenzierte Einteilung der Verfahren vorgestellt, sondern auch Aspekte, die den realen Einsatz der Technologien im Unternehmen und im Umgang mit Kunden betreffen. Als Beispiele können die Vereinbarung von akzeptablen Fehlstellen wie Rissen, Oberflächenrauheiten sowie die Beurteilung gefertigter Bauteile genannt werden. Der erweiterte Normentwurf wird die Fassung 2018-06 ersetzen und zeigt die Bestrebungen, den Wildwuchs an herstellereinspezifischen Verfahrensbezeichnungen und schlecht vergleichbaren Leistungsdaten in eine geordnete Form zu überführen.

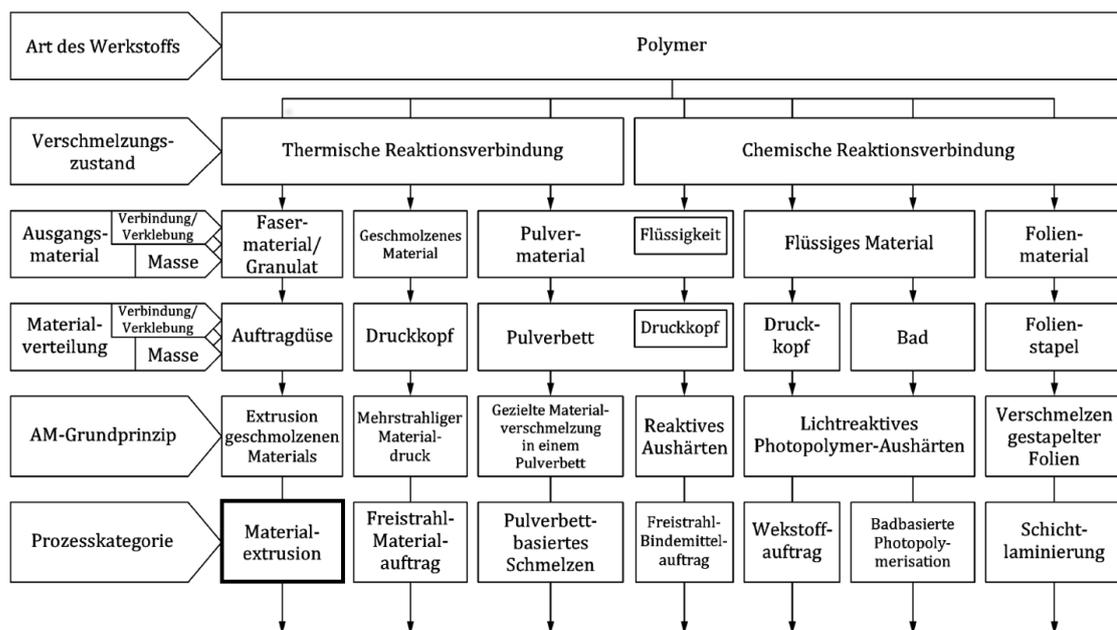


Abb. 2.4: Additive Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [DIN52900]

Dem Entwurf entsprechend wird das FLM-Verfahren (vgl. Abbildung 2.4) auf Basis der Art des Werkstoffs in die Kategorie Polymer eingeteilt, das durch eine thermische Reaktionsverbindung den Verschmelzungszustand erreicht. Das Ausgangsmaterial liegt in Form einer Faser vor und wird durch eine Düse als geschmolzenes Material extrudiert. Damit entspricht die Prozesskategorie der Materialextrusion. Das Fused Layer Manufacturing ist ein einstufiger Prozess, obwohl eine dem primären Fügeprozess nachgelagerte Entfernung von Stützmaterial oder Reinigung erforderlich sein kann. Mehrstufigkeit bezieht sich hier auf die Veränderung der Materialeigenschaften beispielsweise durch Sintern von metallischen Werkstoffen. Eine solche Technologie,

die dem FLM-Verfahren sehr ähnlich ist, wird von *Desktop Metal Inc.* angeboten. Anstatt reinem Polymer wird bei diesem zweistufigen Verfahren zunächst ein Rohling mit einem aus gebundenem Metallpulver bestehenden Filament gefertigt. Anschließend wird ein Teil des Bindemittels in einem Bad ausgelöst und das Druckteil in einem Sinterofen zum Grünling gesintert.

2.1.4 Komponenten eines FLM-Systems

Überblick

Ein 3-D-Drucker, der nach dem FLM-System arbeitet, besteht aus verschiedenen Baugruppen, die in jeder Maschine zu finden sind. Für diese Ausarbeitung von besonderem Interesse sind der Extrusionskopf, die Bauplattform, der Bauraum sowie das Ausgangsmaterial. Für weiterführende Informationen beispielsweise über verschiedene Antriebssysteme sowie Systemperipherie und einen weiteren Blick auf das FLM-Verfahren sei auf Literatur wie [Geb16], [Hor14] oder [Hag15] verwiesen.

Bauplattform und Bauplatte

Die Bauplattform besteht aus einem Träger, der i. d. R. eine besonders ebene Oberfläche aufweist, und ist häufig mit einem geregelten Heizsystem ausgestattet. Eine für den Prozess entscheidende Einstellung der FLM-Anlage ist dabei die korrekte Ausrichtung der Bauplattform. Moderne Steuerungen erlauben hierzu, eine sensorisch erfasste Höhenkarte des Druckbetts zu generieren und den Fehler über mehrere Lagen automatisiert auszugleichen. Dabei gilt, dass die z-Achse des Druckers möglichst orthogonal zur Bewegungsebene des Druckkopfes und der Oberfläche der Bauplatte ausgerichtet wird. Die reine Parallelität der zwei Ebenen ist nicht ausreichend und kann zu windschiefen Druckobjekten führen. Eine gute Ebenheit von Bauplattform und Bauplatte wirkt sich ebenfalls positiv auf die Qualität des Druckobjektes aus, da solche Formabweichungen direkt auf die erste Lage des Bauteils übertragen werden.

Das Heizsystem der Bauplattform wird zum einen für die Haftung zwischen Druckobjekt und Bauplatte benötigt, zum anderen hält es das Druckobjekt begrenzt warm, wodurch es unmittelbare Auswirkungen auf den Lagenverbund sowie die thermische Schrumpfung des abgelegten Baumaterials im Prozess hat. Viele Kombinationen von Thermoplasten und Materialien, die für Bauplatten eingesetzt werden, bauen erst mit erhöhter Temperatur eine ausreichende Haftung auf. So werden beispielswei-

se bei ABS für viele sogenannte Dauerdruckfolien (aufgeklebte Folie als Bauplatte) und Haftsprays mehr als 80 °C empfohlen [Fil20a][DIM20]. Drucker mit offenem oder teilgeschlossenem Bauraum, die über keine beheizte Druckplattform verfügen, werden üblicherweise ausschließlich für Polylactide (PLA), mit Glykol modifiziertem Polyethylenterephthalat (PETG) und Thermoplastisches Polyurethan (TPU) eingesetzt.



Abb. 2.5: Verschiedene Haftvermittler und Bauplatten zur Fixierung des Druckobjektes

Die Bauplatte selbst kann aus verschiedenen Materialien wie Glas, speziellen Kunststofffolien oder Kunststoffbeschichtungen aus Polyetherimid (PEI) [Pru20a] sowie aufgespritzten Lösungen, häufig auf Basis von Polyvinylalkohol (PVA), bestehen. Im Laufe der Zeit hat sich eine Vielzahl von Produkten etabliert, die für ein oder mehrere Stütz- und Baumaterialien besonders geeignet sind. Bei Druckern mit beheiztem Bauraum sowie entsprechender Isolierung kann die Bauplattform ohne weitere aktive Beheizung auskommen, da die Umluft durch Konvektion ausreichend Wärmeenergie auf die Haftoberfläche überträgt [Mak20]. Die Druckauflage selber kann beispielsweise geklebt, geklammert oder angeschraubt sein. Ein Ansaugen und Niederhalten per Unterdruck sowie magnetische Kontaktflächen finden ebenfalls Anwendung und bieten einen besonders schnellen Wechsel der Auflage zwischen zwei Druckprozessen. Die Funktionen der Bauplatte umfassen damit die Fixierung der ersten Lage, die Aufnahme von auftretenden Kräften durch Schrumpfung und sowohl die Beschleunigungen des Antriebssystems als auch den Transport von Wärmeenergie in das Bauteil.

Die Extrusionseinheit

Der Extrusionskopf besteht üblicherweise aus der Aufschmelzeinheit, dem Kühlsystem und dem Filamentantrieb. Letztgenannter kann direkt am Kopf oder per Schlauch mit diesem verbunden am Maschinengehäuse befestigt sein. Abbildung 2.6 und 2.7 zeigen die Komponenten des Druckkopfes, anhand derer die grundlegenden Funktionsgruppen identifiziert werden können.

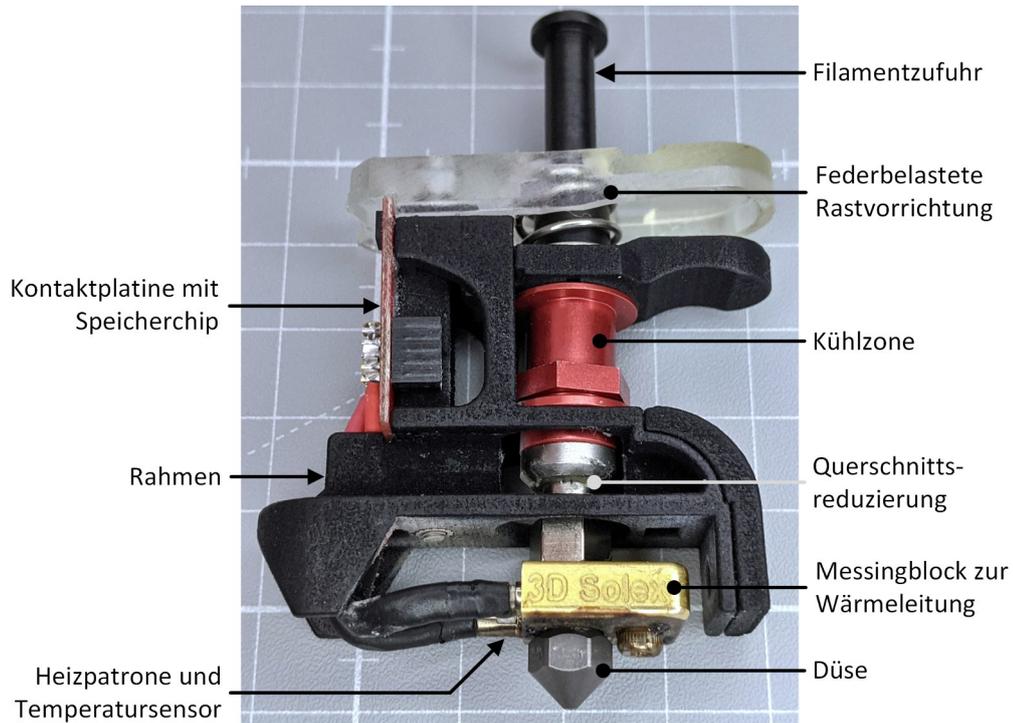


Abb. 2.6: *Printcore* eines *Ultimaker 3*

- Die **Aufschmelzzone** besteht aus einem beheizten Kanal (daher nachfolgend auch als Heißkanaldüse bezeichnet) und der austauschbaren Düse mit variablem Durchmesser. Ein Regelkreis aufgebaut aus Heizelement, Temperatursensor und PID-Regler sorgt für eine stabile Temperatur der schmelzeführenden Komponenten. Die tatsächliche Temperatur der Schmelze wird allerdings nicht erfasst und liegt erwartungsgemäß unterhalb der Düsentemperatur.
- Eine **Kühlung** knapp oberhalb des beheizten Kanals gehört ebenfalls zu den üblichen Komponenten eines Filamentextruders. Ausgeführt als wasser- oder luftbasiertes System wird so der Wärmetransport in die Antriebseinheit unterbunden, da für die Funktion des Förderns ein mechanisch festes Material benötigt wird. Überdies wird der Wärmetransport durch einen stark verringerten Querschnitt im Übergangsbereich zwischen Aufschmelzzone und Kühlung reduziert. Durch diese konstruktive Maßnahme wird die Kühlung im kalten Be-

reich entlastet und weniger thermische Energie ungenutzt durch den Radiator an die Umgebung abgegeben.

- Üblicherweise erzeugt ein Schrittmotor, welcher die Antriebsräder direkt oder mit einem dazwischengeschalteten Getriebe antreibt, das nötige Drehmoment für den **Vorschub des Filaments**. Die Übertragung des Drehmoments auf das Filament erfolgt durch ein Antriebsrad, das scharfkantig verzahnt oder gerändelt ist und in das Material eingreift. Üblicherweise werden einseitig angetriebene Fördereinheiten eingesetzt. Diese besitzen i. d. R. eine gelagerte und federbelastete Gegenrolle, um die benötigte Andruckkraft aufzubauen. Entscheidend ist hier eine allseitig geführte Zuführung in die Antriebsräder und eine ebensolche Führung nach der Übertragung der Vorschubkraft, um ein Ausknicken des Filaments zu verhindern und das Einführen in das Antriebsmodul zu vereinfachen.
- Verbreitet sind Druckköpfe, die **ein** oder **zwei Materialien extrudieren** können. Hauptanwendung eines separaten Materials ist die Verwendung als Stützstruktur und die Kombination zweier Werkstoffe in einem Bauteil, beispielsweise um verschiedene Farben oder Steifigkeiten abbilden zu können. Die aktive Düse drückt entsprechend die ihr zugeordneten Segmente der Lage, während die inaktive bei einer geringeren Temperatur im Wartezustand ist. Um Kollisionen zu vermeiden, kann die inaktive Düse zusätzlich von der aktiven Druckschicht weggefahren werden. Material, das sich aufgrund von Effekten wie expandierender Feuchtigkeit im Kunststoff aus der inaktiven Düse herausdrückt, wird so ebenfalls davon abgehalten, in das Bauteil zu gelangen. Solche Fehlmenngen werden beim Wechsel des Extruders an einer mitgedruckten Geometrie oder einer dafür vorgesehenen Abstreifvorrichtung entfernt. Es sind Drucker bekannt, die eine oder beide Düsen aus den genannten Gründen in der Höhe verfahren. Ebenfalls existieren Systeme, die zwei oder mehrere Materialien im Wechsel durch eine Düse extrudieren, indem sie das Filament bis zu einer Weiche zurückziehen oder den Kunststoffdraht außerhalb des Druckers zerteilen und abwechselnd aneinanderfügen, sodass an der Düse immer das passende Material extrudiert wird.
- Ein **Gebälse** wird am Druckkopf eingesetzt, falls das Zeitintervall einer extrudierten Schicht zur Verfestigung des abgelegten Thermoplasten nicht ausreicht oder dieser beschleunigt auf Bauraumtemperatur abgekühlt werden soll. In diesen Fällen wird zusätzlich Luft aus dem Bauraum in Düsennähe auf das Bauteil geblasen, um eine erzwungene Konvektion zu bewirken. Bei Druckern

mit geschlossenem Bauraum wird die Kühlung auch durch eine gezielte Zirkulation des eingeschlossenen Luftvolumens erreicht.

- Der Druckkopf kann über **zusätzliche Sensoren** verfügen, die verschiedene Aufgaben erfüllen. Ein induktiver, optischer oder mechanischer Sensor zur Tiefenmessung kann beispielsweise helfen, den Abstand zwischen Düse und Bauplattform abzutasten und automatisiert einzustellen. Einige Drucker verwenden hierzu auch die elektrisch kontaktierte Aufhängung der Heißkanaldüse. Sobald die Düse von der sich annähernden Bauplattform angehoben und damit der Kontakt ausgelöst wird, ist die Position der Bauplatte in Richtung der z-Achse bekannt. Die Steuerung des Druckers kompensiert den gemessenen Abstand, sodass die erste Lage eine möglichst exakte Schichtdicke aufweist.

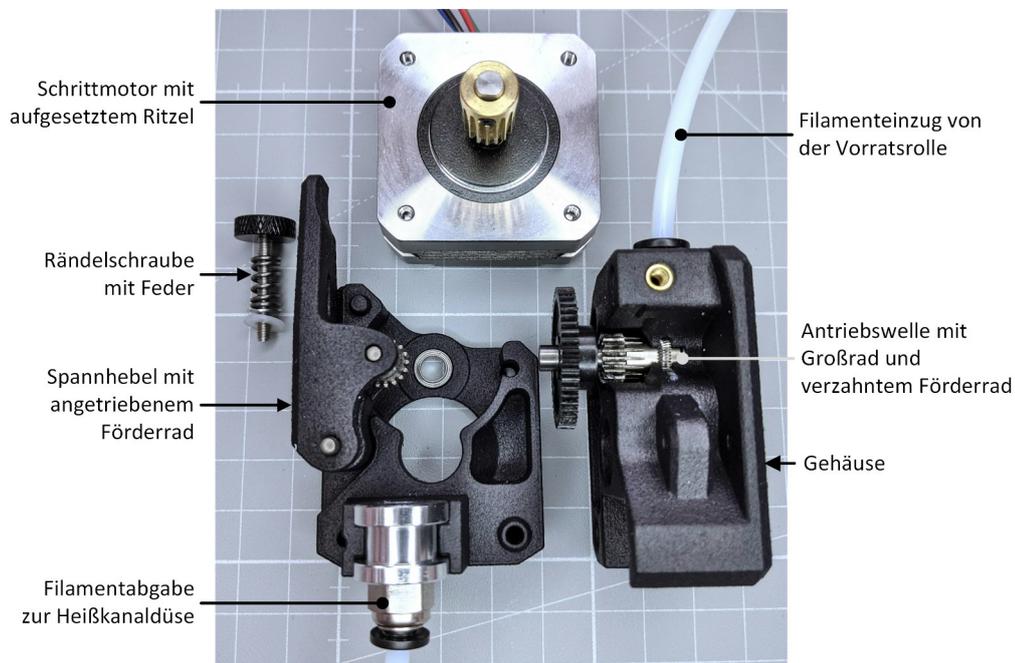


Abb. 2.7: Filamentantrieb des Typs *BMG* von *Bondtech AB*

Der Bauraum

Der Bauraum stellt in der einfachsten Ausführung lediglich das Volumen dar, welches vom Drucker zur Fertigung eines Bauteils in der Anlage genutzt werden kann. Insbesondere kostengünstige Drucker besitzen häufig keine geschlossene Kammer, sondern sind vollständig geöffnet und damit der Temperatur und Strömung der Umgebungsluft ausgesetzt. Um thermisch induzierte Verformungen bei Thermoplasten wie Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) zu vermeiden, empfehlen Filamenthersteller die Verwendung eines geschlossenen Bauraums. Dabei sind Ausführungen von einfachen Hauben bis hin zu stark isolierten Bauräumen mit aktiver

Beheizung und zirkulierender Luft bekannt. Ein Beispiel hierfür ist der *Fortus 900mc* von *Stratasys Ltd.*, welcher durch seitliche Luftkanäle beheizte Luft mit bis zu 225 °C durch den Bauraum leitet [Str20a]. Derartig hohe Temperaturen werden üblicherweise in Kombination mit Hochleistungsthermoplasten wie Polyphenylsulfon (PPSU) eingesetzt.

Weitere Komponenten

Weitere Komponenten dienen neben der Bewegung und Führung von Extrusionskopf und Bauplatattform auch dem Anschluss an die Versorgung mit Filament, Strom und Kühlwasser sowie der Signalübertragung. Hierzu zählen beispielsweise der Rahmen des Druckers, die tragenden Elemente der Achsen, das Netzteil und die Aufnahmen der Filamentspulen. Eine Steuerungseinheit sowie entsprechende Elektronikkomponenten wie Motortreiber realisieren die Umsetzung der eingelesenen Fahrbefehle, die Temperaturregelung und die Sensorauswertung.

2.1.5 Ausgangsmaterial

Allgemein

Das Spektrum an verfügbaren Filamenten für das FLM-Verfahren hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Dabei haben sich die Durchmesser 1,75 mm und 2,85 mm als einer der wenigen Standards für die Spezifikation der Kunststoffdrähte etabliert. Grundsätzlich kann zwischen offenen und herstellerspezifischen (geschlossenen) Materialsystemen sowie Mischformen unterschieden werden. Die nachfolgende Beschreibung dieser Einteilung ist keine feststehende Definition, sondern der Versuch, die am Markt verfügbaren Systeme einzuordnen.

Offene und geschlossene Materialsysteme

Im industriellen Einsatz finden sich häufig geschlossene Materialsysteme z. B. in Form von Filamentkassetten mit integriertem Datenspeicher, da diese eine bessere Abstimmung zwischen Maschine, Anwendungsprofil und Material ermöglichen. Die Kassetten bieten u. a. die Möglichkeit zur trockenen Aufbewahrung der teilweise stark hygroskopischen Kunststoffe und besitzen Mechanismen, die ein automatisches Einfädeln des Filaments in die Anlage ermöglichen sowie ein ungewolltes Herabspringen oder Verknoten des Kunststoffdrahtes verhindern. Dem entgegen stehen höhere

Kosten durch die Kassette und die Herstellerbindung. Als Beispiel kann das Materialmodell von *Stratasys* angeführt werden (vgl. Abb. 2.8).

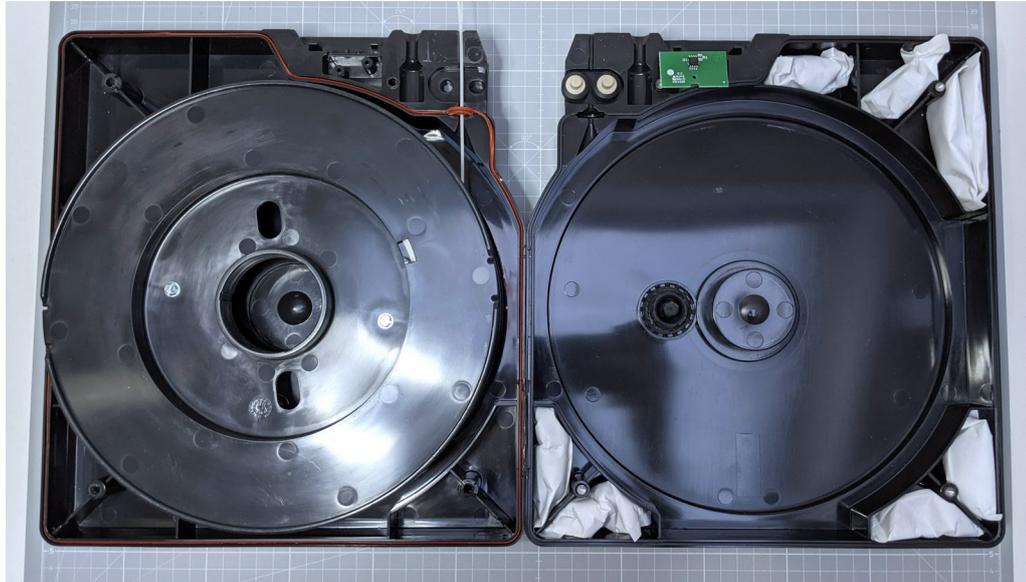


Abb. 2.8: Geöffnete Kassette des Druckers *Dimension 450SC* von *Stratasys Ltd.*

Die meisten Geräte im Desktop-Bereich bzw. im niedrigeren Preissegment besitzen hingegen ein offenes Materialsystem, welches nur aus dem Spulenkörper und dem darauf gewickelten Filament besteht. Der Anwender kann so auf ein breites Spektrum an verfügbaren Filamenten diverser Hersteller zurückgreifen. Zu berücksichtigen sind der Filamentdurchmesser, auf den der Extrusionsstrang des Druckers ausgelegt ist, sowie eine ausreichende thermische Leistung und Temperaturbeständigkeit des Extruders. Sind diese zwei Anforderungen erfüllt, so lassen sich die meisten Filamente zumindest extrudieren. Ob das Gerät in der Lage ist, mit dem jeweiligen Material anforderungsgerechte Bauteile herzustellen, ist jedoch von vielen weiteren Faktoren wie einer thermischen Isolierung des Bauraums oder einer lückenlosen Filamentführung für beispielsweise flexible Filamente abhängig. Der Anwendender muss prüfen, ob die jeweilige Anlage das gewünschte Material verarbeiten kann. Ebenso sind Anpassungen der Materialprofile im *Slicer*, die beispielsweise Anweisungen für Temperaturführung und Druckgeschwindigkeit enthalten, erforderlich. Um den Feuchtigkeitsgehalt der Thermoplaste vor der Verarbeitung auf ein akzeptables Niveau zu senken, kann eine wiederholte Trocknung z. B. in einem Industrieofen erforderlich werden. Dies ist insbesondere kritisch, da die Materialspulen häufig ohne weitere Umhüllung direkt auf einem Spulenhalter befestigt werden und somit permanent in Kontakt mit der Umgebungsluft stehen.

Mischsysteme wie beim *Ultimaker 3* sowie nachfolgenden Generationen des gleichnamigen Unternehmens können ebenfalls Filamente anderer Hersteller verarbeiten, besitzen gleichzeitig aber einen Sensor mit integrierter Nahfeldkommunikation, um

die eigenen Filamentspulen des Anbieters erkennen zu können. Werden solche Spulen eingelegt, so können Anwendende auf vorgefertigte Profile des Herstellers für das jeweilige Material zurückgreifen und so die Einstellarbeit im *Slicer* reduzieren. Grundsätzlich sind viele Anbieter bemüht, Verarbeitungshilfen für die meistverbreiteten Drucker in Form von vordefinierten Profilen anzubieten.

Überblick häufig eingesetzter Thermoplaste

Als grundlegende Einschätzung der Einsatzhäufigkeit der verfügbaren Thermoplaste im hobby- und semiprofessionellen Bereich wird die Bestsellerliste von *Amazon* für Filamente sowie das Produktprogramm größerer Filamentanbieter herangezogen. Dabei zeigt sich eine Einteilung der am meisten eingesetzten Thermoplaste bei offenen Materialsystemen, die sich mit eigenen Erfahrungen deckt. Es handelt sich um die Kunststoffe PLA, PETG, ABS und TPU [Ama20][Fil20b][nic20].

PLA besitzt dabei mit über 80 % der Suchergebnisse die größte Relevanz, dem folgt PETG mit ca. 15 % sowie TPU und abschließend ABS. Diese Reihenfolge lässt sich unmittelbar aus den Verarbeitungsparametern der Materialien ableiten, da PLA eine geringe Temperatur des Extruders und keine beheizte Bauplattform voraussetzt sowie nur wenig Schrumpfung bei der Abkühlung erfährt. Ebenfalls kann positiv angemerkt werden, dass PLA keine als unangenehm empfundenen Gerüche bei der Verarbeitung erzeugt. Letztlich ist auch der Preis mit ca. 20 bis 25 Euro pro Kilogramm im niedrigen Bereich angesiedelt. Allerdings ist die geringe Wärmeformbeständigkeit von PLA mit ca. 60 °C bereits für moderate Einsatztemperaturen, die z. B. durch die Abwärme elektrischer Antriebe erreicht werden, problematisch.

Der amorphe Thermoplast PETG besitzt ein ausgewogenes Profil von mechanischen und thermischen Eigenschaften bei gleichzeitig einfacher Verarbeitung. Mit ca. 75 °C liegt die Glastemperatur über der von PLA, wodurch das Anwendungsspektrum größer ausfällt. Je nach Größe des Druckobjektes und der Druckauflage kann eine beheizte Druckplattform erforderlich sein, um die Haftung an der Bauplatte aufrecht und thermische Verformungen während des Druckprozesses gering zu halten. Die Geruchsentwicklung ist ebenfalls moderat und der Preis liegt auf einem mit PLA vergleichbaren Niveau.

TPU besitzt Relevanz, da sich mit dem Material flexible Komponenten in unterschiedlicher Härte fertigen lassen. Das Material besitzt üblicherweise einen sehr guten Lagenzusammenhalt und eine ebensolche Schlagzähigkeit. Die vergleichsweise hohe Wärmeformbeständigkeit von ABS ist einer der Gründe, weswegen der Thermoplast

trotz seiner Geruchsentwicklung und der Voraussetzung eines beheizten Bauraums in geringerem Umfang Verwendung findet.

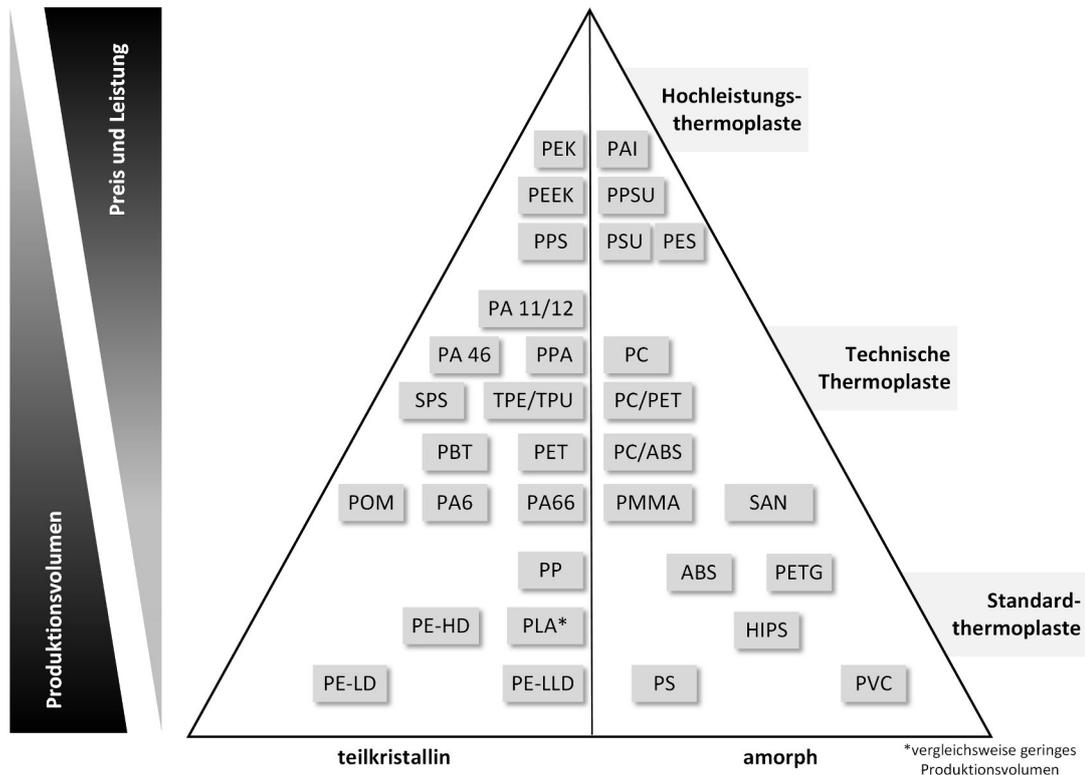


Abb. 2.9: Einteilung der thermoplastischen Kunststoffe (basierend auf [Nut21])

Für eine Übersicht der Thermoplaste in professionellen Anwendungen wird das Materialportfolio des Marktführers *Stratasys* herangezogen. Hier finden sich überwiegend höhertemperaturfeste Standardthermoplaste wie ABS und ASA in verschiedenen Variationen, welche beispielsweise eine erhöhte Biokompatibilität oder Transparenz aufweisen. Weitere Thermoplaste wie PC (Polycarbonat), PLA und ein flexibles TPU mit einer Shore-Härte von 92 A werden ebenfalls angeboten. Eine größere Produktgruppe stellt Polyamid (PA) dar, welches als PA 6, PA 12 und PA 12 mit Kohlenstofffüllung angeboten wird. Beworben wird eine besonders gute Schlagzähigkeit und Eignung für Dauerbelastungen. Die letzte Gruppe stellen mit *ULTEM1010*, *ULTEM9085* und *Antero 800NA* die Hochleistungsthermoplaste dar. Beide *ULTEM* Filamente basieren auf Polyetherimid (PEI), während *Antero* ein Polyetheretherketon (PEEK) ist. Diese Kunststoffe werden besonders dort eingesetzt, wo bestmögliche mechanische sowie thermische Eigenschaften erforderlich sind. Anwendungsbeispiele sind hochbelastete Maschinenkomponenten in Leichtbauanwendungen, während *ULTEM9085* zusätzlich die Anforderungen an den Brandschutz für die Anwendung in Kraftfahrzeugen und der Luftfahrt erfüllt.

2.2 Arten von Stützkonstruktion im FLM-Verfahren

2.2.1 Differenzierung

Stützstrukturen können nach mehreren Gesichtspunkten wie der softwaretechnischen Generierung oder der Grundform als gitterartige oder baumartige Struktur eingeteilt werden. Von besonderem Interesse ist hier die Einteilung nach dem Kriterium eines vom Baumaterial abweichenden Stützmaterials. Die Alternative stellt die Verwendung des gleichen Materials für beide Strukturen dar. Üblicherweise wird letztgenannte Technik bei günstigeren Druckern mit nur einer Düse bzw. einem Baumaterial eingesetzt. Dem gegenüber können Stützkonstruktionen ganz oder teilweise aus einem zweiten Material hergestellt werden. Eine detailliertere Gegenüberstellung beider Techniken wird im nachfolgenden Unterkapitel 2.2.2 gegeben und für Multimaterialsysteme in 2.2.3 weiter ausgeführt.

Ebenfalls relevant ist die Einteilung nach Art der Kontaktflächen. Einerseits zeigt die Erfahrung, dass ein Großteil der Stützstrukturen auf der Bauplattform beginnt und überhängende Bereiche von unterhalb des Objekts abstützt. Andererseits können abhängig von der Geometrie Überhänge vorhanden sein, die sich in z-Richtung projiziert über dem Druckobjekt befinden. Üblicherweise beginnt die Stützstruktur in diesen Fällen auf einer Oberseite des Druckobjekts und endet auf der zu stützenden Unterseite. Die verschiedenen Schnittstellen sowie deren Besonderheiten und alternative Techniken werden in Abschnitt 2.2.4 erläutert.

2.2.2 Stützstruktur bei Ein- und Multimaterialsystemen

Die Unterscheidung zwischen Ein- und Mehrdüsensystemen ist mit den neueren Entwicklungen im Bereich der Druckköpfe nicht mehr sinnvoll anzuwenden, da solche mit nur einer Düse existieren, welche verschiedene Polymere in einer gedruckten Schicht herstellen können. Diese Systeme werden nachfolgend als Multimaterialsysteme bezeichnet und sind unabhängig vom Aufbau des Druckkopfes definiert. Ein Beispiel ist das Produkt *Palette 2* von *Mosaic* (vgl. Abb. 2.10), das als zusätzliches Modul an einer Vielzahl kostengünstiger Drucker mit nur einer Düse eingesetzt werden kann. Das Modul kann aus bis zu vier Filamenten einen neuen Strang zusammenschweißen, der dann dem Druckkopf kontinuierlich zugeführt wird. Durch eine Berechnung der Wechselzeitpunkte können so Druckobjekte mit verschiedenen Farben erzeugt oder Stützstrukturen aus einem separaten Material gedruckt wer-

den [Mos21]. Einmaterialsysteme hingegen können ohne manuelle Einwirkung des Bedieners nur Stützkonstruktionen aus dem jeweiligen Baumaterial aufbauen.



Abb. 2.10: *Mosaic Palette 2* - Multimaterialmodul für eine Vielzahl an Druckern [Mos21]

Stützkonstruktion aus Baumaterial

Wird die Stützstruktur aus dem Baumaterial gedruckt, so muss kein Wechsel zwischen verschiedenen Materialien erfolgen. Vorteilhaft ist hierbei die geringere Prozesszeit, da in jeder Lage alle Funktionsbereiche wie Stützkonstruktion, Füllstruktur und Außenbahnen nacheinander ohne Wechselroutine gefertigt werden können. Eine offensichtliche Problemstellung und der größte Nachteil bestehen jedoch in der stoffschlüssigen Verbindung zwischen Druckobjekt und Stützkonstruktion. Die Kontaktflächen zwischen den Strukturen können mit dieser Technik nur teilgefüllt ausgeführt werden. Andernfalls besteht die Gefahr einer permanenten Verbindung, die nicht mehr beschädigungsfrei getrennt werden kann. Wird die Schnittstelle hingegen mit zu wenig Kontakt ausgeführt, so besteht die Gefahr einer frühzeitigen Ablösung im Druckprozess. Weiterhin kann es mit abnehmender Kontaktfläche zu Absackungen der ersten Objektschichten kommen, da diese durch die Schwerkraft in die offenen Freiräume fließen.

Insgesamt zeigt sich bei dieser Variante, dass die Anlagenkosten geringer ausfallen, der Fertigungsprozess weniger Zeit benötigt und die Materialhandhabung einfacher ist. Demgegenüber steht jedoch die aufwendigere Optimierung der Schnittstelle zwischen Stützstruktur und Druckobjekt sowie die schlechtere Oberflächenqualität. Da die Verbindung der Schichten neben dem jeweiligen Material u. a. durch Bauraumtemperatur, Lagenquerschnitt sowie weitere Größen beeinflusst wird, kann eine wie-

derkehrende Anpassung der Parameter an den jeweiligen Druckauftrag erforderlich werden.

Stützstruktur aus separatem Material

Bei einer Stützstruktur aus separatem Material wird dieses in der Regel so gewählt, dass auch bei voller Kontaktfläche eine spätere Ablösung oder Auflösung des Stützmaterials möglich ist. Der Vorteil besteht darin, dass bessere Oberflächen an den Schnittstellen erzeugt werden können und keine Absackung des aufliegenden Objektmaterials stattfindet. Nachteilig ist die aufwendigere Anlage, die mindestens zwei Materialien extrudieren können muss, sowie der zeitintensive Wechsel zwischen diesen. Der Wechselprozess besteht dabei häufig aus der Extrusion einer Verlustmenge, die in einem separaten Behälter aufgefangen wird. Das periodische Abstreifen und die Reinigung des Druckkopfes erfordern ebenfalls Zeit. Dieser Aufwand ist allerdings erforderlich, um keinen anhaftenden Kunststoff in das Bauteil zu tragen.

Für die Extrusion eines zweiten Materials sind nach dem Stand der Technik mehrere Varianten bekannt. Eine grundlegende Option besteht in der Verdoppelung der Extrusionseinheit. In diesem Fall verfügt der Druckkopf über zwei Düsen, die sich gemeinsam bewegen. Häufig sind Mechanismen vorhanden, welche die inaktive Düse in eine vom Bauteil entferntere Ruheposition verfahren, um dieses nicht mit nachlaufendem Material zu verunreinigen (vgl. Abb 2.11).

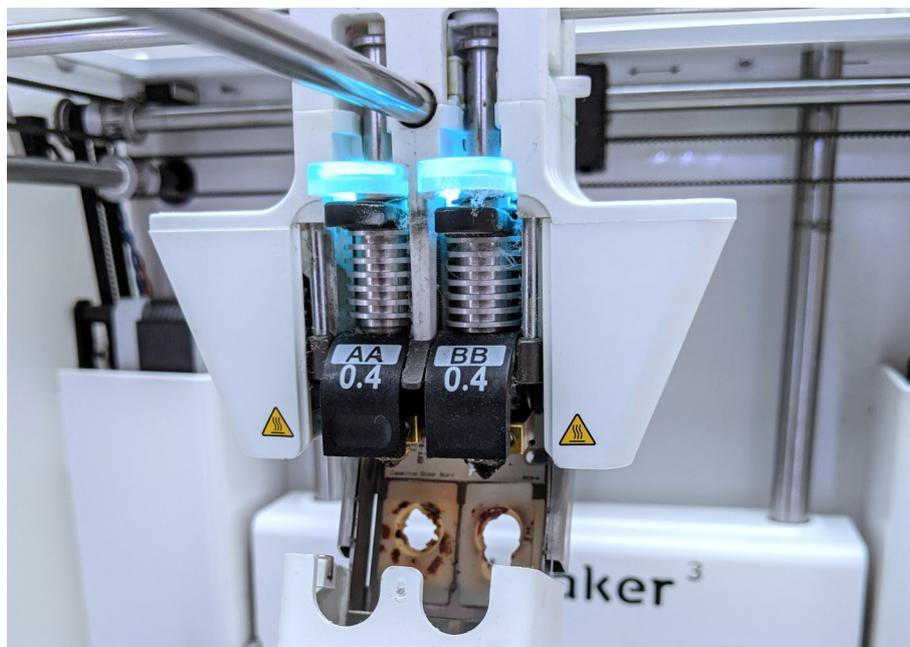


Abb. 2.11: Ultimaker 3 Druckkopf mit beiden Heißkanaldüsen (*Printcores*)

Eine neuere Entwicklung sind Druckköpfe, die nur eine Düse, aber zwei Filamentantriebe und -zuführungen sowie eine Weiche besitzen. Beim Materialwechsel wird das zuletzt aktive Material bis hinter die Weiche zurückgezogen, sodass der Weg zur Düse für das zuletzt inaktive Material frei wird. Als Vorteile werden eine geringere bewegte Masse und ein prinzipbedingt ausgeschlossenes Nachlaufen der inaktiven Düse genannt. Ein Modul, das eine Filamentweiche einsetzt, ist das *Multimaterial Upgrade 2.0* von *Prusa Research a.s.* (vgl. Abb. 2.12), welches die Filamente abwechselnd in die einzelne Heißkanaldüse einführt. Um eine Vermischung zwischen den Filamenten zu vermeiden, wird eine zusätzliche Struktur mitgedruckt, die nach dem Ende des Druckprozesses entsorgt wird und damit Abfall darstellt [Pru20b].



Abb. 2.12: *Prusa Multimaterial Upgrade 2.0* für bis zu vier Filamente [Pru20b]

Bei einer dritten Variante ohne Weiche und nur einer Düse werden die Filamente durch ein zusätzliches Modul in die benötigten Längen zerteilt, thermisch erneut verschweißt und als kombiniertes Filament dem Druckkopf zugeführt. Mit dem zuvor vorgestellten Produkt *Palette 2* von *Mosaic* (vgl. Abb. 2.10) können so bis zu vier Filamente in einem Druckprozess verarbeitet werden.

Die vorgestellten Funktionsprinzipien besitzen identifizierbare Stärken, aber auch Schwächen und eignen sich für unterschiedliche Anwendungsfälle. Weitere Lösungskonzepte, die aufgrund einer geringeren Verbreitung nicht weiter im Detail beschrieben werden, sind Werkzeugwechsler für mehrere Druckköpfe, zwei unabhängige Druckköpfe mit separatem Antrieb und eben solchen Mischdüsen, bei denen

zwei oder mehr Materialien in einem Mischungsverhältnis durch eine einzelne Düse extrudiert werden.

2.2.3 Polymerkombinationen bei Multimaterialsystemen

Einteilung

An dieser Stelle werden die gängigen Stützmaterialien sowohl aus dem Bereich der offenen als auch geschlossenen Materialsysteme beschrieben. Bei letztgenannten sind weiterführende Informationen, die über den Produktnamen des Herstellers sowie rudimentäre Datenblätter hinausgehen, in vielen Fällen nicht recherchierbar. Daher werden insofern erforderlich eigene Einschätzungen mit entsprechender Kennzeichnung gegeben. Die Einteilung erfolgt dabei in die Hauptgruppen *Stützmaterialien zur mechanischen Entfernung* und *auf lösbare Stützmaterialien*. Natürlich lassen sich auch alle Materialien letztgenannter Gruppe teilweise oder vollständig mechanisch entfernen. Häufig wird dieses Vorgehen sogar empfohlen, um das Wechselintervall der Auswaschlösung zu erhöhen und den Vorgang zu beschleunigen [Str20b]. Daher werden dieser Gruppe nur jene Polymere zugeordnet, die explizit für eine Auflösung z. B. in einem Wasserbad vorgesehen sind.

Stützmaterialien zur mechanischen Entfernung

Die nachfolgend vorgestellten Stützmaterialien werden nach dem Druckprozess mit entsprechenden Werkzeugen wie Zangen, Messern und Schleifmitteln manuell entfernt. Dieser Typ Stützmaterial basiert auf einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen der Stützstruktur und dem Material des Druckmodells. Dabei ist die Verbindung zwischen den Materialien mechanisch so fest, dass sich das Objekt während des Fertigungsprozesses nicht ablöst und Kräfte durch thermische Schrumpfung aufgenommen werden können. Gleichzeitig muss die nachträgliche Entfernung der Stützkonstruktion noch möglich sein. Neben der Anhaftung am Druckobjekt ist weiterhin sicherzustellen, dass das gewählte Stützmaterial mit dem der Bauplatte kompatibel ist. Für die mechanische Stabilität dieser Verbindung gelten ebenfalls die zuvor genannten Bedingungen. Ein weiterer Aspekt für die Auswahl einer Materialpaarung ist die Festigkeit der beiden Thermoplaste unter Prozessbedingungen. Unabhängig vom Einsatz eines beheizten Bauraums sind alle Polymere nach der Extrusion näherungsweise den gleichen thermischen Bedingungen ausgesetzt. Die Eignung der Materialpaarung kann beispielsweise anhand der Erweichungstemperatur eingeschätzt

werden. Zusammenfassend können folgende Anforderungen an das Stützmaterial zur mechanischen Entfernung festgehalten werden:

- begrenzte Haftung am Druckmaterial,
- begrenzte Haftung am Material der Bauplattform,
- vergleichbare oder höhere Erweichungstemperatur wie das Modellmaterial,
- vergleichbares thermisches Ausdehnungsverhalten wie Modellmaterial,
- mechanisch ausreichende Festigkeit zur Aufnahme von Prozesskräften,
- begrenzte Festigkeit, um die Entfernung innenliegender Stützstrukturen durch Zerbrechen zu ermöglichen.

Als Umsetzungen von Stützmaterialien zur mechanischen Entfernung wird zunächst das *BASS-System (Break-Away-Support-System)* von *Stratasys* vorgestellt, das u. a. für die vertriebenen Druckmaterialien PC, ABS und PEI angeboten wird (vgl. Abb. 2.13). Während die Produktbeschreibung und die angebotenen Datenblätter keinen Rückschluss auf die Zusammensetzung des Stützmaterials zulassen, kann das Patent *WO2016073409A1* herangezogen werden. Das Patent stimmt mit den oben genannten Anforderungen an die Auswahl bzw. die Zusammenstellung des Stützmaterials überein und stellt die Notwendigkeit der beschriebenen Erfindung insbesondere für hochtemperaturfeste Materialien dar.

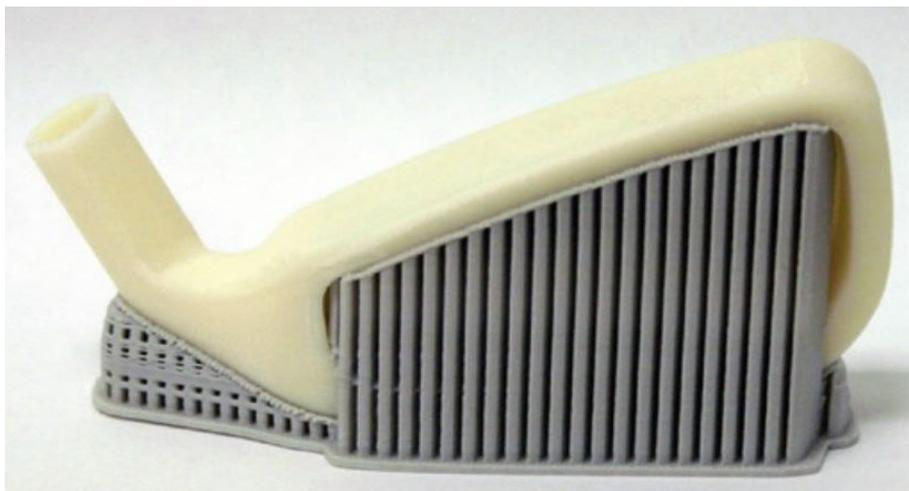


Abb. 2.13: Druckobjekt mit *Stratasys BASS-System* [Str20b]

Die grundlegende Erfindung besteht in der Mischung zweier Thermoplaste mit unterschiedlichen Eigenschaften bezogen auf die Anhaftung am jeweiligen Modellmaterial. Eine der beiden Komponenten besitzt dabei eine starke Tendenz zur stoffschlüssigen Verbindung, während der andere keine Verbindung mit dem Modellmaterial

eingeht. Über das Mischungsverhältnis können unterschiedlich starke Verbindungen eingestellt werden, da nur ein gewisser Teil des extrudierten Stützmaterials eine Verbindung mit dem Modellmaterial eingeht. Die Komponente, die der Anhaftung am Druckobjekt dient, kann entweder das Modellmaterial oder ein an diesem haftendes sein. Als Beispiel wird im Patent für das Modellmaterial Polyetherimid (PEI) eine Kombination aus Polyethersulfon (PES) und Polysulfon (PSU) als Stützmaterial genannt. PES weist dabei eine gute Haftung an PEI auf, während PSU keine Verbindung mit dem Modellmaterial eingeht. Als eine alternative Ausführung wird die Substitution von PES durch PEI beschrieben. Weiterhin werden optional einsetzbare Haftvermittler oder Trennmittel wie z. B. Silikone oder Wachse erwähnt, wie sie aus dem Bereich des Kunststoffspritzgusses bekannt sind. Anders als beim Druck mit nur einem Material werden bei dieser Variante die vollständige Abstützung des Bauteils sowie die einfache Entfernung der Stützkonstruktion als Vorteil genannt. Auch wenn die angebotenen Produkte von *Stratasys* keinen exakten Rückschluss auf die jeweils eingesetzte Polymerkombination zulassen, so lassen u. a. die Typen *PC-BASS*, *ULTEM 9085 resin Support* und *PPSF-BASS* auf eine Anwendung der im Patent beschriebenen Technik schließen.

Ein weiteres Beispiel für ein Stützmaterial zur mechanischen Entfernung ist das vom Hersteller *Ultimaker* angebotene Filament *Breakaway*. Aus dem Datenblatt geht hervor, dass es sich um eine Mischung aus Polyurethan (PU) – vermutlich eher thermoplastischem Polyurethan (TPU) – und Polyactid (PLA) handelt. *Breakaway* soll sich u. a. für ABS, PA sowie PLA eignen und sich im Postprozess einfach ausformen lassen. Hier wird dieselbe grundlegende Technik eingesetzt, die auch beim *BASS-System* von *Stratasys* Anwendung findet. Nach eigener Erfahrung haften sowohl TPU als auch PLA auf der Bauplatte aus Glas des *Ultimaker 3*, während der Anteil an TPU beispielsweise eine begrenzte Haftung am genannten ABS aufweist. Vorteilhaft ist sicherlich auch die Flexibilität des Materials, welche laut dem Hersteller ein vereinfachtes Abziehen der Stützkonstruktion ermöglicht [Ult20b].

Weitere Filamente, die eine vergleichbare Funktion versprechen, sind beispielsweise *PolySupport* von *Polymaker* mit einer Eignung für den Einsatz mit PLA und *Scaffold Snap* von *E3D*. Letztgenanntes wird für die Anwendung in Kombination mit ABS und ASA als Modellmaterial beworben (vgl. [Pol20] und [E3D20]).

Auflösbare Stützmaterialien

Ein entscheidender Vorteil auflösbarer Stützmaterialien besteht in der schonenden Entfernung von komplexen, teilweise umschlossenen oder filigranen Strukturen. Ei-

ne mechanische Entfernung bei diesen Materialien kann grundsätzlich entfallen. Die meisten Hersteller raten allerdings dazu, gut erreichbare große Abschnitte im Vorfeld manuell zu entfernen, um die Standzeit der Reinigungslösung zu verlängern und die Auswaschzeit zu reduzieren. Durch die spätere Auflösung kann die Kontaktfläche zwischen Stütz- und Objektmaterial mit hoher Überdeckung ausgeführt werden, wodurch ein Absacken der ersten Lage des Druckobjektes vermeidbar und eine besonders hohe Oberflächenqualität erreichbar ist. Eine zusätzliche Problemstellung gegenüber den rein mechanisch entfernbaren Stützmaterialien ist die Abstimmung zwischen den zwei Polymeren und der Lösung im Auswaschbecken. So soll das Bad das Stützmaterial schnell und rückstandslos auflösen, während gleichzeitig keine erhebliche Verschlechterung der Eigenschaften des gedruckten Modells auftritt. *Stratasys* beschreibt daher neben der Konzentration des Lösemittels im Becken und der Badtemperatur auch Zeitintervalle, die möglichst nicht überschritten werden sollen. Andernfalls kann sich beispielsweise im Falle von Polycarbonat (PC) eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften um 5 % bis 15 % einstellen [Str20b].

Zusammenfassend können folgende Anforderungen an auflösbares Stützmaterial festgehalten werden:

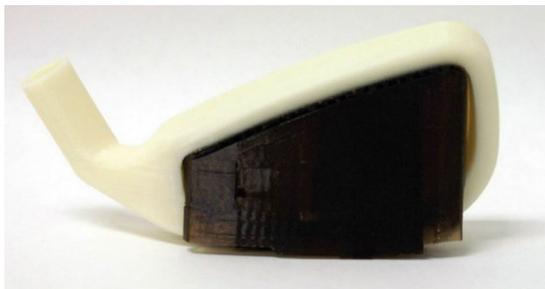
- starke Haftung am Druckmaterial zulässig,
- begrenzte Haftung am Material der Bauplattform,
- vergleichbare oder höhere Erweichungstemperatur als das Modellmaterial,
- vergleichbares thermisches Ausdehnungsverhalten wie Modellmaterial,
- mechanisch ausreichende Festigkeit zur Aufnahme resultierender Kräfte,
- Vermeidung einer zu starken Schädigung des Materials durch Lösemittel.

Die Auflösung des Stützmaterials erfolgt in der Regel in einem mit Wasser gefüllten Behälter oder Becken. Je nach Verfahren werden Zusätze beigemischt, welche für die Auflösungsreaktion erforderlich sind oder diese beschleunigen. Das Becken kann beispielsweise als einfacher Behälter ohne weitere Funktionen oder als Auswaschanlage mit Ultraschallreinigung, Umwälzung und Beheizung ausgeführt sein. Abbildung 2.14 zeigt ein System der Baureihe *SUT70* der *Schmitt Ultraschalltechnik GmbH*, welches eine Kombination dieser Funktionen für eine beschleunigte Auflösung verwendet. Das Gerät ist für die Reinigung von FLM-Teilen ausgelegt und kann mit den von *Stratasys* angebotenen Zusätzen oder dem eigenen alkalischen Reiniger *SUT-Clean 1* eingesetzt werden.



Abb. 2.14: Ultraschallreiniger *SUT70* der *Schmitt Ultraschalltechnik GmbH* [Sch20]

Stratasys bietet u. a. mit *SR-20*, *SR-30*, *SR-100* und *SR-110* eine Reihe auswaschbarer Stützmaterialien an, welche für verschiedene Modellmaterialien geeignet sind. Für die genannten sind dies *SR-20/30* für ABS und ASA, *SR-100* für Polycarbonat und *SR-110* für Polyamid.



(a) Stützmaterial *SR-20* mit ABS



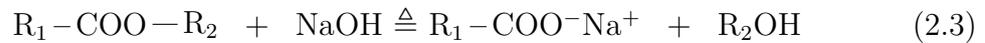
(b) Stützmaterial *SR-30* mit ASA

Abb. 2.15: Auswaschbare Stützmaterialien für ABS und ASA [Str20b]

Abbildung 2.15 zeigt den Einsatz von *SR-20* und *SR-30* als Stützmaterial. *Stratasys* verwendet für alle Stützmaterialien ein Auswaschkonzentrat mit dem Namen *P400-SC Waterworks Soluble Concentrate*. Aus [Str15] geht hervor, dass sich das Konzentrat aus folgenden Bestandteilen zusammensetzt:

- Natriumcarbonat 60 % - 70 %,
- Natriumhydroxid 20 % - 30 %,
- Natriumlaurylsulfat 1 % - 5 %,
- Natriumsilicate 1 % - 5 %.

Die Stützmaterialien *SR-30*, *SR-100* und *SR-110* sind zusammen mit ihrem chemischen Aufbau im Anhang A.47 dargestellt. Die Polymere enthalten hydrophile Bestandteile wie Carboxy- und Hydroxygruppen, die eine Wasserlöslichkeit begünstigen. Dem entgegen wirkt die hydrophobe Estergruppe, welche durch die Zusammensetzung des Reinigungskonzentrats abgelöst werden soll. Auf diese Weise wird die Auflösung des zunächst festen Stützmaterials im Auswaschbecken ermöglicht. Die Reaktionen nach [Jia16] sind nachfolgend dargestellt.



Natriumcarbonat und -hydroxid reagieren mit der Carboxygruppe, während das Natriumhydroxid ebenfalls mit der Estergruppe durch die gewünschte alkalische Esterhydrolyse reagiert. Das Produkt der Reaktion weist eine gute Löslichkeit in Wasser auf. Entscheidend ist dabei, dass technische Kunststoffe wie ABS, PC und PA eine ausreichende chemische Resistenz gegenüber Hydrolyse besitzen, sodass eine begrenzte Verweildauer im Bad zu keiner kritischen Schädigung des Druckobjektes führt [Jia16].

Die Reaktionsgeschwindigkeit der beschriebenen Prozesse kann durch die Beheizung und Zirkulation der Lösung durch das Auswaschbecken gesteigert werden. [LFM16] untersuchen den Einfluss der Umspülung der Stützkonstruktion aus *SR-30* insbesondere bei schlecht zugänglichen Kavitäten. Die Untersuchung zeigt, dass sich in Zonen ohne Bewegung der Reinigungslösung *P400SC* eine Schicht aus bereits aufgelöstem Material bildet, welche den weiteren Prozess signifikant verlangsamt. Durch den verfolgten Lösungsansatz einer druckbeaufschlagten Spülung der Hohlräume kann die benötigte Auflösungszeit für das Testobjekt erheblich reduziert werden. Für weiterführende Informationen zur Auswaschlösung mit *P400SC* sei auf das Patent *US6790403B1* von *Stratasys* verwiesen.

Bei offenen Materialsystemen sind besonders Polyvinylalkohol (PVA), Butenediol-Vinylalkohol-Copolymer (BVOH) und hochschlagfestes Polystyrol (engl. High Impact Polystyrene HIPS) verbreitet, wobei Letztgenanntes sowohl als Baumaterial als auch als Stützmaterial in Kombination mit ABS eingesetzt wird. PVA findet häufig Anwendung als Bestandteil in wasserlöslichen Klebstoffen. Im FLM-Verfahren wird der Thermoplast aufgrund seiner Hafteigenschaften von verschiedenen Herstellern wie *Ultimaker* oder *Formfutura* als Filament angeboten. Zur Entfernung wird

das Druckobjekt in ein Wasserbad gelegt. Zusätze beispielsweise zur Beschleunigung der Materialauflösung sind nicht bekannt. Lediglich eine Beheizung des Beckens sowie die Bewegung des Wassers werden als vorteilhaft beschrieben. Der Einsatz als Stützkonstruktion für Modellmaterialien, die einen stärker beheizten Bauraum voraussetzen, wird durch die vergleichsweise geringe Wärmeformbeständigkeit von ca. 60 °C limitiert [Ult20c].



Abb. 2.16: Wasserlösliche Stützstruktur mit *Ultimaker 3* gefertigt [Ult20c]

BVOH wird von *Verbatim* als schneller auflösende und besser druckbare Alternative zu PVA vertrieben. Der Nachbearbeitungsschritt erfolgt analog zu diesem [Ver17]. HIPS wird als Partnermaterial für ABS eingesetzt, da es sich in Limonen lösen lässt, während ABS nicht kritisch durch das Lösungsmittel geschädigt wird. Die Stützkonstruktion lässt sich nach eigener Erfahrung gut mechanisch entfernen, sodass in vielen Fällen kein chemischer Auflösungsprozess erforderlich ist.

Weitere Schutzrechte mit dem Anspruch eines verbesserten Stützmaterials, das die vielfältigen Anforderungen bestmöglich erfüllt, sind bekannt. Nachfolgend werden zwei Beispiele für die Bestrebungen von Kunststoffherstellern aufgezeigt, bestimmte Aspekte des Stützmaterials zu optimieren. Die *Covestro Deutschland AG* besitzt das Patent *WO2017191150A1*, welches Copolycarbonat als geeignetes Stützmaterial für das FLM-Verfahren beschreibt. Dabei wird der Thermoplast in Kombination mit hochtemperaturfesten Druckmaterialien wie PEI als vorteilhafte Alternative gegenüber dem Stand der Technik dargestellt. Tetrahydrofuran (THF) wird neben anderen Lösungsmitteln als besonders geeignet für die Kombination mit üblichen Baumaterialien genannt. *Dow Global Technologie LLC* beschreibt in dem Patent *WO2015108768A1* Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) als geeigneten Kandidaten für Stützkonstruktionen, da es sowohl bei Raumtemperatur wasserlöslich ist als auch eine gute Haftung an ABS und PLA aufweist. Nach dem Patent ist die Geschwindigkeit der Auflösung gegenüber PVA deutlich erhöht.

2.2.4 Geometrischer Aufbau von Stützkonstruktionen

Einleitung

Die Stützkonstruktion lässt sich in verschiedene geometrische Abschnitte unterteilen, welche die Software zur Generierung des Steuerungscode (nachfolgend als *Slicer* bezeichnet) für das Drucksystem erzeugt. Da es keine einheitliche Definition für die einzelnen Abschnitte und Einstellmöglichkeiten der Stützkonstruktion gibt, werden diejenigen des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten *Slicers Cura* von *Ultimaker* in der Version 4.6.1 als Basis benutzt. Nach eigener Erfahrung bietet *Cura* zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit die größtmögliche Flexibilität zur Beeinflussung der Bahngenerierung. Durch die Quelloffenheit sowie durch eine Schnittstelle für eigene Softwaremodule und nachgeschaltete Skripte ergeben sich komfortable Optionen zur Erweiterung der Funktionalität. Als Vergleich kann der *Slicer CatalystEX* in der Version 4.5 von *Stratasys* genannt werden. Dieser bietet nur sehr grundlegende Einstellungen wie *Smart* oder *Minimal* für die Stützstruktur, welche deren Dichte und die Optimierung der eingesetzten Materialmenge beeinflussen. Einerseits sind dem Nutzer damit potenzielle Einstellmöglichkeiten genommen, andererseits liefern die vordefinierten und auf die Anlage abgestimmten Konfigurationen in den meisten Fällen gute Druckobjekte. Weitere verbreitete *Slicer* sind beispielsweise *Slic3r*, dessen Entwicklung aktiv durch *Prusa Research a.s.* vorangetrieben wird, oder das kommerziell vertriebene *Simplify3D* vom gleichnamigen Hersteller.

Während sich im Englischen ein Großteil der verwendeten Bezeichnungen in anderen *Slicern* wiederfinden lässt, sind die deutschen Übersetzungen eher spezifisch für die jeweilige Softwarelösung und unvollständig. Häufig kommt auch die deutsche Spracheinstellung nicht ohne die Verwendung von in der FLM-Terminologie verbreiteten englischen Begriffen aus. Zwecks Nachvollziehbarkeit wird im nachfolgenden Abschnitt eine eigene Übersetzung bzw. Definition der Funktionsbereiche der Stützkonstruktion gegeben. Weiterhin sei angemerkt, dass die aktuelle Entwicklung der *Slicer* rasch voranschreitet und bestehende Funktionen häufig umbenannt, erweitert oder undefiniert werden.

Funktionsbereiche der Stützstruktur

Die nachfolgenden Funktionsbereiche *Bauplatten-Schnittstelle*, *obere* und *untere Stützstruktur-Schnittstelle* und *Stützstruktur-Füllung* können allein oder kombiniert im Druckprozess eingesetzt werden. Es ist nicht zwingend erforderlich, alle Techniken in jedem Fall einzusetzen. Häufig wird die Füllung der Stützstruktur

allen nachfolgend beschriebenen Funktionen gerecht. Abbildung 2.17 zeigt die Funktionsbereiche anhand eines einfachen Beispiels.

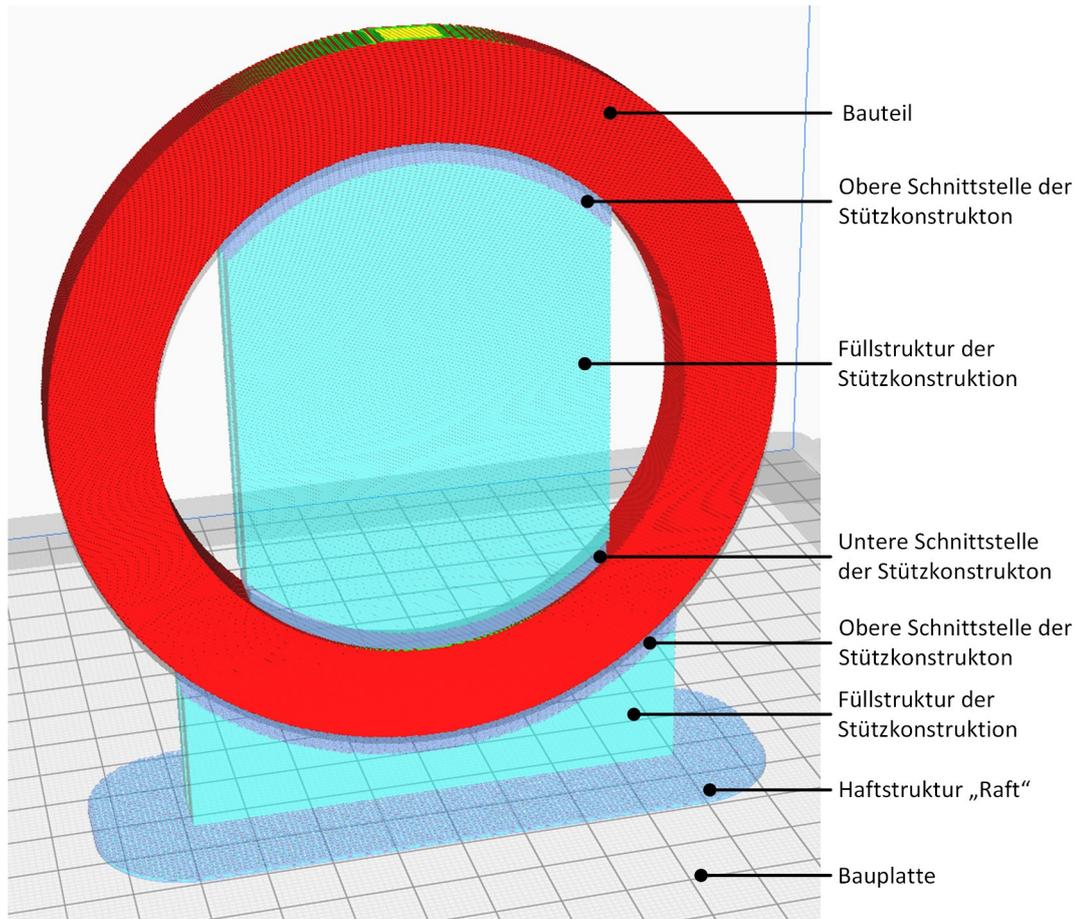


Abb. 2.17: Funktionsbereiche der Stützkonstruktion

Die Schnittstelle zur Bauplatte beinhaltet alle Elemente, die auf der Bauplatte haften und nur bis zu einer bestimmten Schichthöhe mitgedruckt werden. Sie stellen zwar keine unmittelbare Stützkonstruktion dar, interagieren allerdings unmittelbar mit dieser. Die einfachste Variante stellt eine Anfahrbahn dar, die vor dem Druck der Bauteilbahnen in der jeweiligen Lage ohne Verbindung mit dem Objekt gedruckt wird. Der Einsatz dient der Vorbereitung der Heißkanaldüse beim Start des Druckvorgangs, um beispielsweise zersetztes Material zu entfernen. Je nach Startprozedur kann diese im Englischen *Skirt* genannte Bahn entfallen. Eine ebenfalls übliche Erweiterung der ersten Lagen stellt eine wenige Schichten dicke Anordnung von Bahnen dar, die der Bauteilkontur folgend um das Druckobjekt herum abgelegt wird und mit diesem verbunden ist. Der primäre Zweck ist die Vergrößerung der Aufstandsfläche, um eine stärkere Gesamthaftung und Stabilität gegen Kippen zu erzielen. Durch die geringe Kontaktfläche zum Druckobjekt lässt sich der *Brim* relativ einfach mechanisch entfernen. Als *Raft* wird hingegen eine gitterartige Struktur bezeichnet, die unter dem Druckobjekt platziert und damit als erstes gedruckt wird.

Das Druckobjekt wird dabei um die Anzahl der Lagen des *Rafts* angehoben. Durch diese zusätzlichen Lagen können Unebenheiten sowie leichte Schiefstellungen der Bauplattform ausgeglichen und die Haftung des Bauteils besser eingestellt werden. Je nachdem, ob das Druckobjekt oder die Stützkonstruktion in Kontakt mit dem *Raft* sind, muss dieses nach dem Druckprozess manuell entfernt werden.

Die eigentliche Stützkonstruktion lässt sich in die drei Abschnitte *obere* und *untere Stützstruktur-Schnittstelle* sowie die *Stützstruktur-Füllung* unterteilen, welche jeweils mehrere Schichten umfassen können. Die untere Schnittstelle befindet sich zwischen der Bauplatte, dem Raft oder der Oberseite des Druckobjektes und der Stützstruktur-Füllung. Die obere Schnittstelle ist hingegen zwischen der Stützstruktur-Füllung und der Unterseite des Druckobjektes platziert. An Positionen, bei denen der Abstand zwischen Bauplatte und Bauteilunterseite geringer oder gleich der Dicke der oberen Schnittstelle ist, wird die Stützkonstruktion ohne zusätzliche Füllung generiert. Die Struktur der oberen und unteren Schnittstelle ist hinsichtlich der Anhaftung am Druckobjekt optimiert. Der oberen Schnittstelle kommt überdies die Aufgabe der Abstützung der abgelegten Materialbahnen zu, die das Druckobjekt bilden. Bei der Füllung der Stützkonstruktion ist das Optimierungsziel hingegen ein möglichst geringer Materialeinsatz bei gleichzeitig ausreichender Stabilität.

Ablegestrategien der Stützstruktur

Während das *Raft* üblicherweise auf Basis eines mäanderförmigen Gitters und *Brim* sowie *Skirt* durch konzentrische Bahnen entlang der Bauteilgeometrie aufgebaut wird, existieren für die drei Stützstrukturbereiche grundlegend verschiedene Ablegestrategien. Diese Varianten unterscheiden sich u. a. in Form und Reihenfolge der abgelegten Bahnen. In Abbildung 2.18 sind die verfügbaren Ablegemuster von *Cura* abgebildet. Die zwei Schnittstellen sowie die Füllstruktur können dabei jedes der dargestellten Muster annehmen. Überdies kann die Dichte bzw. der Abstand zwischen den Bahnen frei gewählt werden, um beispielsweise die Kontaktflächen der Schnittstellen anzupassen oder Material in der Füllstruktur einzusparen.



Abb. 2.18: Ablegemuster für Stützstrukturen in *Cura 4.6.1* [Ult20a]

Neben Dichte und Form ist der Abstand der Stützstruktur zum Druckobjekt der entscheidende Faktor, welcher die Anhaftung und Oberflächenqualität bestimmt.

Dabei lassen sich zwei verschiedene Strategien für Stützkonstruktionen aus Objektmaterial und solche aus separatem Material identifizieren. Bei Erstgenannten wird generell empfohlen, einen Spalt von ein- bis zweifacher Lagenhöhe zwischen Objekt und Stützstrukturoberfläche einzustellen. Dadurch werden die ersten Lagen des Bauteils weniger angedrückt und bilden eine kleinere Kontaktfläche zur Stützstruktur aus. Weiterhin wird die Dichte für solche Verbindungen auf geringere Werte i. d. R. von deutlich unter 40 % eingestellt. Aus beiden Maßnahmen resultiert eine geringere Verschweißung der Lagen, wodurch die spätere Entfernung ermöglicht und vereinfacht wird. Diese Konfiguration sorgt gleichzeitig aber auch für geometrische Abweichungen und Fehlstellen, da die abgelegten Bahnen auf der gitterartigen Stützkonstruktion liegen und nicht an jedem Punkt abgestützt sind. Bei Stützstrukturen aus separatem Material wird eine Schnittstelle ohne Spalt und hoher Dichte bis hin zur vollständigen Füllung generiert. Die abgelegten Bahnen des Druckobjekts werden in diesem Fall vollflächig abgestützt und können eine bestmögliche Qualität erreichen.

Es existieren über die beschriebenen hinaus weitere Einstellmöglichkeiten, die eine detaillierte Anpassung der Stützstruktur an die Erfordernisse des Druckauftrages ermöglichen. So können z. B. für jeden der vorgestellten Bereiche der Stützstruktur das zu verwendende Material ausgewählt, zusätzliche stabilisierende Wände eingefügt oder die jeweilige Druckgeschwindigkeit angepasst werden.

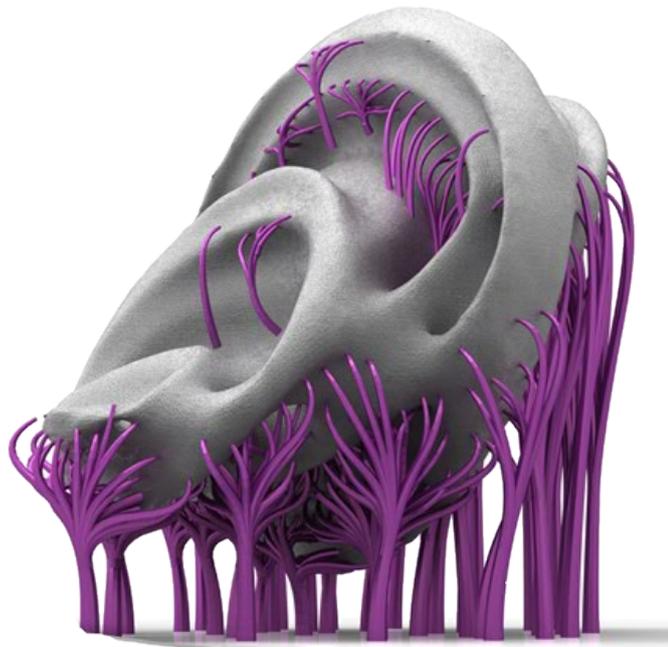


Abb. 2.19: Baumartige Stützstruktur mit *Autodesk Netfabb 2020* [Aut20]

Grundsätzlich werden die Stützstrukturen von den abzustützenden Flächen entlang der z-Achse in Richtung Bauplatte projiziert. Die so entstehenden Stützstrukturen besitzen die charakteristische säulenartige Form. Eine abweichende Strategie sind die sogenannten baumartigen Strukturen, die anhand eines Beispiels in Abbildung 2.19 darstellt sind. Dabei beginnt diese Form der Stützkonstruktion mit einer breiten Basis und verästelt sich immer weiter bis zur Kontaktfläche mit der Bauteilgeometrie. Aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich sind in Unterabschnitt 2.5.2 zu finden.

2.3 Kontaktmaterial der Bauplattform

Für das Kontaktmaterial der Bauplattform hat sich eine Vielzahl kommerziell vertriebener Lösungen entwickelt. Zur Einordnung wird hier eine grundlegende Einteilung in feste Druckauflagen und flüssig applizierbare Lösungen getroffen. Bauplattform und Stützmaterial müssen aufeinander abgestimmt werden und können daher nicht losgelöst voneinander ausgewählt werden.

Zu den festen Betauflagen zählen beispielsweise Glasplatten, mit Kunststoff beschichtete Aluminiumplatten und diverse Kunststofffolien wie *BuildTak* vom gleichnamigen Hersteller oder *FilaPrint* von der *Filafarm GmbH und Co. KG*. In den meisten Fällen geben die Hersteller nicht bekannt, welche Kunststoffe oder andere Materialien in diesen Folien oder Platten verwendet werden. Eine wiederkehrende und identifizierbare Kombination ist das Folieren oder Beschichten einer Metallplatte mit Polyetherimid (PEI). Dabei wird PEI die Eigenschaft zugesprochen, im beheizten Zustand mit Druckmaterialien wie ABS, PLA und PETG eine starke Haftung einzugehen, die nach dem Abkühlen der Bauplattform abnimmt. Drucker wie der verbreitete *PRUSA I3 MKS3* von *Prusa Research* setzen beispielsweise eine Druckplatte aus Federstahl ein, die mit PEI beschichtet ist [Pru20a]. Andere bekannte Drucker wie jene von *Ultimaker* werden mit einer Glasplatte ausgeliefert, die ohne weitere Beschichtung beispielsweise für PETG geeignet ist. Ebenso können Platten und Folien aus dem gleichen Material wie das Druckobjekt als Bauplatte eingesetzt werden. Nach eigener Erfahrung erweist sich die Einstellung einer passenden Haftung aufgrund einer potenziellen Verschweißung als besonders schwierig. Weitere bekannte Produkte, die als Bauplattform eingesetzt werden, sind kohlenstofffaser- und glasfaserverstärkte Platten sowie diverse durch die Hersteller nicht weiter spezifizierte Kunststofffolien.

Zu den durch Sprühen applizierbaren Beschichtungen zählen beispielsweise die kommerziellen Produkte *DimaxFix* des gleichnamigen Herstellers oder *Printafix* von *AprintaPro*. Diese Lösungen werden auf der Oberfläche der Bauplattform aufge-

sprüht und müssen nach einer bestimmten Anzahl an Druckprozessen erneut aufgetragen werden. Haftvermittler in flüssiger Form wie *Magigoo* vom gleichnamigen Hersteller oder *Wolfbite* von *Airwolf 3D* werden durch einen Schwamm- oder Pinsel gleichmäßig auf dem Druckbett verteilt. Die beworbene Eignung für variierende Druckmaterialien lässt auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der Produkte schließen. So eignet sich *Dimafix* besonders für ABS [DIM20], während *Magigoo PC* eine haftsteigernde Wirkung für Drucke aus Polycarbonat besitzt. In der Regel wird empfohlen, diese Produkte auf eine beheizbare Glasplatte aufzubringen. Eine Entfernung dieser Mittel ist häufig durch die zumindest teilweise vorhandene Löslichkeit in Wasser gegeben. Abbildung 2.20 zeigt die beworbene Haftfähigkeit von ABS auf einer mit *Dimafix* besprühten Bauplatte in Abhängigkeit von der Temperatur. Der dargestellte Verlauf ist ideal, da er eine große Haftung ab 95 °C und ein einfaches Ablösen unterhalb von 65 °C verspricht.

Aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich der Bauplatte bemühen sich, diese hinsichtlich der Hafteigenschaften zu optimieren. [MPM18] untersuchen PC als Druckbettauflage und stellen eine gute Eignung für die Kunststoffe ABS, TPU, PLA und PETG fest. In Kombination mit HIPS, PC, PA und PVA zeigt sich eine eingeschränkte Haftung. Die Autoren betonen die komplexe Problematik, welche durch die unterschiedlichen Werkstoffe gegeben ist, und sehen in PC das Potenzial, als universelle Bauplatte für verschiedene thermoplastische Druckmaterialien eingesetzt zu werden.

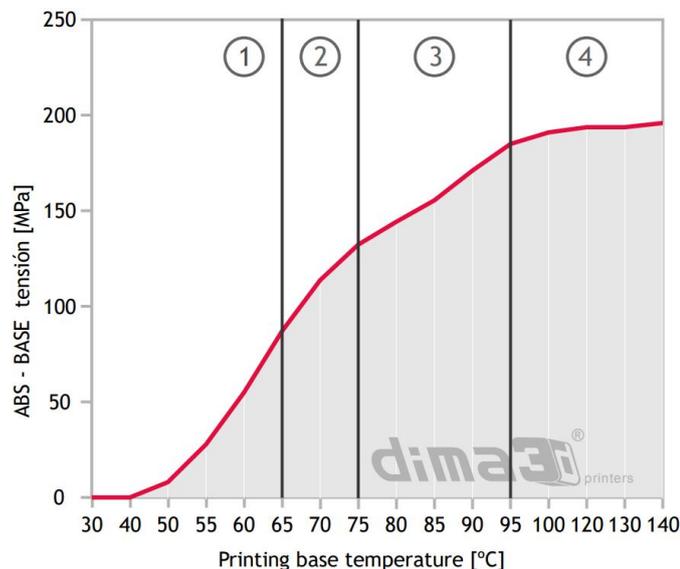


Abb. 2.20: Haftfähigkeit von ABS auf einer mit *DimaFix* beschichteten beheizten Glasplatte [DIM20]

Abbildung 2.21 zeigt die ermittelte Stärke der Haftung qualitativ für verschiedene thermoplastische Druckwerkstoffe. Die roten Symbole stellen die Haftung auf der

unbehandelten Bauplatte dar, während bei den gelben ein Haftvermittler mit dem Namen *CubeGlue* eingesetzt wird.

	Weak	Medium	High
Polycarbonate (PC)			
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)			
Polylactic Acid (PLA)			
Polyethylene Terephthalate (PET)			
High-Impact Polystyrene (HIPS)			
Synthetic Polyamide (Nylon)			
Thermoplastic Polyurethane (TPU)			
Polyvinyl Alcohol (PVA)			
Aluminum PLA			
Carbon Fiber PLA			

Predicted bonding

Observed bonding (no surface treatment)

Observed bonding (with surface treatment)

Abb. 2.21: Haftfähigkeit einer Bauplatte aus Polycarbonat mit verschiedenen Modellmaterialien [MPM18]

[NWZ17] stellen eine verglichen mit anderen Thermoplasten schlechte Verarbeitbarkeit von PVA im FLM-Prozess fest und entwickeln eine für den 3-D-Druck optimierte Variante des wasserlöslichen Kunststoffes. Durch die Beimischung von Harnstoff und Caprolactam wird ein flexiblerer Stoff mit höherer Bruchdehnung geschaffen, der überdies eine gesteigerte thermische Zersetzungstemperatur und geringere Kristallinität besitzt. Die Untersuchung des Materials mit einem Rasterelektronenmikroskop zeigt eine homogene Mischung der eingesetzten Komponenten, sodass auf deren gute Kompatibilität geschlossen wird. Die beschriebenen Eigenschaften haben das Potenzial, eine verbesserte Druckbarkeit zu bewirken, ein empirischer Test wird allerdings nicht durchgeführt.

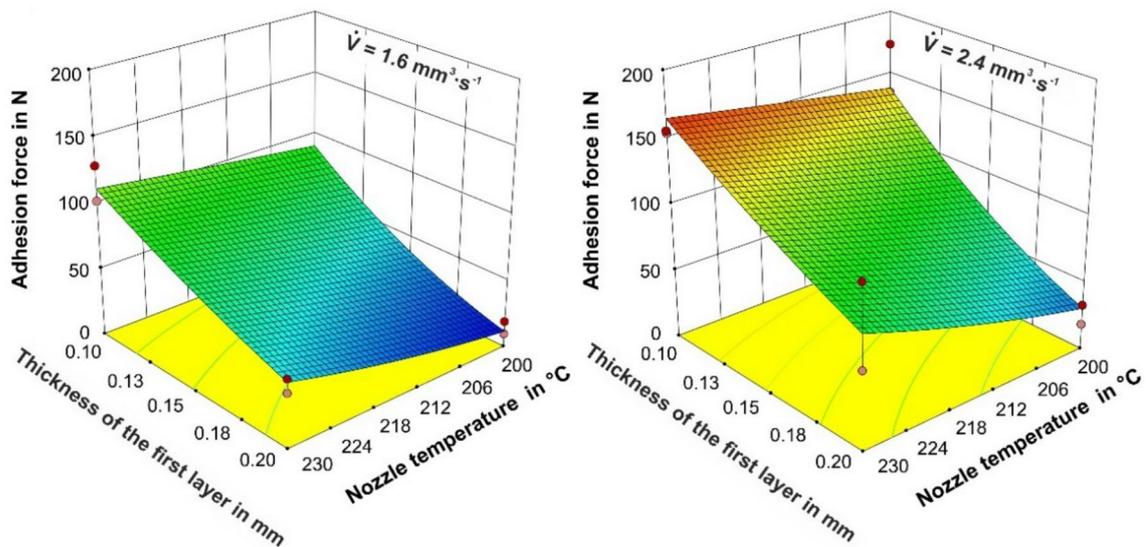


Abb. 2.22: Haftkraft von Polypropylene auf einer Bauplatte aus ultrahochmolekularem Polyethylen [SGL18]

[SGL18] stellen eine empirische Untersuchung zur Eignung einer Bauplatte aus ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE) für die Verwendung mit Polypropylen (PP) als Druckmaterial an. Nach dem Stand der Technik existiert keine praktikabel einsetzbare Bauplatte für dieses teilkristalline Druckmaterial. Die Untersuchung zeigt, dass UHMWPE geeignet ist und eine ausreichende Haftung mit PP unter den nachfolgenden Prozessbedingungen aufbaut. Vorteilhaft für den Verbund ist eine hohe Temperatur der beheizten Bauplattform sowie der Heißkanaldüse, eine Extrusion der ersten Lage mit hoher Vorschubgeschwindigkeit und eine geringe Lagenhöhe (vgl. 2.22). Eine weitere Steigerung der Haftkraft wird durch das Sandstrahlen der Bauplattform und einer damit einhergehenden Erhöhung der Oberflächenrauheit erreicht. Abbildung 2.23 zeigt den Einfluss der Oberflächenbehandlung unter den zuvor identifizierten optimalen Prozesseinstellungen. Den Grund in dieser Steigerung sehen die Verfasser in der Erhöhung der Oberfläche und der mechanischen Verklammerung des Polypropylens in der aufgerauten Oberflächenstruktur.

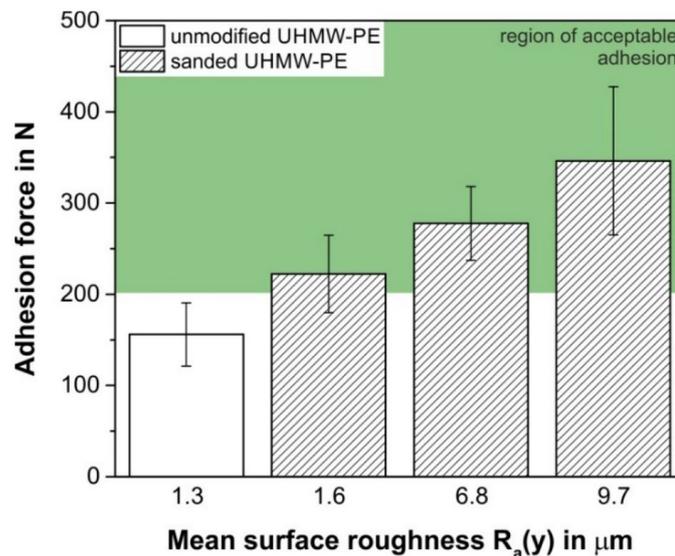


Abb. 2.23: Steigerung der Haftkraft auf Basis der Oberflächenrauheit der Bauplattform [SGL18]

Diese Zusammenstellung behandelt nur die gängigen Lösungen, während noch weitere Produkte und Techniken bekannt sind. Insgesamt ist allen Materialien und Verfahren gemein, dass sie keine einheitliche Lösung darstellen, die für alle üblicherweise eingesetzten Thermoplaste ausreichend gut funktionieren.

2.3.1 Haftungsmechanismen

Da die Arbeit die Entwicklung einer formschlüssigen Stützkonstruktion behandelt, wird an dieser Stelle lediglich eine grundlegende Einteilung der Haftungsmechanismen gegeben, ohne im Detail auf die polymerwissenschaftlichen Zusammenhänge

der stoffschlüssigen Verbindungen einzugehen. Abbildung 2.24 zeigt die grundsätzlichen Effekte nach [FWH19], die an den Kontaktflächen zwischen den zwei eingesetzten Thermoplasten auftreten und zu einer Haftwirkung führen können. Im Bereich der stoffschlüssigen Verbindungen existieren unterschiedliche Wirkmechanismen wie Diffusion oder elektrostatische Wechselwirkung, die abhängig vom Aufbau des jeweiligen Polymers sind. Dies bezieht sich nicht nur auf Stütz- und Druckmaterial, sondern schließt auch das Material der Bauplatte mit ein.

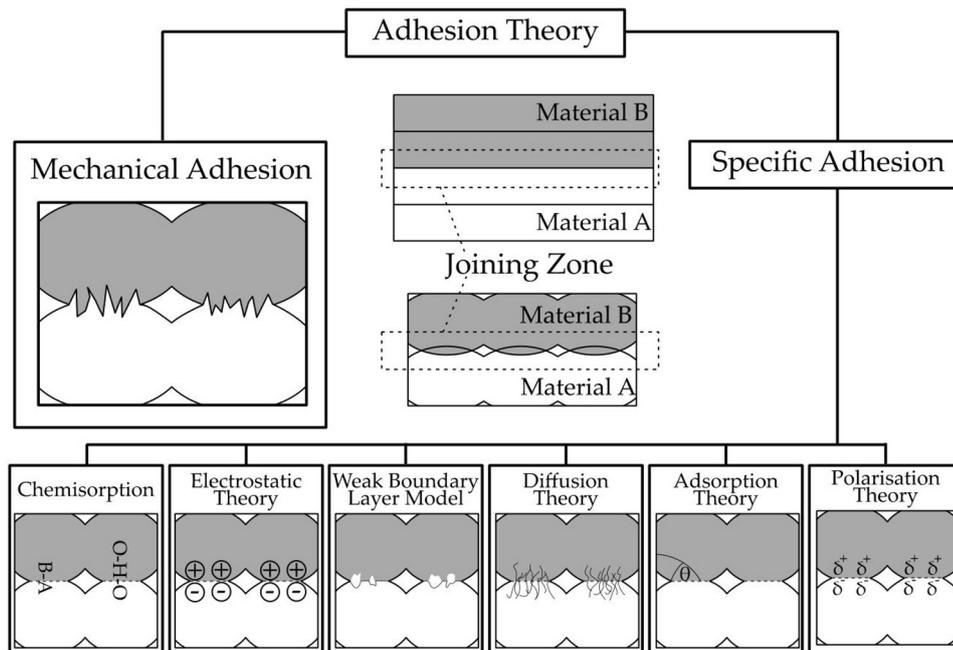


Abb. 2.24: Verbindungseffekte bei Polymerverbindungen [FWH19]

Eine zweckdienliche Einteilung ist jene aus dem Bereich der mechanischen Verbindungstechnik in Form-, Kraft- und Stoffschluss. Diese unterscheiden sich in der Art der Kraftübertragung zwischen den zwei Wirkpartnern.

- Bei **formschlüssigen Verbindungen** werden die Kräfte durch ineinander greifende Formen übertragen, die eine Verschiebung in Kraftrichtung verhindern. Dies gilt nur unter der Annahme ideal steifer Körper. Beispiele aus dem Bereich der klassischen Maschinenelemente sind Passfederverbindungen, Polygonwellen sowie Nietverbindungen.
- Im Fall einer **kraftschlüssigen Verbindung** werden Verschiebungen durch Kräfte und Momente durch eine aus einer aufgeprägten Normalkraft resultierenden Reibkraft verhindert. Schraubenverbindungen fallen beispielsweise in diese Kategorien.
- Beim **Stoffschluss** werden die Kräfte und Momente durch Adhäsion oder Kohäsion zwischen den Wirkpartnern übertragen. Klebe- und Schweißverbindungen

im Metall- und Kunststoffbereich sind Techniken, die dieser Kategorie zugeordnet werden.

Nach dem Stand der Technik können bis auf eine nachfolgend genannte Ausnahme alle Schnittstellen zwischen Bauplatte, Stützkonstruktion und Bauteil den stoffschlüssigen Verbindungen zugeordnet werden. Die Ausnahme stellt die perforierte Bauplattform der *M200-Serie* des Herstellers *Zortrax* dar. Der Druckbereich der Platte ist als Lochblech ausgeführt, sodass sich das Druckmaterial dieser ersten Schicht in die Löcher setzen und verhaken kann. Nach dem Abkühlen wird das Druckobjekt wie bei einem Steckbrett mechanisch von der Bauplatte gelöst. Dabei können einzelne Verbindungen brechen und in den Löchern der Platte verbleiben. Es ist denkbar, dass diese Überreste bei dem nachfolgenden Druckprozess wieder zu einer stoffschlüssigen Verbindung führen und maßgeblich zur Funktion des Systems beitragen. Weitere Systeme, die Kraft- oder Formschluss als primären Haftmechanismus einsetzen, sind nicht bekannt.

2.3.2 Thermoplaste ohne etabliertes Stützmaterial

Während für verbreitete Druckmaterialien wie PLA, ABS, PETG und im Allgemeinen amorphe Thermoplaste spezifische Lösungen für Stütz- und Bauplattenmaterialien existieren, so gibt es insbesondere im Bereich der teilkristallinen erheblichen Forschungsbedarf. Nachfolgend sind einige industriell relevante Polymere zusammengestellt, für die keine oder nur unpraktikable Lösungen existieren. Teilweise werden die grundsätzlich klebrigen Beschichtungen wie PVA als Haftmittel für eine Vielzahl von Kunststoffen beworben. Eigene Versuche haben allerdings gezeigt, dass die Haftkraft zwar für eine fehlerfrei abgelegte erste Lage ausreicht, sich das Bauteil aber bereits innerhalb weniger Lagen durch die thermische Schrumpfung von der Bauplatte löst. Kleine Objekte können aufgrund der insgesamt geringen Verformung auf diese Weise erfolgreich hergestellt werden. Mit zunehmender Größe versagen diese Haftvermittler allerdings. Da sich keine Kennzahl für die Haftfähigkeit verschiedener Materialkombinationen etabliert hat, bleibt dem Anwender oft nur der eigenständige Versuch.

- **Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP):** Für beide Kunststoffe existieren nur wenige Lösungen, die in der Lage sind, die Kräfte, die aus der starken Schrumpfung während der Abkühlung resultieren, aufzunehmen. Als Oberfläche der Bauplattform werden Folien oder Platten aus PP genannt. Alternative Materialien für die Stützkonstruktion sind nicht bekannt.

- **Polyamid (PA):** Hier ist das reine Polyamid 6, 6.6, 6.66 und 12 ohne die Beimischung von Fasern oder Mikroperlen zur Reduzierung des Ausdehnungskoeffizienten gemeint. Bekannt sind Phenolharzplatten und Polyamid-Folien. Ein zweites Material, das für die Stützkonstruktion geeignet ist, kann nicht recherchiert werden.
- **Polyoxymethylen (POM):** POM wird für mechanisch beanspruchte Bauteile wie Zahnräder, Pumpengehäuse oder Laufrollen eingesetzt. Einige wenige Filamente sind verfügbar, während der Einsatz und die Erfahrungswerte in der Additiven Fertigung im Umgang mit dem Material stark begrenzt scheinen. Der Thermoplast ist teilkristallin und sondert bei thermischer Zersetzung gasförmiges Formaldehyd ab. Verarbeitungshinweise und Informationen zum Einsatz der Stützstruktur sind ebenfalls nicht recherchierbar.
- **Hochleistungsthermoplaste (PEI, PSU, PPSU):** Eine Anforderung an das Stützmaterial von Hochleistungsthermoplasten ist die mechanische Stabilität unter den üblicherweise hohen Temperaturen von bis zu 200 °C, auf die Bauplattform und Bauraum aufgeheizt werden. *Stratasys* bietet für Filamente aus *Ultem 1010* und *Ultem 9085* von *Sabic* jeweils spezifische Stützmaterialien an, die nach Ende des Druckprozesses mechanisch entfernt werden müssen. Bei den offenen Materialsystemen existiert beispielsweise *ThermaX* von *3DXTech* als Stützmaterial für PEEK, PEKK, PEI und PPSU, bei dem eine Auflage aus PEI als Haftvermittler zur Bauplatte empfohlen wird. Als flüssig applizierbarer Haftvermittler wird *Magigoo für High Performance Filamente* beworben. Den Stützmaterialien ist gemein, dass sie durch die hohen thermischen Anforderungen sowie durch die Anhaftung am Druckobjekt zumindest teilweise ebenfalls aus Hochleistungsthermoplasten hergestellt werden. Damit sind die Kosten für eine Struktur, die nach dem Druckprozess entsorgt wird, vergleichsweise hoch. Bei dem genannten Stützmaterial *ThermaX* liegt der Preis zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Untersuchung bei ca. 200 € pro Kilogramm Filament.

Die hier genannten amorphen und teilkristallinen Thermoplaste stellen eine Auswahl dar, welche das technische und wirtschaftliche Optimierungspotenzial für Stützstrukturen aufzeigt. Aufgrund irreführender Werbeversprechen und deren häufig begrenzt gültigen Aussagen ist eine umfassende Analyse aller wirksamen Optionen an Stützmaterialien, Bauplatten und Haftvermittlern an dieser Stelle kaum möglich.

2.4 Thermisch induzierter Bauteilverzug

2.4.1 Voraussetzungen

Bauteilverzug während des Druckprozesses ist ein bekannter und umfänglich dokumentierter Effekt, der durch die zeitlich verzögerte und ungleichmäßige Abkühlung des Bauteils hervorgerufen wird. Die Betrachtung dieses Effektes ist für die Auslegung der Stützkonstruktion von grundlegender Bedeutung, da diese in vielen Fällen helfen kann, die Verformungen einzuschränken. Nachfolgend werden der Mechanismus sowie die Auswirkungen auf den Druckprozess dargestellt. Aktuelle Untersuchungen, die unterschiedliche Abhilfemaßnahmen beschreiben, werden ebenfalls den Abschnitt abschließend vorgestellt.

2.4.2 Mechanismus

[WXJ07] stellen eine ausführliche Untersuchung des Bauteilverzugs vor, welche den Effekt sowie signifikante Einflussgrößen auf die Stärke des Verzugs beschreibt. Die Analyse ist auf den nachfolgenden drei Hypothesen und Vereinfachungen aufgebaut.

- Das heiße extrudierte Material wird mit der Schmelzetemperatur T_M extrudiert, abgelegt und verbindet sich mit der zuvor abgelegten Schicht. Bei der Abkühlung von T_M auf die Glasatemperatur T_G erfährt die abgelegte Bahn eine Kontraktion ohne verbleibende Spannungen, da der Thermoplast diese im beschriebenen Temperaturbereich nicht aufbauen und halten kann. Die Spannungen werden durch Deformationen der abgelegten Bahnen unmittelbar abgebaut. Bei der Abkühlung von T_G auf die Bauraumtemperatur T_C (*engl. Chamber Temperatur*) kann das Material die aus der Schrumpfung resultierenden Spannungen aufgrund der beschränkten Fließfähigkeit nicht abbauen. Damit verbleiben in jeder Schicht Spannungen, deren Gesamtwirkung mit jeder weiteren Lage sukzessive zunimmt.
- Bei einem Versuch von [WXJ07] mit typischen Randbedingungen für die Verwendung von ABS als Baumaterial liegt das Zeitintervall der Abkühlung von T_M auf T_G bei ca. 0,55 s und die Abkühlung von T_G auf T_C bei ca. 1,20 s. Dies ist i. d. R. um ein Vielfaches kürzer als die übliche Dauer für den vollständigen Druck einer Schicht des Bauteils. Es wird daher angenommen, dass an den meisten Positionen der letzten Schicht bereits vor dem erneuten Überfahren des Druckkopfes eine Abkühlung auf eine geringere Temperatur als T_G erfolgt

ist. Durch die Ablage der nächsten aufgeschmolzenen Schicht wird auch die vorherige erwärmt. Allerdings lässt dieser Einfluss mit zunehmendem Abstand zur Schicht, die zum jeweiligen Zeitpunkt gefertigt wird, nach. Es wird daher weiterhin angenommen, dass die Temperatur bereits gefertigter Schichten sich innerhalb weniger Lagen der Bauraumtemperatur bzw. der der Bauplatte annähert.

- Der sichtbare Bauteilverzug ist der Abbau der internen Spannungen des Bauteils, die sich durch die Summe der abgekühlten Bahnen ergeben. Die konkreten Auswirkungen sind abhängig von der jeweiligen Geometrie und den Randbedingungen beispielsweise im Zusammenspiel mit der Bauplatte. Überschreitet die Summe der Spannungen die Stärke der Haftung, so löst sich das Bauteil von der Bauplatte. Andernfalls verbleiben diese Spannungen zumindest bis zur Ablösung von der Druckplatte und der Stützstruktur im Bauteil.

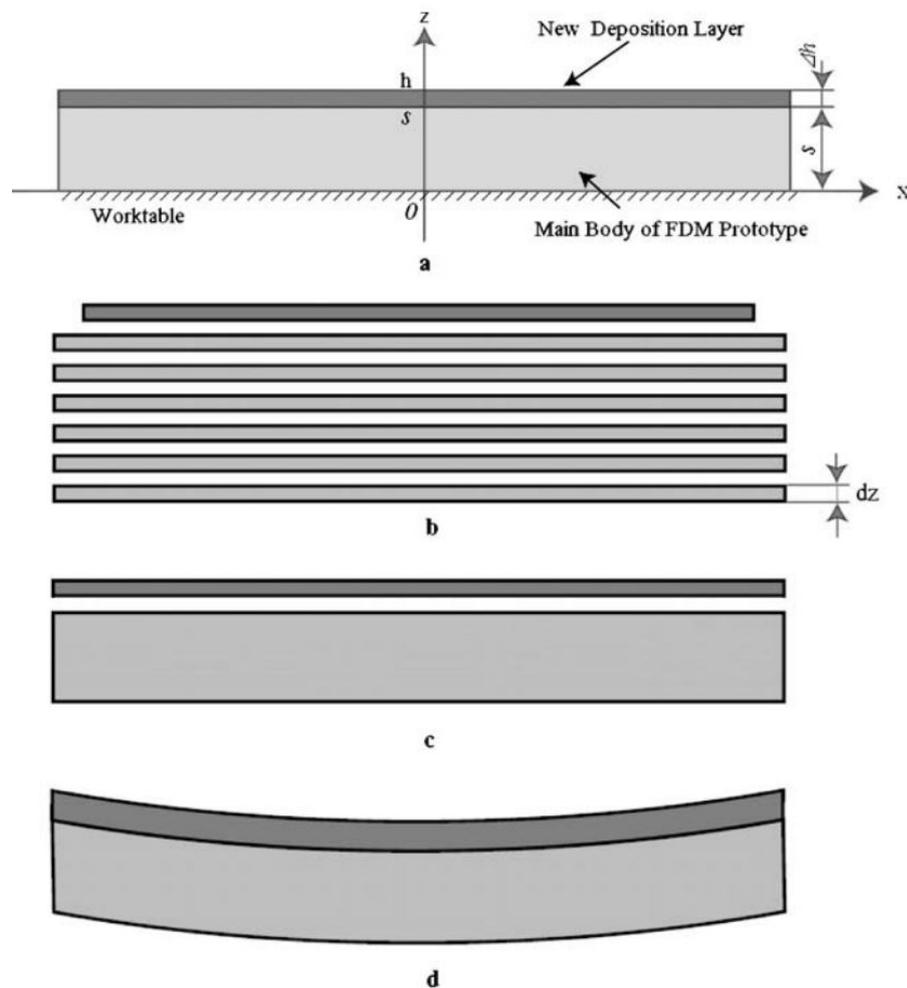
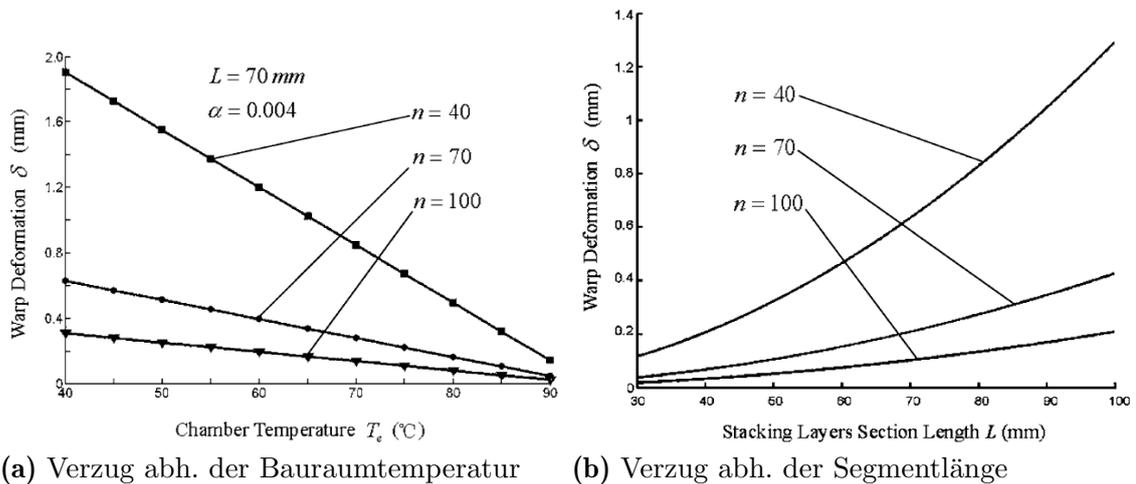


Abb. 2.25: Mechanismus des Bauteilverzugs [WXJ07]

Abbildung 2.25 zeigt die Modellvorstellung, die hinter dem von [WXJ07] entwickelten mathematischen Modell zur Berechnung des Verzugs steht. Bereich a zeigt den

Aufbau, wobei der helle Bereich des vereinfachten zweidimensionalen Bauteils die bereits abgelegten Schichten darstellt und der dunklere die betrachtete letzte Bahn. Diese Lage wird von den anderen losgelöst betrachtet und schrumpft in Schritt *b* durch die Abkühlung zunächst unbeeinflusst auf die Länge, welche durch den linearen Schrumpfungskoeffizienten α des Materials definiert wird. Beim realen Bauteil sind die Lagen in dieser vereinfachten Betrachtung ideal miteinander verbunden. Daher wird die Lage in Schritt *c* unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls und den daraus entstehenden Spannungen wieder auf die Ursprungslänge gedehnt. In Schritt *d* wird die Lage mit den restlichen verbunden und die Gleichgewichtsbedingung der Spannungen unter Verformung des Bauteils hergestellt. Unter realen Bedingungen steht dem Wölben des Bauteils die Anhaftung an der Bauplatte entgegen. Solange sich das Bauteil nicht von dieser zu lösen beginnt, können i. d. R. kritische Zustände wie das vollständige Ablösen verhindert werden.



(a) Verzug abh. der Bauraumtemperatur (b) Verzug abh. der Segmentlänge

Abb. 2.26: Einfluss von Prozessparametern auf Bauteilverzug [WXJ07]

Die Untersuchung stellt Abhängigkeiten des Bauteilverzugs u. a. von der Bauraumtemperatur, der Ablagestrategie der Bahnen, der Anzahl der Lagen und dem linearen Schrumpfungskoeffizienten fest. Abbildung 2.26 zeigt den Einfluss der Bauraumtemperatur. Durch ihre Steigerung bis zur Glastemperatur T_G kann der Verzug während des Druckprozesses auf ein Minimum reduziert werden. Dies entspricht der zuvor getroffenen Annahme, dass oberhalb von T_G keine Spannungen im Bauteil aufgebaut werden. Ebenfalls signifikant ist die Länge L der abgelegten Segmente, die eine kontinuierliche und ohne Unterbrechung abgelegte Bahn beschreibt. Je länger ein solches Segment ist, desto größer ist der zu erwartende Verzug. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls unmittelbar nachvollziehbar, da sich die jeweiligen Spannungen über die Länge des Segments addieren. Entlastende Verformung müssen mit steigender Länge zunehmend größer ausfallen, um einen Gleichgewichtszustand herzustellen. Die dargestellten Diagramme bilden den Zusammenhang zwischen der Anzahl der ab-

gelegten Schichten n und dem Verzug ab. Dieser zeigt mit zunehmender Anzahl n eine abnehmende Effektstärke. Scheint dies zunächst eigenen Beobachtungen zu widersprechen, so muss berücksichtigt werden, dass hier insbesondere eine starke Vereinfachung bzgl. der Geometrie der bereits abgelegten Bahnen vorliegt. Die häufig beobachtete Aufbringung einer Bahn auf einen bereits von Verzug betroffenen Bereich kann eine verstärkende Wirkung haben, die in dem beschriebenen Modell nicht berücksichtigt wird.

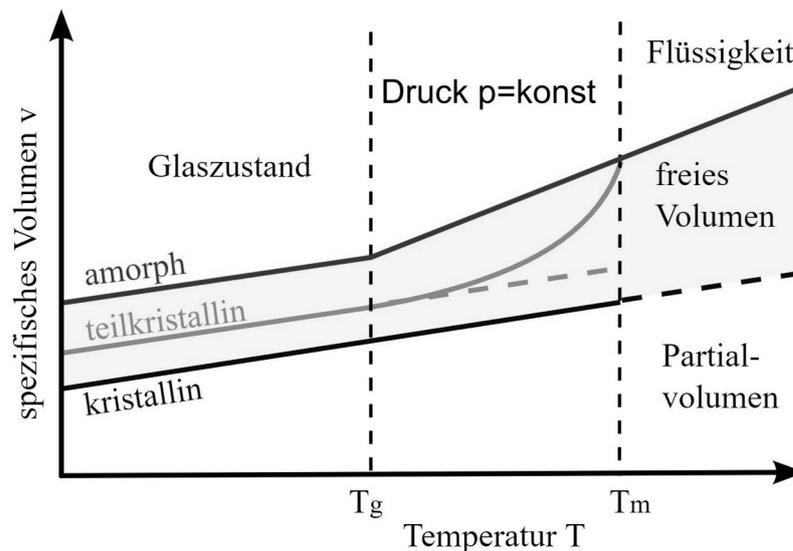


Abb. 2.27: Thermische Volumenänderung von teilkristallinen und amorphen Thermoplasten [JM14]

Gegenüber amorphen Thermoplasten stellt sich der Schrumpfungsmechanismus bei teilkristallinen noch komplexer dar. Zusätzlich zur näherungsweise linearen Schrumpfung der amorphen Kunststoffe existieren bei den teilkristallinen eine oder mehrere Kristallisationsphasen, welche innerhalb eines kleinen Temperaturintervalls zu erheblichen Volumenänderungen führen können (vgl. Abbildung 2.27). Neben der grundsätzlich starken Schrumpfung führt diese Eigenschaft bereits bei leicht inhomogener Temperaturverteilung im Bauteil zu verstärktem Verzug. Dabei sind diverse geometrische Abweichungen zu erwarten, die sich nicht nur auf das häufig beobachtete Hochwölben der Außenkanten des Bauteils beschränken. Eine sichere Verbindung mit der Bauplatte ist daher gerade bei teilkristallinen Thermoplasten entscheidend.

[ZC08] haben eine thermisch-mechanische Simulation der abgelegten Bahnen im FLM-Prozesses erstellt und mit Hilfsmitteln der statischen Versuchsplanung ausgewertet, welche Faktoren signifikanten Einfluss auf den Verzug des Bauteils haben. In der Simulation wird ein flacher Quader schrittweise aus dem Thermoplast ABS aufgebaut, indem Schmelze hinzugefügt und die entstehenden Spannungen und Verformungen berechnet werden. Die Auswertung zeigt, dass diese mit steigender

Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfes und der damit verbundenen schnelleren Materialaufbringung deutlich zunehmen. Als zweitstärkste Einflussgröße wird die Lagendicke identifiziert, die mit zunehmenden Werten ebenfalls eine verstärkende Wirkung auf den Aufbau von Spannungen im Bauteil zeigt. Obwohl für die Lagenbreite selbst kein signifikanter Einfluss auf die Spannungen festgestellt wird, besteht eine Wechselwirkung mit der Lagendicke. Schwächere Wechselwirkungen höherer Ordnung konnten ebenfalls festgestellt werden.

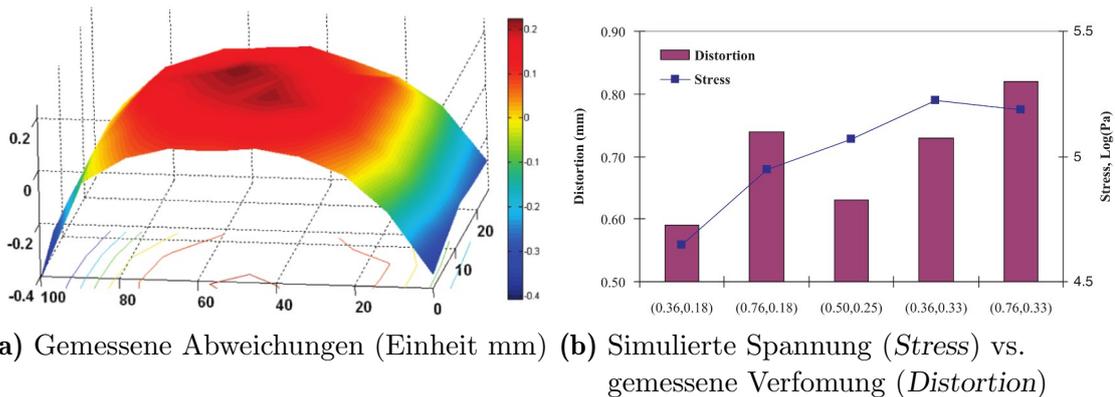


Abb. 2.28: Vergleich der simulierten Spannungen mit experimentellen Ergebnissen [ZC08]

Abbildung 2.28a zeigt die gemessene Verformung einer gefertigten Flachprobe. Das Bauteil wurde hierzu mit der Unterseite nach oben durch eine Koordinatenmessmaschine abgetastet. Insgesamt bestätigt die Simulation den direkten Zusammenhang zwischen den entstehenden Spannungen und Verformungen. Weiterhin zeigen die simulierten Spannungen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Verformungen der Proben (vgl. Abbildung 2.28b).

2.4.3 Auswirkungen auf Druckprozess und -objekt

Bauteilverzug im Druckprozess kann sich in verschiedenen Ausprägungen äußern, von denen das Hochwölben der ersten Bauteilschichten die häufigste ist. Abbildung 2.29 zeigt den Effekt bei einem Druckteil aus Polypropylen von *Ultimaker* auf einer Bauplattform aus Glas. Der eingesetzte Haftvermittler *Magigoo PP* baut unter den gewählten Prozessbedingungen keine ausreichende Haftung auf, um der Verformung durch Spannungen im Kunststoff entgegenzuwirken.

[NRA17] haben die unterschiedlichen Effekte durch Bauteilverzug untersucht und die vier Kategorien Kissenverzerrung (*Pincushio*), Trapezverzerrung (*Trapezoid*), Wölbung (*Curling*) und Blockierte Schrumpfung (*Blocked Shrinkage*) definiert (vgl. Abbildung 2.30). Die Messungen werden für PLA und ABS durchgeführt, wobei ABS mit beheizter Bauplattform die geringsten Abweichungen zeigt. Mit über 70 % Anteil



Abb. 2.29: Verzug eines Bauteils aus Polypropylene durch Eigenspannungen

am gesamten Fehler leistet die Kategorie Blockierte Schrumpfung den mit Abstand größten Beitrag zur geometrischen Abweichung. Diese beschreibt die Abweichung zwischen Ist- und Sollgeometrie durch die unterschiedliche thermische Schrumpfung von Bauplatte und Druckobjekt. An der Kontaktfläche entstehen dabei Spannungen, welche je nach Geometrie unterschiedliche Auswirkungen auf die Verformung haben. Für die Untersuchung wird ein Druckobjekt (vgl. Abbildung 2.31) gefertigt, das die Vermessung mit dem eingesetzten Laserscanner ermöglicht.

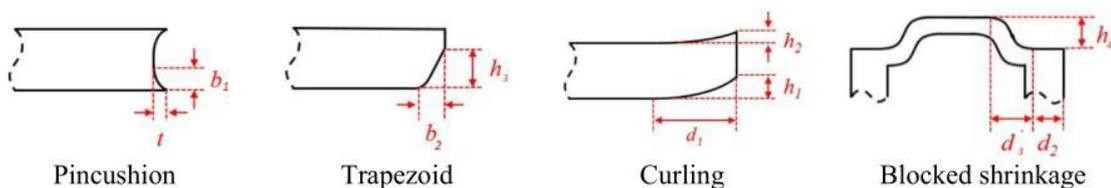


Abb. 2.30: Geometrische Fehler durch thermische Schrumpfung [NRA17]

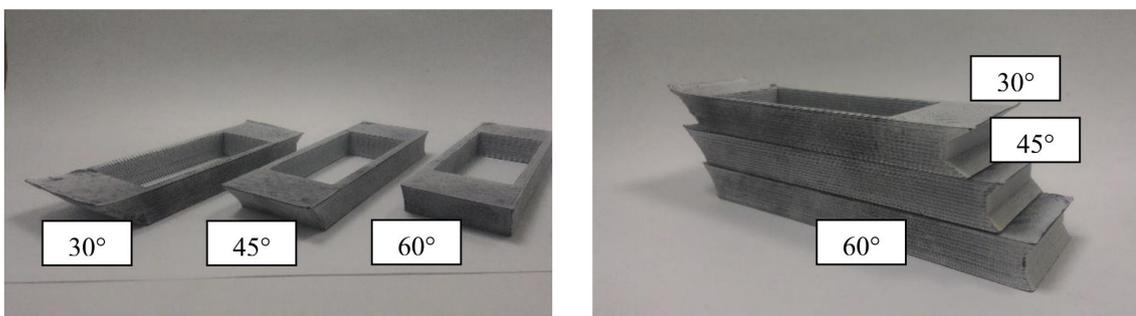


Abb. 2.31: Probengeometrie mit unterschiedlichen Überhangwinkeln zur Erfassung thermischer Verformung [NRA17]

Ein weiteres Phänomen, das bei Druckern ohne beheizten Bauraum bei der Verwendung von beispielsweise ABS beobachtet werden kann, ist die Separation von Lagen während des Druckprozesses. Die Spannungen im Bauteil übersteigen in diesem

Fall die Stärke der Verbindung zwischen den Schichten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die zu geringe Temperatur im Bauraum sowohl zu einer starken Schrumpfung als auch zu einer schwach ausgeprägten Verschweißung der Schichten führt.

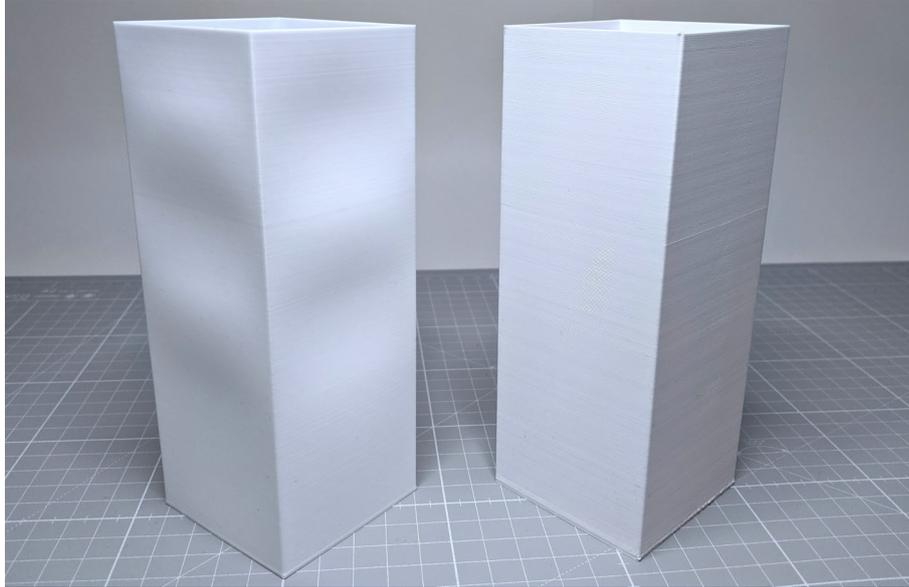


Abb. 2.32: Bauteilverzug bei dünnwandigen Bauteilen (links PETG, rechts PLA)

Überhängende Strukturen sind ebenfalls häufig von Verzug betroffen, da sie mechanisch weniger steif sind und schneller abkühlen als ein Bereich mit einem größeren Verhältnis von Masse zu Oberfläche. Starke Auswirkungen zeigen sich überdies auch bei dünnwandigen Konturen, die teilweise nur eine Bahn breit sein können. Unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten und die leichte Verformbarkeit solcher Geometrien führen zum Ausbeulen, besonders wenn keine Gegenmaßnahmen wie die aus der Blechumformung bekannten Sicken vorgesehen werden. Abbildung 2.32 zeigt ein dünnwandiges rohrartiges Bauteil. Während das linke Teil aus PLA gedruckt ist und nur geringe Abweichungen von der Sollgeometrie aufweist, besitzt das rechte aus PETG gedruckte starke Ausbeulungen.

Geometrische Abweichungen zwischen digitalem und gedrucktem Modell, die zu keinem kritischen Abbruch des Druckprozesses führen, sind stets vorhanden. Je nach Anwendungsfall muss entschieden werden, ob das Teil damit innerhalb der akzeptablen Toleranz liegt oder Abhilfemaßnahmen möglich sind.

2.4.4 Abhilfemaßnahmen

Materialwahl und Ablegerichtung

Wie die Untersuchung von [WXJ07] zeigt (vgl. Abschnitt 2.4.2), ist der Wärmeausdehnungskoeffizient die treibende Eigenschaft für den Verzug des gedruckten Bauteils. Thermoplaste mit geringerem Ausdehnungskoeffizienten erfahren die Auswirkungen daher in gleichem Maße weniger stark. Hinsichtlich dieser Eigenschaft ist der Einsatz im FLM-Verfahren daher mit weniger Komplikationen verbunden.

[ZWS17] beschreiben eine Untersuchung über die verbleibenden Spannungen im Druckobjekt bei reinem ABS und mit Kohlenstoff gemischtem. Für die Untersuchung werden quaderförmige Proben unter üblichen Bedingungen für die Fertigung mit ABS hergestellt (Lagenbreite 0,4 mm, Lagendicke 0,24 mm, Extrusionstemperatur 230 °C, Temperatur der Bauplattform 110 °C). Hierbei werden das Ablegemuster (vgl. Abbildung 2.33) und die Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfes variiert. Diese Versuchsreihe wird für reines ABS, ABS mit 8 % Masseanteil an Nanoröhrchen aus Kohlenstoff und ABS mit 15 % Masseanteil an Kurzfasern aus Kohlenstoff durchgeführt. Im nächsten Schritt werden die Proben in einem Ofen bei 180 °C für eine Stunde gelagert, um die Deformation durch im Material verbleibende Spannungen zu ermöglichen.

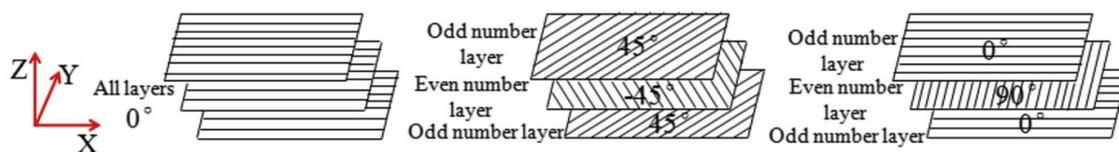


Abb. 2.33: Ablegemuster für Druckobjekte zur Erfassung der Auswirkung auf Spannungen im Druckobjekt [ZWS17]

Die Veränderungen der Proben für reines und mit Kurzfasern gemischtes ABS sind in Abbildung 2.34 gegenübergestellt. Alle Proben erfahren eine ausgeprägte Schrumpfung in Richtung der längsten Dimension, wobei die beiden Faktoren Ablegemuster und Vorschubgeschwindigkeit signifikante Auswirkungen haben. Mit höherer Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfes nimmt die Schrumpfung zu. Noch deutlich stärker ist der Einfluss des Ablegemusters. Werden alle Bahnen entlang der längsten Dimension der Probe abgelegt, so ergibt sich eine Schrumpfung von bis zu 47,3 % gegenüber der Ausgangsprobe. Gleichzeitig nimmt die Dicke um 45,38 % und die Breite um 32,76 % zu. Das diagonale Muster schneidet mit einem maximalen Wert von 13,51 % mit der geringsten Schrumpfung ab, während die abwechselnd längs und quer abgelegten Bahnen mit 21,64 % zwischen den Extremwerten liegen.

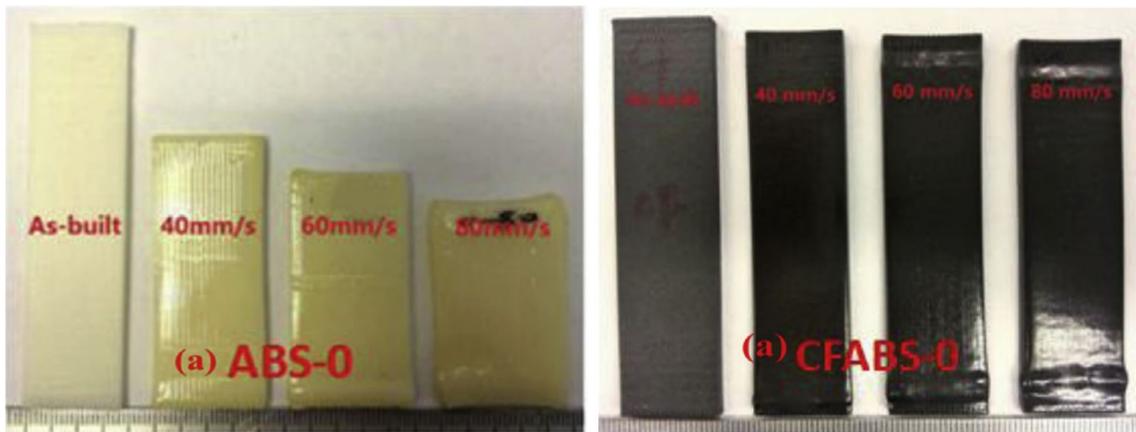


Abb. 2.34: Schrumpfung von Materialproben aus reinem (links) und mit Kohlenstoff versetztem ABS (rechts) unter Wärmeeinfluss [ZWS17]

Die Aussagen aus den Versuchen mit reinem ABS behalten auch bei den Proben mit Kurzfasern aus Kohlenstoff ihre Gültigkeit, allerdings sind alle Verformungen um ein Vielfaches geringer. Die maximale Schrumpfung von 7,27 % liegt folglich auch hier bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit und längs ausgerichteten Bahnen vor. Die Beimischung von Nanoröhrchen erzielt eine maximale Schrumpfung von 9,54 % und ist damit weniger wirksam als die Kurzfasern. Die Ergebnisse der Untersuchung beziehen sich zwar nicht unmittelbar auf den Verzug während des Druckprozesses, geben aber entscheidende Hinweise auf Abhilfemaßnahmen. Zusammengefasst zeigt sich, dass zur Reduzierung von Verzug eine geringe Vorschubgeschwindigkeit sowie ein alternierendes Ablegemuster, welches eine kürzere Segmentlänge und eine homogenere Spannungsverteilung bewirkt, vorteilhaft ist. Der Einsatz von zusätzlichen Füllstoffen wie Kohlenstoff in Form von Kurzfasern oder Nanoröhrchen stellt eine sehr wirksame Option dar, falls die abweichenden Materialeigenschaften für den Anwendungsfall akzeptabel sind.

[SSW17] setzen expandiertes Perlit als Füllstoff mit einem Volumenanteil von bis zu 30 % am hergestellten Filament auf Polypropylenbasis ein. Die Reduzierung des Bauteilverzuges um 34 % bestätigt die Ergebnisse der zuvor vorgestellten Untersuchung und zeigt die Wirksamkeit des Vorgehens. Die Verfasser betonen außerdem die Diskrepanz zwischen den im FLM-Verfahren überwiegend verwendeten amorphen Kunststoffen wie ABS und den insgesamt in allen Verfahren verarbeiteten Thermoplasten. Polyolefine stellen insgesamt die größte Gruppe dar, sind allerdings in der additiven Fertigung und Forschung unterrepräsentiert. Dies wird primär auf die Problemstellung des verstärkten Verzugs der teilkristallinen gegenüber den amorphen Thermoplasten zurückgeführt.

[FWR18] haben die Entstehung des Bauteilverzugs bei Polyphenylensulfid (PPS) und Polypropylen (PP) zunächst simuliert und anschließend durch gedruckte Probe-

körper validiert. Das verwendete PPS besitzt einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $50,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, während der des PP mit $150 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ nahezu dreimal so groß ist. Die Simulation liefert hierzu eine nahezu um den gleichen Faktor erhöhte Verformung, welche sich in den gedruckten Proben widerspiegelt. Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung ist der starke Einfluss des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials, während die thermische Leitfähigkeit, Wärmekapazität und der Elastizitätsmodul keinen signifikanten Einfluss haben. Eine Simulation mit einem reduzierten Wärmeausdehnungskoeffizienten von $31,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, welcher in der Untersuchung durch ein Polyethylen (PE) mit dem anorganischen Füllstoff Aluminiumnitrid repräsentiert wird, zeigt eine weitere Reduzierung der Verformung.

Segmentierung des Bauteils – Bricking

[GED15] stellen eine Methode zur Reduzierung von Verformungen durch thermische Schrumpfung vor, bei der das Bauteil in quaderförmige Segmente unterteilt wird. Diese können relativ losgelöst voneinander schrumpfen, da sie in der horizontalen Ebene nicht miteinander verbunden sind und damit keine Spannungen über die gesamte Länge des Bauteils aufbauen können (vgl. Abbildung 2.35). Um eine mechanisch belastbare Verbindung der Segmente zu erreichen, werden die Blöcke alternierend verschoben, sodass der Mittelpunkt eines Blocks immer auf dem Kreuzungspunkt der Blöcke der vorherigen Schicht liegt (vgl. Abbildung 2.35). Mit diesem als *Bricking* bezeichneten Ansatz reduziert sich der Verzug der aus ABS gefertigten Probekörper von 35 % auf bis zu 9 %. Eine Definition dieser Kennzahl wird nicht gegeben. Für die Untersuchung werden Segmente mit rechteckiger und hexagonaler Grundform untersucht. Die letztgenannte Form erreicht geringere Verformungen und ist damit vorteilhafter. Weiterhin zeigen die Versuche, dass die geometrischen Abweichungen proportional zur Länge der Segmente sind.

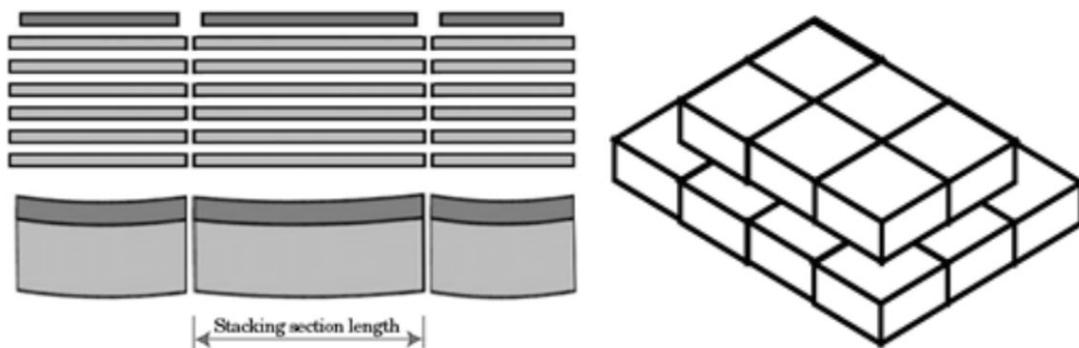


Abb. 2.35: Ansatz des sog. Brickings zur Reduzierung des Bauteilverzugs [GED15]

Die Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen mit einem solchen Aufbau werden nicht untersucht. Es wird aber davon ausgegangen, dass insbesondere die me-

chanischen Eigenschaften schlechter ausfallen als bei solchen, die kein *Bricking* verwenden. Die Autoren sehen weiteres Optimierungspotenzial in der Versiegelung der Spalten, die zwischen den Segmenten entstehen.

Steigerung der Haftung auf der Bauplatte

Die zuvor beschriebenen Abhilfemaßnahmen wirken der Entstehung von Spannungen im Druckobjekt entgegen und versuchen damit, deren Ursache abzuschwächen. Um hingegen die Auswirkungen der Spannungen zu reduzieren und so beispielsweise ein Ablösen des Bauteils während des Druckprozesses zu verhindern, kann die Haftung der ersten Lage an der Bauplatte gesteigert werden. Verschiedene Lösungen und Materialkombinationen sind in Abschnitt 2.3 zu finden.

[Sin18] prüft und bewertet verschiedene Lösungen zur Steigerung der Haftung von ABS auf der Bauplatte. ABS geht mit einer Folie aus Polyimid, die auf der Bauplatte mit einem temperaturfesten Silikonkleber befestigt wird, bei ca. 80 °C bis 130 °C eine starke Haftung ein. Die Folie kann bei entsprechender Reinigung für mehrere Druckvorgänge verwendet werden und wird anschließend durch eine neue ersetzt. Ebenfalls konnte die für ABS häufig eingesetzte Beschichtung der Bauplatte mit einer Lösung aus ABS und Aceton positiv getestet werden. Die manuell aufgebrachte Schicht muss nach jedem Druckvorgang erneuert werden und kann aufgrund der entstehenden Dämpfe in einer schlecht belüfteten Umgebung gesundheitlich bedenklich sein. Als optimale Lösung sieht der Autor eine Beschichtung der Bauplatte mit PVA an. In den Versuchen konnte bei Temperaturen von über 90 °C eine ausgeprägte Haftung beobachtet werden, die bei fallenden Temperaturen nachlässt und ein einfaches Ablösen des Bauteils ermöglicht. Die Schicht muss durchschnittlich alle vier Druckvorgänge erneuert werden, besitzt aber keine schädlichen Ausgasungen.

2.5 Softwaretechnische Stützstrukturgenerierung

2.5.1 Voraussetzungen

Dieser Abschnitt behandelt die Stützstrukturgenerierung im *Slicer*. Auch hier wird die Vorgehensweise anhand von *Cura* in der Version 4.6.1 dargestellt, wobei sich der Aufbau der Stützkonstruktion zwischen den *Slicern* stark ähnelt. Grundsätzlich kann zwischen automatisch und manuell bzw. halbautomatisch generierten Stützstrukturen unterschieden werden.

2.5.2 Automatische Generierung

Allgemein

Den größten Einfluss auf die Platzierung einer Stützstruktur hat der maximale Überhangwinkel der Bauteilkontur, ab oder unterhalb dem die Stützstruktur generiert wird. Ein häufig verwendeter Standard sind 45° . Alle Flächen mit einem Winkel zwischen horizontaler Ausrichtung (90°) bis 45° werden abgestützt, alle zwischen diesem Winkel und vertikalen Flächen (0°) werden ohne gefertigt. Dabei wird unterschieden, ob alle Stützstrukturen generiert werden sollen oder nur solche, welche die Bauplattform berühren und nicht auf einer der Oberseiten des Druckobjektes beginnen.

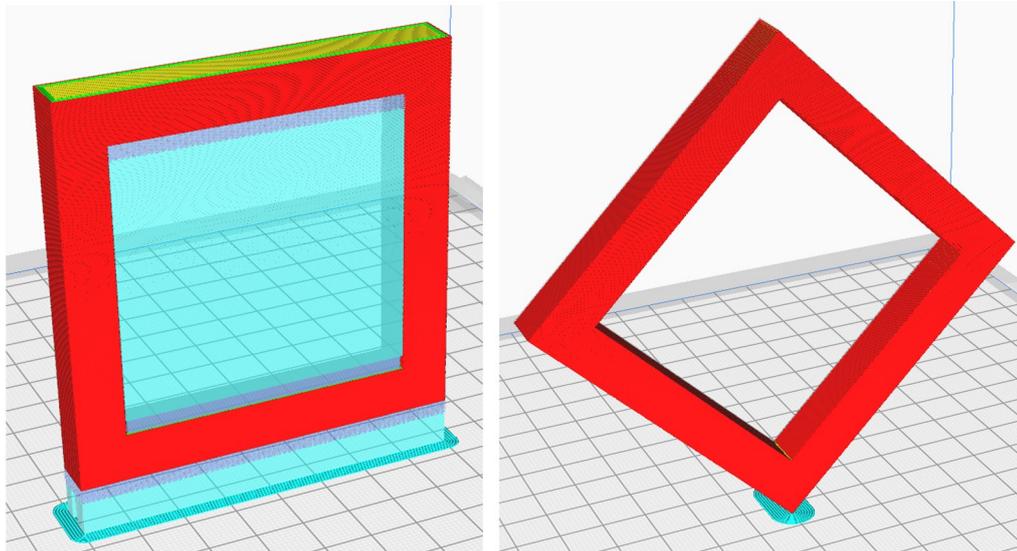


Abb. 2.36: Automatisch generierte Stützstruktur bei zwei Orientierungen (*links* stabil mit viel Stützkonstr., *rechts* instabil ohne Stützkonstr.)

Vor der Generierung der Stützstruktur wird das zu druckende digitale Modell durch den Nutzer im Bauraum positioniert und orientiert. *Cura* besitzt die Möglichkeit, eine automatische Orientierung nach dem Optimierungskriterium der kleinsten abzustützenden Fläche durchzuführen. Dieses Werkzeug stellt nach eigener Erfahrung allerdings keine umfassende Lösung dar, weil die Optimierung nach diesem Kriterium entscheidende Randbedingungen außer Acht lässt (vgl. Abschnitt 2.5.2). Eine manuelle Korrektur durch den Nutzer kann erforderlich werden, um beispielsweise eine ausreichend große Aufstandsfläche zu gewährleisten (vgl. Abbildung 2.36 *rechts*). Abhängig von der gewählten Konfiguration generiert der Slicer im anschließenden Schritt die Bahnen für das Druckobjekt. Nachfolgend sind einige der vielfältigen Einstellmöglichkeiten und Regeln der Ablegestrategie aufgelistet.

- Ablegemuster der Stützstruktur bspw. konzentrisch oder geradlinig gefüllt

- Abstand zwischen Stützstruktur und Bauteil in vert. und horiz. Richtung
- Druckgeschwindigkeit jedes Abschnittes der Stützstruktur
- Konturabhängige Kühlstrategien durch Zusatzlüftung
- Dichte und Breite der abgelegten Bahnen
- Rotation des Ablegemusters bei aufeinanderfolgenden Schichten

Im Folgenden werden die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Generierung der Stützstruktur vorgestellt. Diese verfolgen verschiedene Entwicklungsziele, wobei die Reduzierung der eingesetzten Materialmenge durch topologische Optimierung und die automatisierte Orientierung des Bauteils unter Zielkriterien ausgeprägte Forschungsschwerpunkte sind. Die nachfolgenden Veröffentlichungen besitzen durchweg eine hohe mathematische sowie softwaretechnische Komplexität, der hier nicht Rechnung getragen werden kann. Stattdessen werden die praktischen Ergebnisse in einem für das Verständnis erforderlichen Umfang zusammengefasst.

Reduzierung der Stützstruktur

Zur Reduzierung der Stützstruktur bzw. zur Generierung einer vorteilhaften Ausprägung dieser existieren grundlegend verschiedene Ansätze. So untersuchen [JSX18] die Abhängigkeit zwischen den Faktoren Druckgeschwindigkeit, Düsentemperatur sowie zusätzlicher Kühlung und dem maximalen Überhangwinkel, der keine Stützstruktur erfordert. Die Untersuchung zeigt, dass eine geringe Düsentemperatur sowie Druckgeschwindigkeit und starke Kühlung positive Auswirkungen haben. Gleichzeitig merken die Autoren an, dass derartige Einstellungen einen negativen Einfluss auf die Verbindung der Lagen haben können, da die thermische Energie für den Fügeprozess reduziert wird. Unabhängig von den nachfolgend vorgestellten Varianten an Stützkonstruktionen können durch eine günstige Einstellung dieser Prozessparameter Stützmaterial und Fertigungszeit eingespart werden.

[CCR17] beschreiben eine softwaretechnische Lösung, um lokale Stützstrukturen zu generieren, die nicht von der Bauplattform ausgehen, sondern an der umliegenden Geometrie beginnen. Dabei wird der maximale Überhangwinkel berücksichtigt, sodass keine Absackungen der Stützstruktur entstehen. Abbildung 2.37 zeigt die entstehende Struktur im Vergleich zu klassischen Ansätzen. Durch das Vorgehen lassen sich je nach Geometrie Einsparungen von Stützmaterial und Fertigungszeit erreichen. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Anbindung der Stützstruktur an das Bauteil eine weitere nachteilige Kontaktfläche voraussetzt.

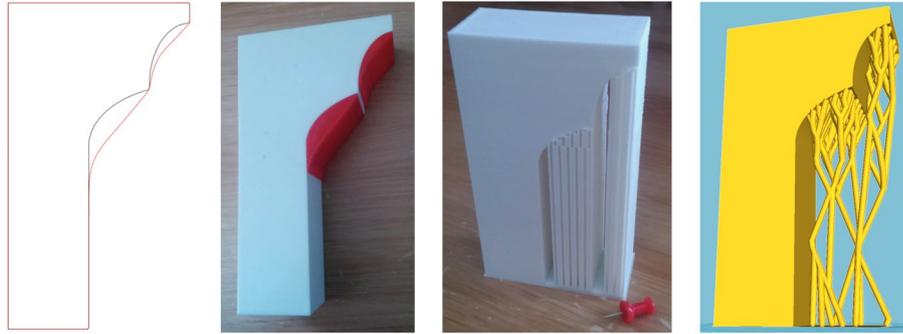


Abb. 2.37: Effektive Stützstrukturgenerierung: von links nach rechts 1. Ursprungsgeometrie, 2. Optimierte Stützstruktur, 3. Klassische Stützstruktur, 4. Baumartige Stützstruktur [CCR17]

[HYW09] stellt einen Algorithmus vor, der eine Einschnürung der Stützstruktur zwischen den Schnittstellen zu Bauplattform und Bauteil generiert. In Versuchen wird mit diesem Verfahren gegenüber der konventionellen Stützstruktur eine Materialeinsparung von ungefähr 28,9% erreicht. Eine vergleichbare Generierung der Stützstruktur führt [Woh12] mit der Version 4.1 des proprietären *Slicers Catalyst EX* ein. Der *SMART Support* bewirkt eine Einsparung der Druckzeit von durchschnittlich 14% sowie eine Materialeinsparung von bis zu 40%.

Das Potenzial baumartiger Stützstrukturen liegt grundsätzlich in der materialsparenden Verbindung zwischen der Schnittstelle am Bauteil und der am Druckbett. Während klassische Ansätze den gesamten Raum dazwischen mit der gitterartigen Stützstruktur-Füllung abdecken, können die feinen Äste erst kurz vor der Berührung mit dem Bauteil zu einer höheren Dichte auffächern. Andererseits erreichen klassische Strukturen eine bessere Fixierung des Teils auf Kosten eines erhöhten Materialeinsatzes. Mit *AutoDesk Meshmixer* wurde 2009 eine kostenlose Software veröffentlicht, welche hilfreiche Funktionen zur Vorbereitung und Manipulation von Modellen besitzt. Mit *Meshmixer* wird die von [SU14] als materialsparende Variante vorgestellte baumartige Stützstruktur einem breiten Anwenderspektrum zur Verfügung gestellt. Viele der nachfolgenden Veröffentlichungen messen sich am Algorithmus von *Meshmixer*.

[ZLR19] entwickeln einen automatisierten Algorithmus zur Generierung einer baumartigen Stützstruktur. Diese unterscheidet sich von vergleichbaren Ansätzen durch den Einsatz eines vertikalen Stammes, um eine höhere Stabilität zu erzielen. Abbildung 2.38 zeigt den Aufbau im digitalen Modell für eine biologisch sowie eine technisch inspirierte Geometrie. Die Struktur wird in einer Versuchsreihe gefertigt und zeigt abhängig vom Modell zeitliche Einsparungen von bis zu 22,35% sowie bis zu 17,95% an Stützmaterial gegenüber *Meshmixer* und *Cura*. Allerdings ist bei einigen Model-

len ein zeitlicher Mehraufwand von $-2,68\%$ entstanden. Insgesamt zeigen die Einsparungen eine hohe Varianz in Abhängigkeit von der Geometrie des Modells.

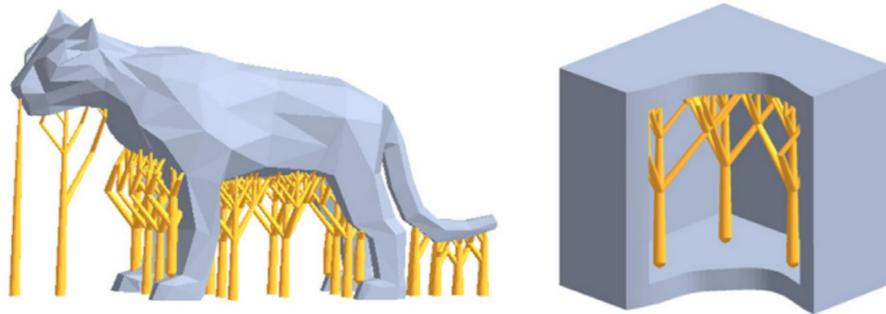


Abb. 2.38: Baumartige Stützstrukturen zur wirtschaftlichen Fertigung [ZLR19]

Vergleichbare Ergebnisse werden durch den Algorithmus von [VGB14] erreicht. Ein neuer Aspekt der vorgestellten Variante ist das angepasste Querschnittsprofil der Äste. Von den getesteten Profilen hat sich in Druckversuchen die N-förmige als ideal hinsichtlich Stabilität und Druckgeschwindigkeit herausgestellt. Weiterhin kann der Algorithmus die baumartigen Stützstrukturen auf der Oberfläche des Bauteils entstehen lassen, wodurch weitere Einsparmöglichkeiten gegeben sind. Um die Wirk-

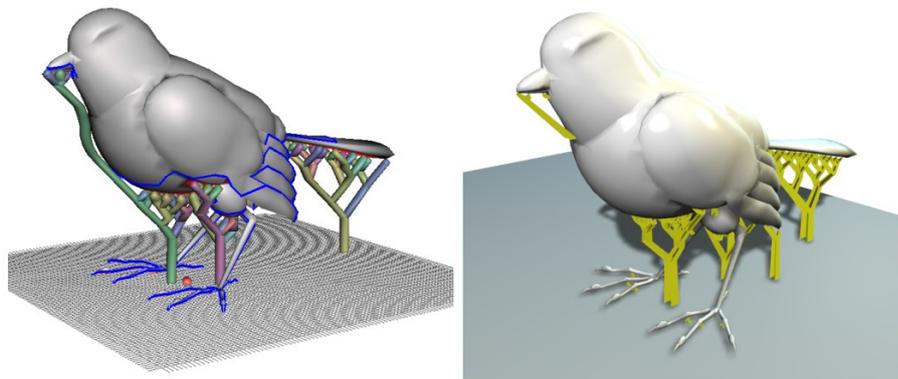


Abb. 2.39: Profilierte Baumartige Stützstrukturen: *links Autodesk MeshMixer, rechts* neuer Ansatz von [VGB14]

samkeit gegenüber konventionellen Ansätzen zu demonstrieren, werden verschiedene Bauteile additiv gefertigt. Im Vergleich zu *Meshmixer* werden eine durchschnittliche Materialersparnis von $12,40\%$ und eine Zeitersparnis von $11,75\%$ erreicht. [VGB14] weisen abschließend darauf hin, dass wie bei vielen anderen Untersuchungen dieser Art die Belastung der Stützkonstruktion im Druckprozess nicht berechnet wird. Der rein geometrisch basierte Ansatz kann daher zu Lösungen führen, die das Gewicht des Bauteils nicht tragen oder dieses gegenüber den Schwingungen der Maschine nicht ausreichend fixieren.

[HK17] stellt einen Ansatz zur Generierung der Stützkonstruktion vor, der kein Modell im STL-Format voraussetzt. Durch die direkte Verarbeitung des Oberflä-

chenmodells entfallen Fehler, welche die Triangulation bei der Konvertierung in das STL-Format verursacht. In einem zweiten Schritt wird das Bauteil hinsichtlich der abzustützenden Flächen untersucht und in kleinere zusammenhängende Bereiche zusammengefasst. Auf diesen werden konvexe Flächen berechnet, die exakt an der Oberfläche des Teils anliegen. Durch die granulare Einteilung wird die Entfernung der Stützstruktur vereinfacht. Um die Verbindung zur Druckbettauflage herzustellen, wird von jeder der Flächen eine Säule in vertikaler Richtung projiziert (vgl. Abbildung 2.40). Mit diesem Aufbau wird eine großflächige Abstützung des Bauteils bei gleichzeitiger Materialeinsparung erreicht. Die nahezu vollflächige Abstützung steht im Kontrast zu den meisten anderen baumartigen Konzepten, die i. d. R. spitz zulaufende Kontaktgeometrien mit dem Bauteil aufweisen. Ein ähnlicher Ansatz ist von [VA16] aus dem Bereich der additiven Fertigung von Metallen bekannt. Aufgrund des höheren Anspruchs an die Festigkeit und die aufwendige Entfernung werden die auftretenden Prozessspannungen sowie die Zugänglichkeit der Stützstruktur zusätzlich simuliert.

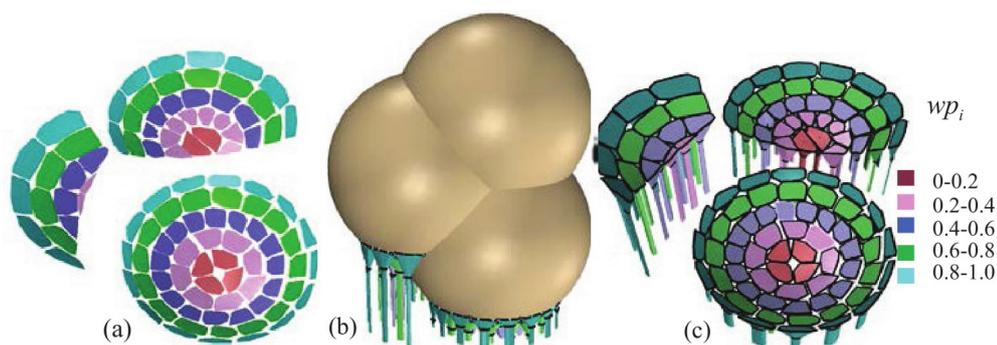


Abb. 2.40: Granulare Stützkonstruktion mit nahezu vollständiger Abstützung der Schnittstelle zum Bauteil [HK17]

Anders als [HK17] vermeiden [JHF15] geometrische Abweichungen der Stützstruktur, welche durch die Konvertierung in das STL-Format entstehen, indem sie die zusätzliche Struktur aus dem G-Code generieren. Für die Berechnung werden die aufeinanderfolgenden Lagen betrachtet, um aus diesen die lokalen Überhangwinkel der Bauteilkontur abzuleiten.

Eine verwandte Entwicklung der baumartigen Strukturen sind solche, die ähnlich einem Stützgerüst aus vertikalen und horizontalen Stäben gefertigt sind. [DHL14] entwickeln diese Art Stützstruktur als Alternative mit besserer Stabilität und höherer Oberflächenqualität der Schnittstelle. Das System basiert auf lokalen Stegen ähnlich einem Tragwerk und einer Erhöhung der Dichte im Bereich der Schnittstelle mit dem Bauteil. Der Technik zugrunde liegt die Fähigkeit der FLM-Fertigungssysteme, begrenzte horizontale Strecken zwischen zwei Ankerpunkten ohne unterliegende Lagen zu verbinden. Dies geschieht ohne weitere Stützstruktur, obwohl diese Konstruk-

tion einen extremen Überhang darstellt. Während baumartige Strukturen in der Regel einen begrenzten Überhangwinkel einhalten, um ein Abfallen der abgelegten Bahnen zu verhindern, können so Ebenen erst kurz vor der Schnittstelle mit dem Druckobjekt mit höherer Dichte aufgespannt werden (vgl. Abbildung 2.41). Bei vier Testbauteilen hat die hier vorgestellte Struktur gegenüber der durch *Meshmixer* generierten Variante durchschnittlich einen leicht erhöhten Materialaufwand von ca. 7,3 % sowie Zeitaufwand von 6,3 %. Gegenüber einer konventionellen Stützkonstruktion bietet sie einen durchschnittlichen Zeitvorteil von weniger als einem Prozent und eine Materialersparnis von 33 %. [SDL16] verfolgen den gleichen Ansatz und erreichen bei einem Testbauteil eine Zeitersparnis von 15,72 % und eine Materialersparnis von 14,07 % gegenüber *Meshmixer*.

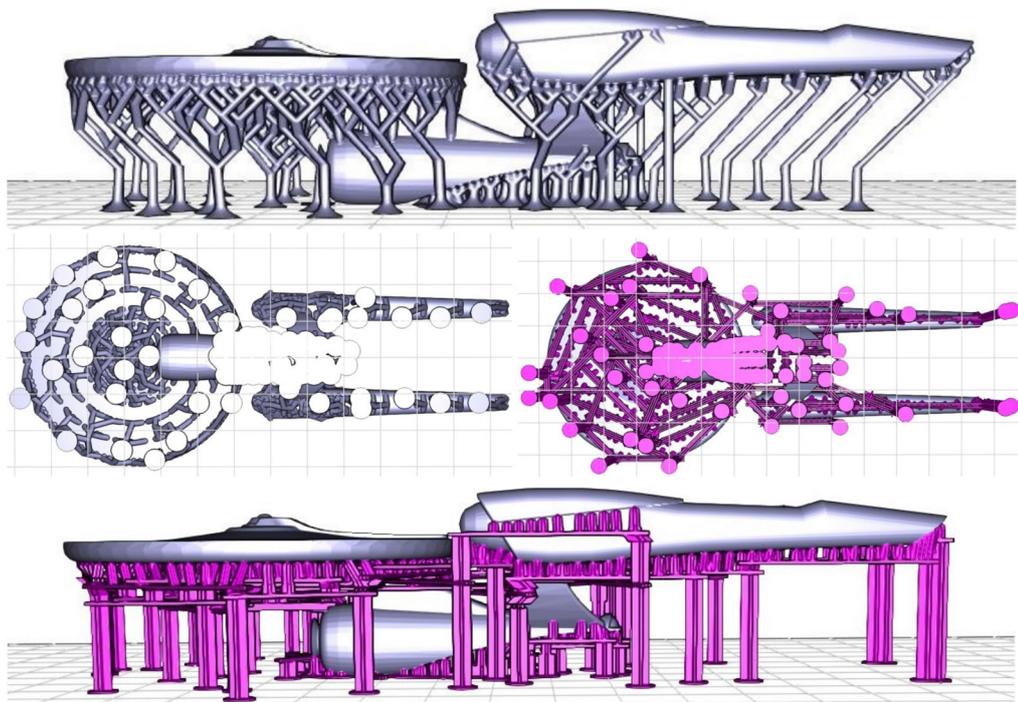


Abb. 2.41: Stützkonstruktion auf Basis eines Tragwerks: *oben* Struktur durch *Meshmixer*, *unten* neuer Ansatz von [DHL14]

Während die zuvor vorgestellten Varianten auf definierten Bauelementen wie Stäben basieren, entwickeln [GG16] einen Algorithmus, welcher die Stützstruktur frei mit Methoden der Topologieoptimierung formt. Zwei berechnete Ergebnisse sind in Abbildung 2.42 dargestellt. Die Ausprägung der Struktur kann durch mehrere Parameter wie den zulässigen Überhangwinkel und die Steifigkeit beeinflusst werden. Ein Bedarf für derartig stabile Stützkonstruktionen ist besonders in der additiven Fertigung von Metallen gegeben, bei welcher hohe Spannungen während der Fertigung auftreten. Die zuverlässige Fixierung des Druckobjekts an sogenannten Ankerpunkten ist somit Voraussetzung für einen sicheren Druckvorgang.

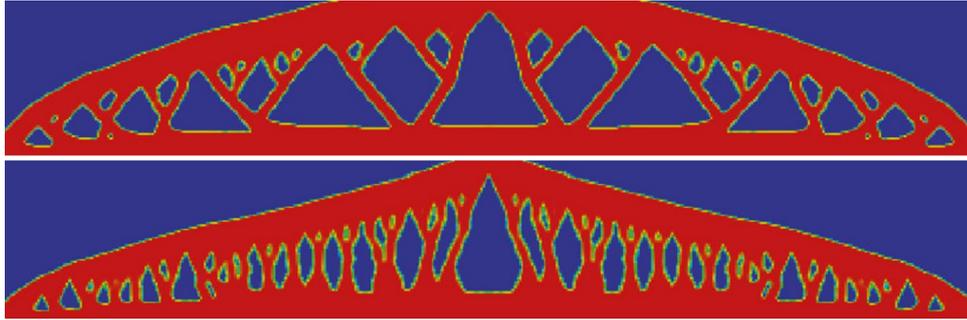


Abb. 2.42: Topologisch optimierte Stützkonstruktion: *oben* zul. Überhangwinkel 45° , *unten* zul. Überhangwinkel $63,4^\circ$ [GG16]

Einen vergleichbaren Ansatz verfolgen [KCL18]. Zusätzlich werden hier die Fertigungskosten als Faktor mit in die Berechnung aufgenommen und beeinflussen je nach Gewichtung das Ergebnis. [Lan16] sowie [MS16] setzen einen Schritt vorher an und stellen einen Algorithmus zur Topologieoptimierung eines Bauteils vor, welcher neben den üblichen Optimierungskriterien wie Gewicht und Steifigkeit auch die benötigte Menge an Stützstruktur betrachtet. Bei dem berechneten optimalen Kompromiss stehen neben den technischen Kriterien auch wirtschaftliche wie die Kosten für die Entfernung der Stützstruktur im Fokus.

[HJW15] stellen eine geometrische Manipulation des Modells zur Reduzierung der Stützkonstruktion vor. Dabei wird die Modellgeometrie in Abhängigkeit von den Überhängen verformt und entspricht damit nicht mehr dem Ausgangszustand. Während dieses Vorgehen für technische Bauteile kritisch betrachtet werden kann, so können sich Einsatzfelder beispielsweise im Bereich von Modellfiguren anbieten, bei denen eine leichte Anpassung der Geometrie akzeptabel ist. Der automatisierte Prozess ist in Abbildung 2.43 anhand dreier Modelle dargestellt.

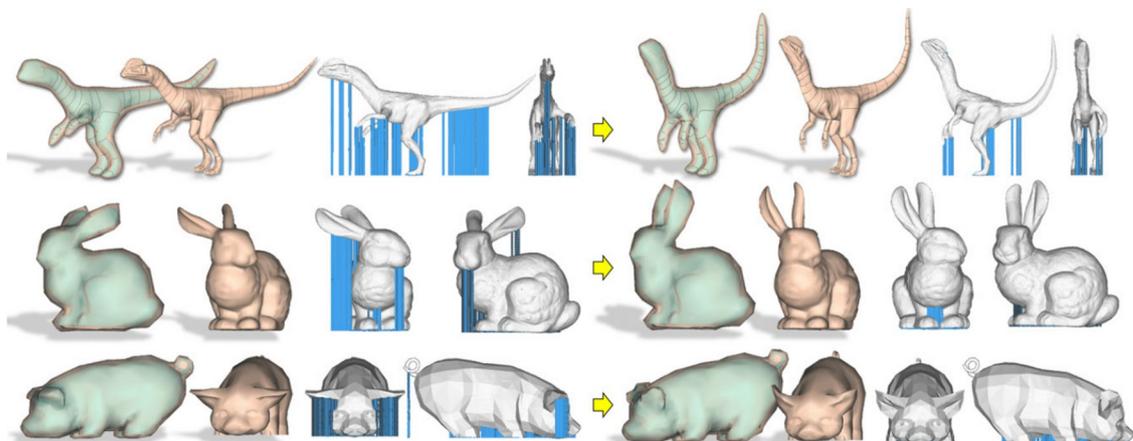


Abb. 2.43: Manipulation div. Modelle zur Reduzierung der Stützstruktur [HJW15]

[ZXW15] sowie [LL17] beschreiben Verfahren zur Generierung von im Bauteil befindlicher Stützstruktur bzw. Füllstruktur, die grundsätzlich ähnliche Anforderungen

wie die Stützstruktur besitzt, aber zur mechanischen Festigkeit des Bauteils beiträgt und nach dem Fertigungsprozess im Bauteil verbleibt. [ZXW15] nutzen hierzu eine baumartige Struktur, deren Stamm dem Innenraum des Bauteils folgt und sich von diesem ausgehend zur Oberfläche hin verästelt. Im Gegensatz dazu verwenden [LL17] u. a. gitterförmig anmutende Füllstrukturen, welche ebenfalls nur in der Randschicht eine erhöhte Dichte aufweisen und die geschlossene Hülle des Bauteils effektiv abstützen (vgl. Abbildung 2.44). Beide Verfahren ermöglichen die Einsparung von Material, ohne eine erhebliche mechanische Schwächung des Bauteils zu bewirken.

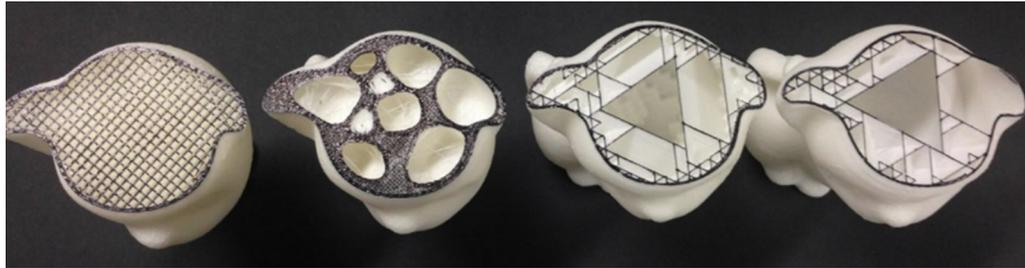


Abb. 2.44: Graduelle Stützstruktur: *links* konventionell, *weitere* verschiedene Ausprägungen der Reduzierung nach [LL17]

Die konventionelle FLM-Technologie legt Bahnen und Schichten in der xy -Ebene ab, während die Zustellung einer neuen Schicht sequenziell durch die z -Achse erfolgt. [ZHF18] entwickeln eine Bahnplanung, welche das Bauteil abhängig vom maximalen Überhangwinkel in verschiedene Bereiche unterteilt und diese unter Verwendung der z -Achse schräg abfährt. Diese geneigten Bahnen bieten den erheblichen Vorteil, dass sie selbst horizontale Überhänge ohne Stützkonstruktion darstellen können. Abbildung 2.45 zeigt die Schritte des Algorithmus. Das Bauteil wird dabei zunächst in Segmente unterteilt, die anschließend orientiert und durch eine konventionelle Bahnplanung verarbeitet werden. Durch eine Koordinatentransformation wird das Bauteil abschließend wieder zusammengesetzt. Der abgebildete Winkel kann in Versuchen ohne Einfallen der Bahnen gefertigt werden. Einerseits sind bei Generierung der Bahnen komplexe Problemstellungen der Kollision und Zugänglichkeit zu lösen, andererseits bietet das Vorgehen enormes Einsparungspotenzial an Stützmaterial und kann vermutlich selbst auf einfachen additiven Fertigungsgeräten eingesetzt werden.

Weitere Forschungsfelder sind u. a. die effektivere Berechnung von Stützstrukturen in optimierten Programmiersprachen wie Matlab [SLZ17] und die Zerlegung von Bauteilen in Einzelkomponenten, die ohne Stützstruktur druckbar sind und nach dem Prozess zusammengesetzt werden können (siehe [LBR12] und [KFW19]). Ebenfalls ist eine Untersuchung von [HXJ18] zu segmentierten Bauplattformen bekannt, deren Segmente durch einen horizontal angeordneten Linearaktor verfahren werden können. Einsparungen von Druckmaterial und eine Steigerung der Modellstabilität

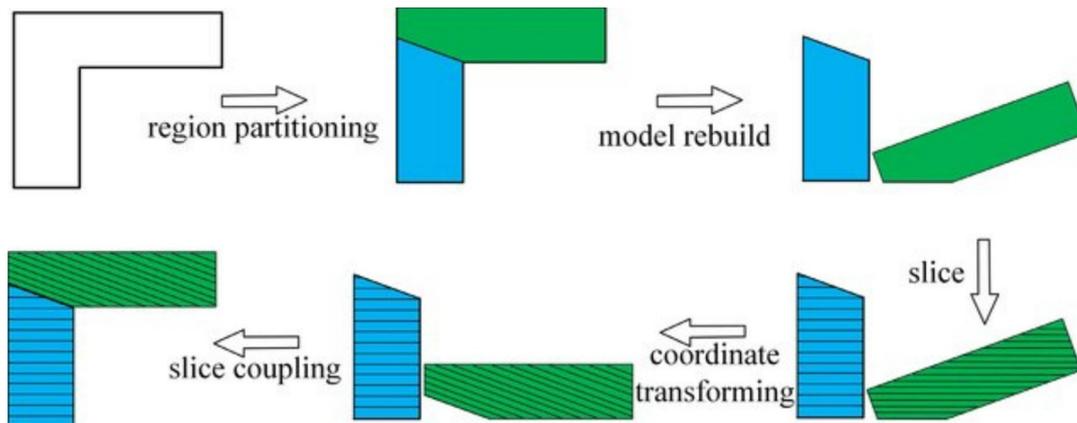


Abb. 2.45: 3-D-Düsenbewegung zur Reduzierung von Stützstruktur [ZHF18]

im Druckprozess sind ein unmittelbares Ergebnis dieser vergleichsweise aufwendigen Vorrichtung.

Bauteilorientierung

Neben einer effektiven Stützkonstruktion ist die Orientierung des Bauteils im Druckraum unmittelbar für die Menge des notwendigen Stützmaterials sowie die finale Bauteilqualität verantwortlich. Zusätzlich zu den etablierten Varianten, die lediglich nach der Orientierung mit dem absolutem Minimum an abzustützender Fläche optimieren, existieren erweiterte Ansätze. [PA15] stellen eine Optimierungsfunktion auf, die zur Orientierung des Bauteils im Druckraum genutzt wird. Hierbei wird zum einen vermieden, nahezu oder vollständig horizontale Regionen zu generieren, die eine Stützkonstruktion erforderlich machen und einfallen können. Zum anderen werden spezifische Merkmale wie eine gesteigerte Zylindrizität von gekrümmten Oberflächen forciert. Dabei wird auch die insgesamt benötigte Menge an Stützmaterial betrachtet. Das Ergebnis ist ein Kompromiss aus den genannten Faktoren, deren Gewichtung auf das Fertigungsverfahren eingestellt werden kann.

Abbildung 2.46 zeigt die automatische Orientierung anhand eines Referenzbauteils. Die dargestellte Orientierung mag zunächst nicht naheliegend erscheinen, sie berücksichtigt allerdings die genannten Optimierungskriterien. Die zylindrischen Ausprägungen werden nicht auf dem Radius liegend gefertigt und die flachen Bereiche liegen ebenfalls nicht horizontal auf der Stützstruktur auf. Ein vergleichbares Vorgehen, welches als Qualitätskriterium die Oberflächenrauheit aufgrund der abgelegten Schichten heranzieht, wird bereits 2004 von [TPV04] vorgestellt. Horizontal verlaufende Flächen werden auch bei diesem Verfahren durch Umorientierung vermieden, da flach ansteigende Bereiche aufgrund des Schichtaufbaus eine stark gestufte Oberfläche abbilden.

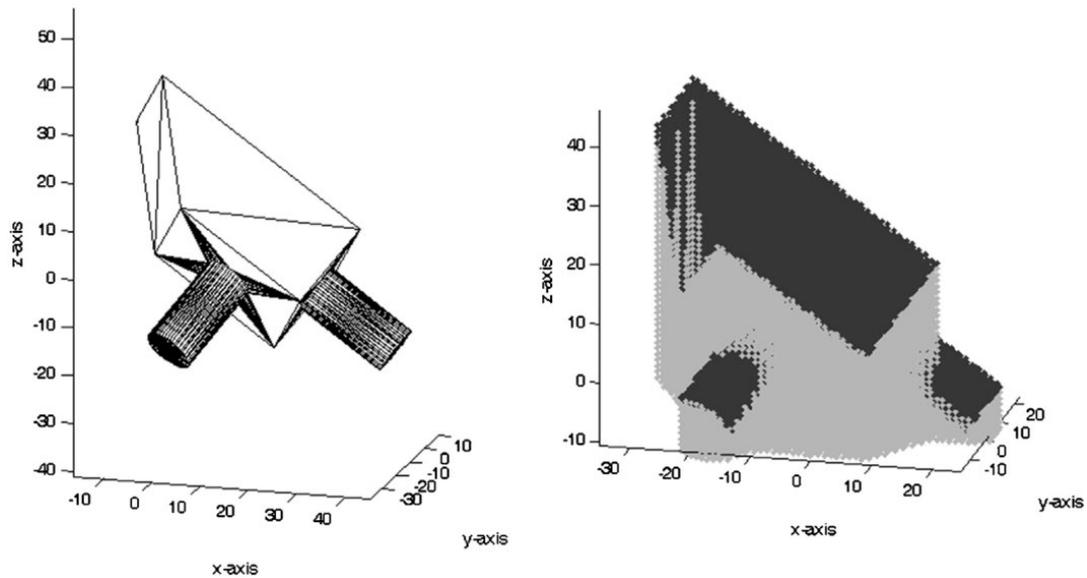


Abb. 2.46: Multikriterielle Bauteilorientierung [PA15]

[DMC17] stellen eine noch umfangreichere multikriterielle Optimierung der Orientierung vor. Diese umfasst Zylindrizität, Ebenheit, Rechtwinkeligkeit sowie Parallelität des gefertigten Bauteils und wägt diese gegenüber der Kontaktfläche, dem Gesamtvolumen sowie dem zu entfernenden Anteil der Stützstruktur ab. Auch hier wird das Ergebnis der Umorientierung dem individuellen Gewicht der Kriterien angepasst.

2.5.3 Manuelle Platzierung und Entfernung von Stützstruktur

Verschiedene *Slicer* wie *Simplify3D*, *Slic3r* und *Cura* bieten neben der automatischen Generierung der Stützstruktur auch die Möglichkeit, zusätzliche Bereiche manuell zu definieren. Diese Option kann genutzt werden, um zusätzliche Stützstruktur hinzuzufügen oder Bereiche zu definieren, in denen die automatisierte Erkennung explizit keine Struktur generieren soll. Das manuelle Hinzufügen kann beispielsweise hilfreich sein, um ein instabiles Bauteil während des Druckprozesses besser zu stützen oder eine höhere Kontaktfläche zur Druckbettauflage zu erzielen. Bei Bohrungen und kleineren Hohlräumen kann der lokale Verzicht auf Stützstruktur vorteilhaft sein, da diese an solchen Stellen häufig schlecht zu entfernen ist und nicht benötigt wird. *Simplify3D* bietet nach eigener Erfahrung die umfangreichsten Optionen zur manuellen Platzierung der Stützstruktur. Ein Alleinstellungsmerkmal dieses *Slicer* ist die Option, einen Vorschlag zur Platzierung automatisch generieren zu lassen und diesen manuell anzupassen.

Abbildung 2.47 zeigt ein Bauteil, bei dem zunächst der automatisierte Vorschlag generiert (rechtes Bild) und anschließend im Bereich der Nase manuell angepasst wird

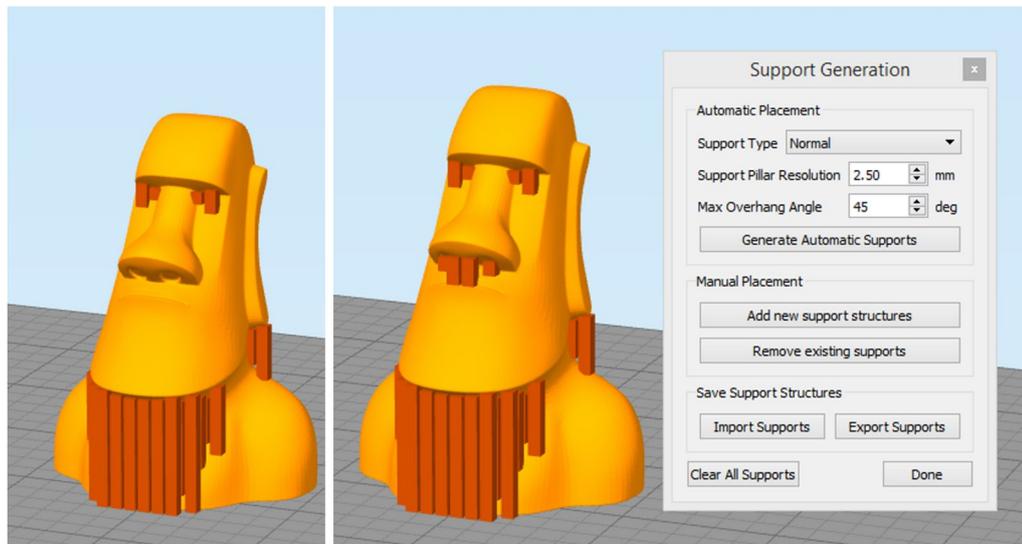


Abb. 2.47: Manuelles Hinzufügen und Entfernen von Stützstrukturbereichen in *Simplify3D* Version 4.1 [Sim20]

(linkes Bild). In gleicher Weise können die stabförmigen Platzhalter an beliebiger Stelle auf der Oberfläche des Druckobjektes hinzugefügt werden.

2.6 Formschlüssige Kunststoffverbindungen

2.6.1 Fokussierung

Formschlüssige Verbindungen sind eine verbreitete Technik, um Kunststoffbauteile nach der Fertigung beispielsweise im Spritzguss- oder Extrusionsverfahren zu fügen. So werden beispielsweise Schnappverbinder in verschiedensten Formen und Ausprägungen hergestellt, um ein einfaches Fügen der Komponenten ohne zusätzliches Werkzeug zu ermöglichen. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf formschlüssigen Verbindungen, bei denen zumindest ein Partnermaterial ein thermoplastischer Kunststoff ist und die direkt im primären Fertigungsprozess gefügt werden bzw. in Fügung hergestellt werden.

2.6.2 Formschlüssige Verbindungen im FLM-Verfahren

[FWH19] untersuchen verschiedene Mechanismen zur Steigerung des Verbundes zweier Thermoplaste im FLM-Verfahren. Die Versuche umfassen eine Plasmabehandlung der Schnittstelle und die Glättung der Oberfläche durch das erneute Überfahren der abgelegten Lage mit einer heißen Düse, ohne weiteres Material aufzubringen. Wei-

terhin werden Proben mit einer schwach ausgeprägten Verzahnung versehen, sodass die zwei Hälften ineinandergreifen.

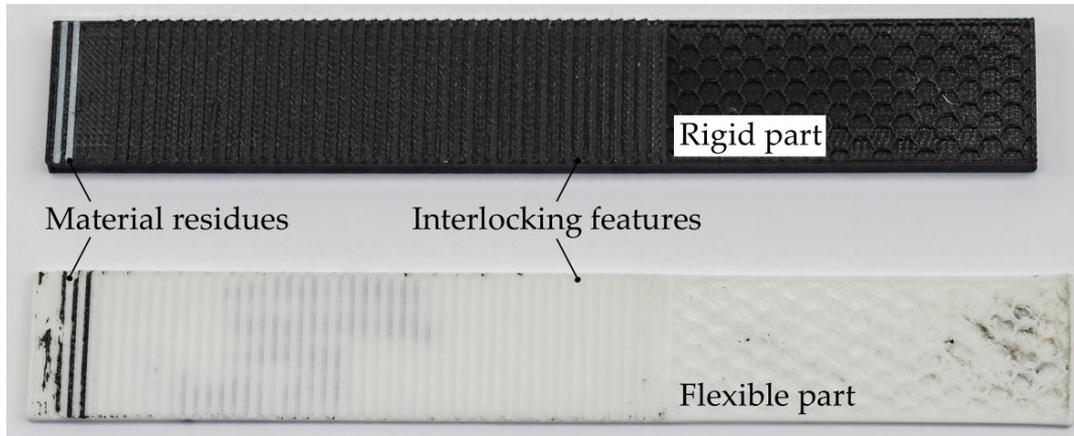


Abb. 2.48: Additiv gefertigte Probe mit stoffschlüssiger Verbindung [FWH19]

Abbildung 2.48 zeigt ein Beispiel der eingesetzten Probekörper, deren Verbindungsstärke mit einem Rollenschälversuch gemessen wird. Hierzu wird einer der Partner aus einem steifen Material wie PLA, ABS oder PA 6 mit 30% Glasfaseranteil gefertigt, während für den flexiblen Probenteil u. a. ein TPU gewählt wird. Die Ergebnisse der Schälversuche für die spezifische Materialkombination PLA und *NinjaFlex* (mit TPU vergleichbarer weicher Thermoplast) sind in Abbildung 2.49 zusammengefasst. Sie zeigen, dass neben allen Verfahren, die auf eine Verbesserung des Stoffschlusses abzielen, die Proben mit formschlüssigen Verbindungselementen den größten Schälwiderstand erreichen.

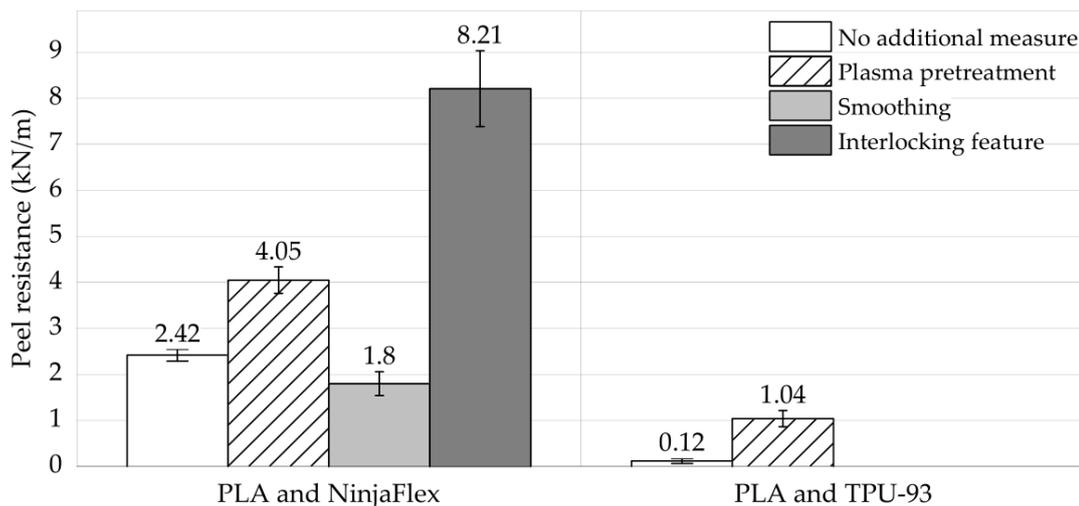


Abb. 2.49: Formschlüssige Verbindungen im Vergleich mit stoffschlüssigen [FWH19]

[FWH19] geben weiterhin Designrichtlinien bzw. Fertigungshinweise für die verschiedenen Wirkmechanismen, welche die Verbindung zwischen den zwei Partnermate-

rialien bewirken. Die für den mechanischen Formschluss relevanten sind nachfolgend zusammengefasst.

- Die Verarbeitungstemperaturen der beiden Materialien sollten auf einem ähnlichen Niveau sein, da ansonsten eine Deformation des Partners mit geringerer Wärmeformbeständigkeit auftreten kann. Gleichzeitig erfordern viele Thermoplaste für die Verarbeitung im FLM-Verfahren eine bestimmte Bauraumtemperatur, die bei Unterschreitung zu unzureichender Verbindung der Lagen und Bauteilverzug führen kann. Als extremes Beispiel wird die Materialkombination aus PLA und PEEK genannt, deren Wärmeformbeständigkeit ca. 100 °C auseinanderliegen.
- Werden beide Materialien in der ersten Lage auf die Bauplatte aufgebracht, so muss auch die Haftung für beide Materialien auf der Druckplattform sichergestellt werden.
- Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Materialien sollte sich nur in geringem Maße unterscheiden, da größere Unterschiede zu unterschiedlicher Schrumpfung und damit zu ausgeprägten Spannungen im Druckobjekt führen können.
- Die Generierung mechanischer Schnittstellen und deren Qualität ist stark von der Viskosität des Materials und der Topographie bzw. dem Querschnitt der Spalten und Hohlräume der Schnittstelle abhängig. Weiterhin weisen die Autoren darauf hin, dass eine zusätzliche Extrusionsmenge erforderlich ist, um die Hohlräume zu füllen. Dies kann beispielsweise direkt im Slicer berücksichtigt werden.

[SSE17] nutzen eine aus *Ultem 9085* gedruckte Druckbettauflage mit Hinterschneidungen, um die erste abgelegte Lage im *BAAM-Verfahren* (*Big Area Additive Manufacturing*) mechanisch auf dem Druckbett zu fixieren. Beim *BAAM-Verfahren* wird Granulat durch einen mitgeführten Schneckenextruder mit vergleichsweise groben Bahnen und hohem Massedurchsatz extrudiert. Anlagen, die nach diesem Verfahren arbeiten, besitzen üblicherweise ein Bauvolumen von mehreren Kubikmetern. Die entwickelte Druckbettauflage besitzt wellenartige, sich wiederholende Elemente, in welche der extrudierte Kunststoff eindringt und sich formschlüssig ausprägt (vgl. Abb. 2.50). Nach Abschluss des Fertigungsprozesses wird die Auflage manuell gebogen, wobei die formschlüssigen Elemente und das Bauteil segmentweise getrennt werden. *Ultem 9085* von *Sabic* ist ein auf Polyetherimid (PEI) basierender Hochleistungsthermoplast mit einer Glasübergangstemperatur von ca. 217 °C. Bei üblichen Baumaterialien ist daher nicht mit einem Anschmelzen der Druckbettauflage zu

rechnen. Einige Aspekte wie die Struktur zur Ausformung sind durch das Patent *US2018/0147774A1* geschützt.

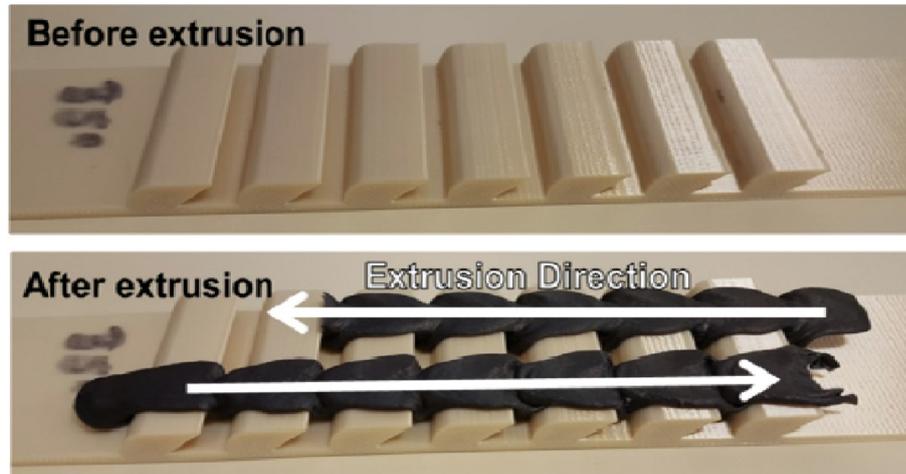


Abb. 2.50: Druckbettauflage mit formschlüssigen Elementen [SSE17]

[KAS18] stellen einen Extruder mit Mischkammer für zwei Filamente und passivem Mischer vor. Dabei werden nicht mischbare Polymere so miteinander vermengt, dass keine Delamination unter Belastung entsteht. Abbildung 2.51 zeigt das Modell des Extruders mit der Mischkammer, dem Aufheizbereich sowie der Düse. Ein nicht dargestelltes gitterartiges Bauteil zur passiven Mischung der Komponenten kann zusätzlich in den Schmelzkanal eingesetzt werden. Die Ergebnisse jeweils eines Versuchs ohne und mit dieser mischenden Struktur sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Letztgenannter Fall zeigt eine deutlich homogenere Vermengung der beiden Thermoplaste. Der so extrudierte Strang versagt unter Belastung ohne Delamination.

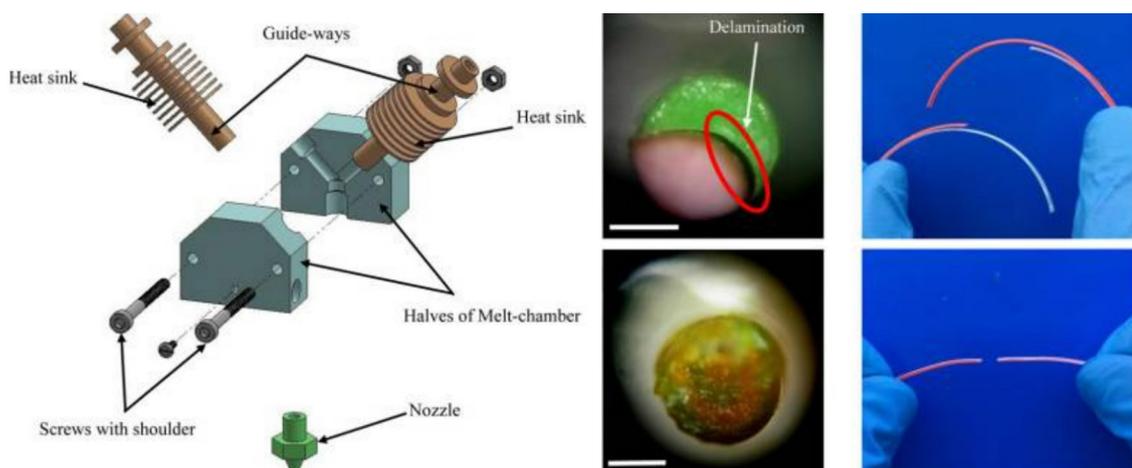


Abb. 2.51: Mischextruder für Thermoplaste ohne Stoffschluss: *links* Aufbau der Heißkanaldüse, *rechts oben* extr. Strang ohne Mischstruktur, *rechts unten* extr. Strang mit Mischstruktur [KAS18]

[RSC20] entwickeln eine geometrische Schnittstelle und eine Prozesstechnik zur Verbindung von Thermoplasten und Silikon. Hierzu wird zunächst der thermoplastische Grundkörper im FLM-Verfahren gefertigt. Dieses Druckobjekt ist so ausgeprägt, dass es ein Einfüllen des Silikons ermöglicht und als Form für dieses fungiert. Der für das Silikon äußerlich formgebende Teil des Druckobjekts wird nach der Aushärtung entfernt und verbleibt nicht am Bauteil.



Abb. 2.52: Additive Fertigung gitterartiger Strukturen zur Verb. mit Silikon [RSC20]

Da sich zwischen den zwei Materialien keine stoffschlüssige Verbindung aufbaut, haben [RSC20] eine gitterartige Struktur als Schnittstelle entwickelt, in die das Silikon eindringt und diese formschlüssig umschließt. Zur Generierung dieser Strukturen wird ein CAD-Tool entwickelt, welches die Kontaktfläche zwischen Silikon und Thermoplast automatisiert modifiziert. Als Anwendungsbeispiele werden pneumatische Aktoren als Greifwerkzeuge und organische Ventile vorgestellt. Das Silikon übernimmt hier die Rolle des unter Druck expandierenden Partners.

Ein vergleichbares Software-Werkzeug nutzen [NOG19] zur Generierung eines porösen Druckobjektes als durchlässiger Träger für biologisches Material. Die Autoren sehen die Optionen, welche aktuelle *Slicer* bieten, als unzureichend für den Anwendungsfall an, da die lokal variierende Orientierung der Bauteiloberfläche unterschiedliche Porengrößen zur Folge hat. Eine gleichmäßige und präzise einstellbare Porengröße stellt bei der entwickelten Software entsprechend das primäre Optimierungsziel dar.

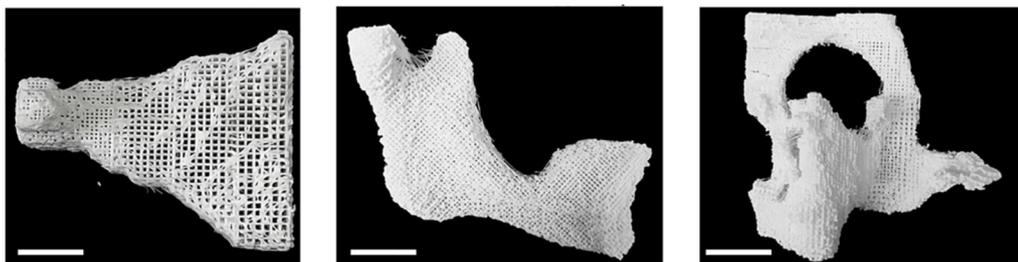


Abb. 2.53: Slicer zur Fertigung von porösen Bauteilen [NOG19]

Anders als bei der Entwicklung von [RSC20] wird bei diesem Lösungsansatz kein modifiziertes CAD-Modell generiert. Die in *MATLAB* programmierte Software *scafSLICR* stellt einen vollständigen *Slicer* dar, welcher auf die beschriebenen Strukturen spezialisiert ist.

[RSF19] testen verschiedene Verbindungsformen zwischen zwei Polymeren im FLM-Verfahren. Von besonderem Interesse sind hier die in Abbildung 2.54 dargestellten makroskopischen Verbindungen. Im Vergleich zu den ebenfalls getesteten Stoßverbindungen zeigen die formschlüssig verbundenen Proben eine durchweg höhere Belastbarkeit. Dies gilt sowohl für die Proben, welche beidseitig aus PLA gefertigt sind, als auch für jene, die eine nicht stoffschlüssige Verbindung mit TPU als Partnermaterial besitzen. Insgesamt zeigt die T-Verbindung die besten mechanischen Kennwerte sowie eine geringe Streuung der durch Zugprüfungen ermittelten mechanischen Kennwerte.

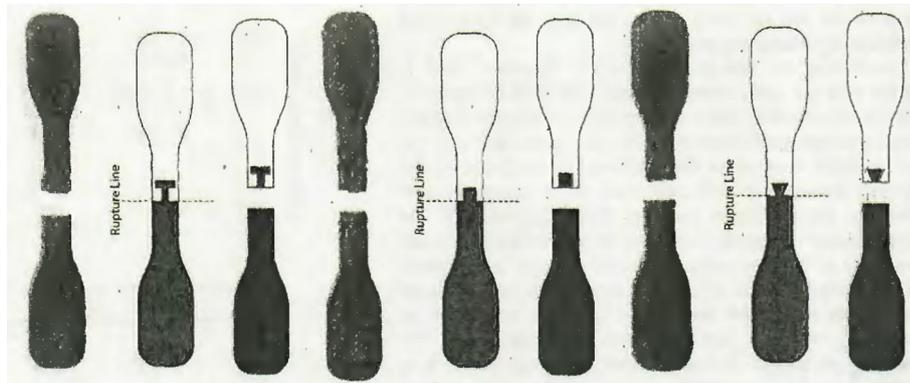


Abb. 2.54: Ausprägungen von formschlüssigen Verbindung bei Zugproben [RSF19]

[WWS18] entwickeln Testkörper zur Messung der Verbindungsstärke von Polymeren bei additiv gefertigten Bauteilen. Die Körper in Abbildung 2.55 stellen Proben für Zugversuche, Zugscher- sowie Druckscherversuche dar.

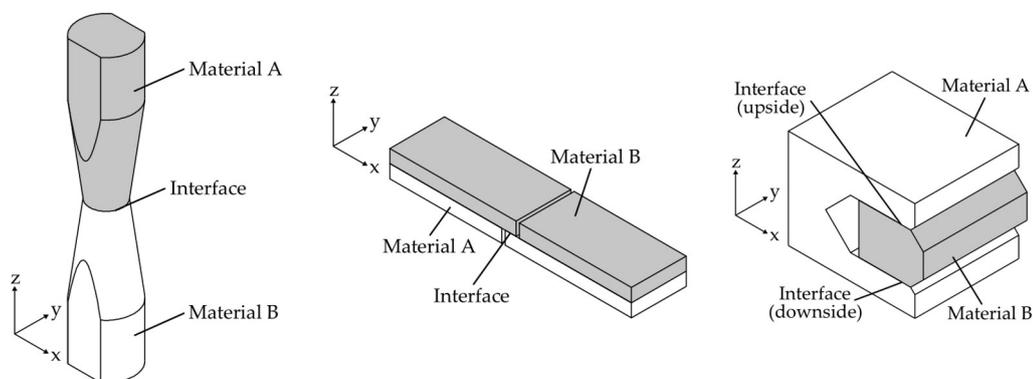


Abb. 2.55: Prüfkörper zur Messung der Verbundqualität bei Multimaterialbauteilen: *links* Zugprobe; *mitte* Zugscherprobe; *rechts* Druckscherprobe [WWS18]

Dabei wird der praktische Einsatz anhand von Prüfkörpern aus ABS und PLA positiv evaluiert. Die Autoren sehen die erarbeitete Probengeometrie als entscheidende Grundlage zur Bestimmung der Prozessparameter an, die auf die Stärke der Verbindung der Partnermaterialien Einfluss haben. Weiterer Forschungsbedarf wird in der Entwicklung von Testkörpern u. a. für Biege- und Torsionsversuche gesehen.

2.6.3 Formschlüssige Verbindungen in anderen Verfahren

Neben den Versuchen, formschlüssige Verbindungen in additiven Fertigungsverfahren herzustellen, sind auch umfangreiche Bemühungen bekannt, dies für Schnittstellen zwischen ein oder mehreren Kunststoffen und Metallen in anderen Verfahrensgruppen zu erreichen.

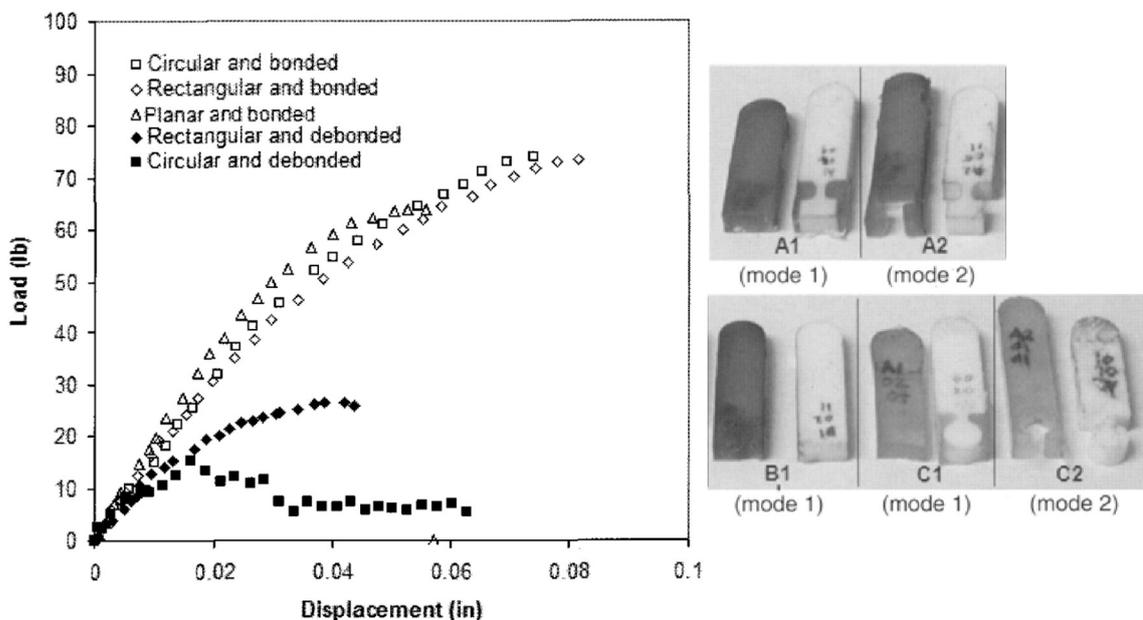


Abb. 2.56: Zugversuche zur Messung der Verbundstärke bei Multimaterialbauteilen bei kombinierten form- und stoffschlüssigen Proben [BFG04]

[BFG04] prüfen verschiedene formschlüssige Schnittstellen sowie die Kombination dieser mit einer zusätzlichen stoffschlüssigen Verbindung. Abbildung 2.56 zeigt die eckigen und runden Ausprägungen der Proben sowie den Verlauf im Zugversuch. Die Proben werden nach der Form (A eckige Verbindung, B Stoßverbindung, C runde Verbindung) eingeteilt und jeweils mit und ohne zusätzlichen Stoffschluss gefertigt. A1, B1 und C1 sind mit Stoffschluss gefertigt, während A2 und C2 keinen aufweisen. Der Stoffschluss zwischen den zwei eingesetzten Polyurethanen mit einer Shore-Härte von 65 D und 70 D wird durch unterschiedliche Haltezeiten im zweistufigen Gießverfahren eingestellt. Jene Proben, welche mit zusätzlichem Stoffschluss gefertigt sind, weisen eine hohe Zugfestigkeit und einen Bruch ohne Lösen

der formschlüssigen Verbindung auf (*mode 1*). Die lediglich formschlüssig verbundenen Proben versagen durch ein Aufbiegen der Geometrie (*mode 2*). Insgesamt zeigen die Versuche, dass eine Kombination von Form- und Kraftschluss unter den verwendeten Randbedingungen die besten Ergebnisse liefert.

Das schlechte Abschneiden der rein formschlüssigen Verbindungen ist nach eigener Einschätzung auf die vergleichsweise flexiblen Materialien sowie die Probengeometrie zurückzuführen, die eine Deformation unter Belastung begünstigen. [GGB06] kommen zu einem ähnlichen Ergebnis, setzen allerdings eine knochenartige Verdickung als formschlüssiges Element ein. Versuche mit untereinander kompatiblen Materialien zeigen, dass in solchen Fällen keine signifikante Stärkung der Verbindung durch eine formschlüssige Gestaltung zu erwarten ist. Für Materialien hingegen, die sich untereinander nicht verbinden, ist eine solche Gestaltung der Schnittstelle die aussichtsreichste Option.

[BBH10] erreichen eine deutliche Steigerung der Verbindung zwischen Stahl und Polyphenylensulfid (PPS) mit 40 % Anteil an Glasfasern durch eine Aufrauung der Oberfläche des Metallteils mittels Laserbearbeitung. Durch die Bearbeitung bildet sich auf der Oberfläche ein fein strukturiertes Muster heraus, in das der Kunststoff im Spritzgussverfahren eindringen und sich verklammern kann. Die so hergestellten Zugproben sowie die Oberfläche im Detail sind in Abbildung 2.57 dargestellt. Durch die Untersuchung konnten die beiden nachfolgenden Zusammenhänge ermittelt werden.

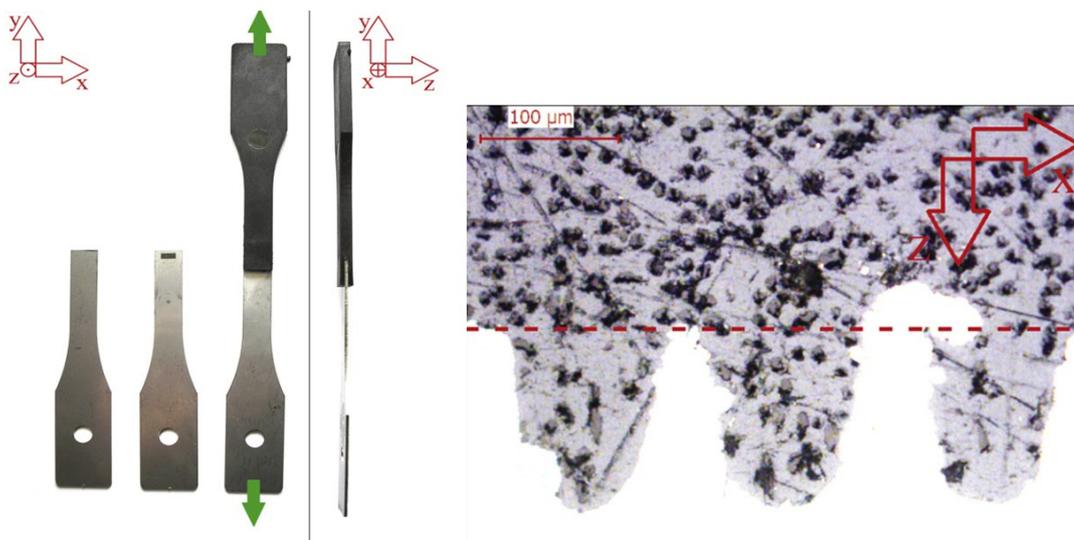


Abb. 2.57: Steigerung der Verbindungsfestigkeit zwischen Metall und Thermoplast: *links* Zugprobe aus rostfreiem Stahl und PPS-Kunststoff, *rechts* Nahaufnahme der per Laser aufgerauten Oberfläche [BBH10]

- Die Belastbarkeit der Proben nimmt mit der Tiefe der Strukturierung der Oberfläche bis auf ein Maß von ca. 170 μm zu. Aufnahmen von Schliffen durch die Probe zeigen, dass die Löcher durch den Laser ab einer gewissen Tiefe wieder verschlossen werden und damit eine weniger wirksame Struktur zur Verfügung steht.
- Mit zunehmendem Abstand der per Laser eingebrachten Löcher nimmt die Belastbarkeit näherungsweise linear ab. Dies ist unmittelbar auf die geringere Dichte der Strukturierung zurückzuführen. Wird die Kraft pro Loch berechnet, so ergibt sich ein nahezu gleichbleibender Anteil der gesamten Haftkraft.

[JHS14] analysieren Mechanismen zur Verbindung verschiedener Polymere. Der Fokus liegt dabei auf Kunststoffen, bei denen aufgrund einer sehr geringen Oberflächenenergie nur ein unzureichender Stoffschluss zu erreichen ist. Häufig sind beispielsweise zur Verklebung solcher Materialpaarungen aufwendige Maßnahmen wie die Behandlung der Oberfläche mit korrosiven Flüssigkeiten und eine mechanische Aufrauung notwendig. Die Autoren stellen eine alternative Methode vor, welche tetrapodal aufgebaute Mikropartikel aus Zinkoxid zur formschlüssigen Verbindung von Polytetrafluorethylen (PTFE) und Polydimethylsiloxan (PDMS) verwendet. Bei der Verarbeitung werden die Partikel in die Formmasse eingebracht und betten sich in beiden Partnern an der Schnittstelle ein. Abbildung 2.58 zeigt die Strukturen des Zinkoxids in der Ausgangsform (a) und in gemahlener Form (b).

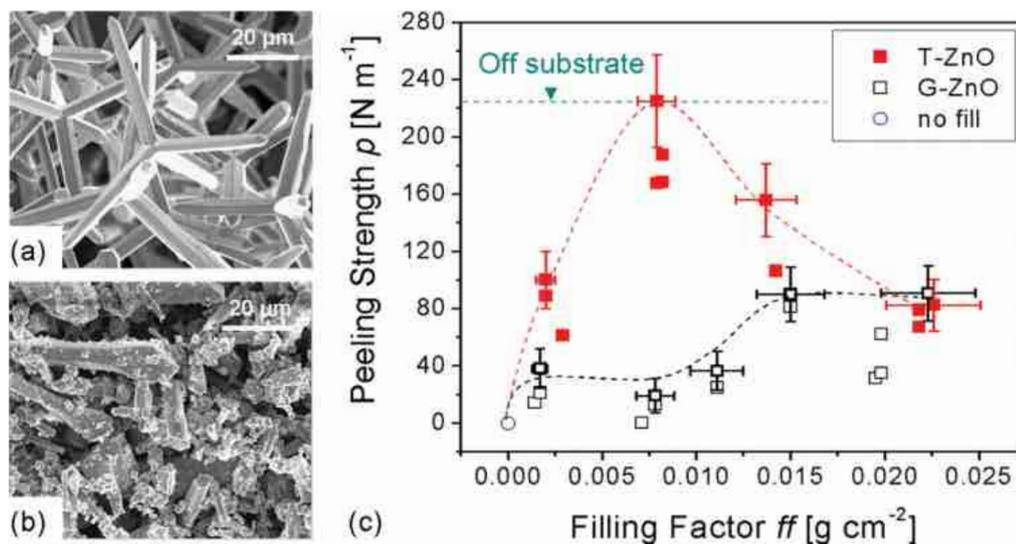


Abb. 2.58: Einsatz von Mikropartikeln aus Zinkoxid zur Verbindung von Kunststoffen mit geringer Oberflächenenergie: (a) Partikel im Ausgangszustand, (b) gemahlene Partikel, (c) Ergebnisse Schälprüfung [JHS14]

Die für Schälversuche gefertigten Testkörper zeigen eine deutliche Verbesserung des Schälwiderstands, dessen Verlauf in Abhängigkeit des Füllfaktors an Partikeln ein

ausgeprägtes Maximum besitzt (vgl. Abbildung 2.58c). Die gemahlene Partikel bewirken hingegen nur eine begrenzte Steigerung des Schälwiderstandes. Dies zeigt, dass die Verbesserung der mechanischen Festigkeit der Schnittstelle nicht auf einer stoffschlüssigen Anhaftung der Polymere an den Partikeln, sondern auf deren geometrischer Ausprägung basiert. Für die problematische Materialkombination von PTFE und PDMS wird mit dem beschriebenen Verfahren eine belastbare Verbindung hergestellt.

3 Zielsetzung

Der Stand der Forschung zeigt, dass zwei schwerwiegende Problemstellungen bzgl. der Stützkonstruktionen im FLM-Verfahren bestehen. Zum einen ist für die etablierten und gut beherrschten Druckmaterialien eine Vielzahl von Einschränkungen gegeben, welche durch die komplexen Abhängigkeiten zwischen Modell- und Stützmaterial, Bauplatte und Umgebungsbedingungen definiert werden. Dies führt dazu, dass die Flexibilität als eine der entscheidenden Stärken des FLM-Verfahrens insbesondere bei kleinen Losgrößen reduziert wird. Die Folgen dieser unbefriedigenden Situation äußern sich neben der häufigen Umrüstung von Bauplatte und Druckkopf in einem erhöhten Aufwand in der Pflege und stetigen Anpassung der entsprechenden Einstellungsprofile im *Slicer*. Zum anderen sind viele industriell relevante teilkristalline Thermoplaste wie Polypropylene und Polyamid aufgrund des ausgeprägten Bauteilverzugs und des Fehlens eines geeigneten Stützmaterials nur für sehr kleine Druckobjekte geeignet oder überhaupt nicht einsetzbar. Dabei besitzen genau diese Materialien Eigenschaften wie hohe Zähigkeit, Wärmeformbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber Ölen und Fetten, die Kunststoffe für viele Anwendungsfälle erst sinnvoll einsetzbar machen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neuartige Stützkonstruktion auf Basis einer formschlüssigen Schnittstelle erforscht. Für das Verfahren werden Bau- und Stützmaterial so gewählt, dass sie aufgrund ihres molekularen Aufbaus keine nennenswerte stoffschlüssige Verbindung aufbauen können. Die formschlüssige Verbindung wird dabei so schwach ausgeprägt, dass ein manuelles Lösen der Stützkonstruktion nach Fertigstellung des Druckprozesses möglich ist. Mit diesem Ansatz sollen die beschriebenen Schwachstellen und Einschränkungen der Technologie überwunden werden. Nachfolgend sind die idealen Eigenschaften einer Stützkonstruktion im FLM-Verfahren und damit die Zielsetzung der Entwicklung zusammengefasst.

- (a) Die Stützkonstruktion ist universell einsetzbar bzgl. der Bauteilgeometrie und des Werkstoffspektrums.

Der Aspekt bezieht sich auf die allgemeine Einsetzbarkeit der Stützkonstruktion. Es soll im Idealfall nur ein robustes Einstellungsprofil der Stützkonstruktion im *Slicer* existieren, welches für alle Baumaterialien und Geometrien gleichermaßen gut

funktioniert. Kann dies erreicht werden, so entfallen die häufigen Anpassungen dieser Einstellungen und Probedrucke.

- (b) Anforderung (a) schließt teilkristalline Werkstoffe und nicht thermoplastische fließfähige Kunststoffe z. B. Silikone mit ein.

Die besonderen Probleme bei der Verwendung teilkristalliner Thermoplaste sollen als zentrale Problemstellung betrachtet werden. Ziel ist es, auch für die additive Fertigung nicht optimierte Thermoplaste und idealerweise Elastomere sowie Duroplaste einsetzbar zu machen.

- (c) Für alle Baumaterialien soll nur ein günstiges und gut verarbeitbares Stützmaterial eingesetzt werden, das möglichst recyclingfähig ist.

Um den Aufwand beim Wechsel zwischen unterschiedlichen Modellmaterialien gering zu halten, soll nur ein Thermoplast für alle Baumaterialien eingesetzt werden. Dabei ist das Material einfach und schnell zu verarbeiten, was sich u. a. in günstigen hygroskopischen Eigenschaften, ungiftigen Zersetzungsprodukten und einer hohen Fließfähigkeit äußert. Gelingt die Etablierung eines solchen Materials, so nimmt die Bedeutung des Recyclings aufgrund sortenreiner Abfälle zu. Daraus kann die Forderung der Recyclingeignung für das Stützmaterial abgeleitet werden.

- (d) Das universelle Stützmaterial ist so zu wählen, das eine wirtschaftliche Bauplatte eingesetzt werden kann.

Eine weitere Anforderung an das Stützmaterial ist die Kompatibilität mit einer technisch geeigneten und wirtschaftlichen Bauplatte. Diese sollte kostengünstig und robust in der Handhabung sein. Von technischer Bedeutung ist die starke Haftung während des Druckprozesses und ein mit geringeren Kräften verbundenes anschließendes Ablösen.

- (e) An den Kontaktstellen mit der Stützkonstruktion soll eine hochwertige Bauteiloberfläche entstehen.

Maßgeblich für die Bewertung und Akzeptanz der neuen Stützkonstruktion ist die erreichbare Qualität der Kontaktflächen zwischen Stützkonstruktion und Bauteil. Im Idealfall ist diese auf dem gleichen Niveau wie bei Oberflächen, die nicht in Kontakt mit der Stützstruktur stehen.

- (f) Die Stützkonstruktion soll die hohen Kräfte durch die thermische Schrumpfung der Druckobjektes aufnehmen können.

Das Stützmaterial muss so gewählt und der Aufbau der Stützkonstruktion so ausgelegt werden, dass die Schrumpfung des Bauteils sowie daraus resultierende Kräfte aufgenommen werden können. Damit ist nicht gemeint, dass sich die Stützstruktur nicht verformen darf, sondern keine kritische Ablösung des Bauteils im Druckprozess erfolgt. Die Stützkonstruktion soll dazu beitragen, eine gleichmäßige und kontrollierte Schrumpfung des Bauteils zu ermöglichen. Eine homogene Schrumpfung aller beteiligten mechanischen Schnittstellen ist aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien und der zeitlich stark variierenden Temperaturverteilung auszuschließen.

- (g) Ein manuelles Lösen der Struktur soll ohne aufwändige Hilfsmittel oder ein Auswaschsystem mit geringem zeitlichen Aufwand möglich sein.

Das Entfernen der Stützstruktur soll keiner besonderen betrieblichen Mittel bedürfen, um die Investitionskosten gering zu halten. Außerdem soll der Prozess ohne Vorkenntnisse durchführbar sein und nur einen geringen zeitlichen Aufwand darstellen.

- (h) Die Stützstruktur ist auch für Kontaktstellen einsetzbar, die auf einer Oberseite des Bauteils oder in schlecht zugänglichen Kavitäten liegen.

Der Aspekt ist eine Erweiterung der erstgenannten Anforderung **(a)**. Ein Sonderfall sind Stützkonstruktionen, die anstatt auf der Bauplatte auf der Oberfläche des Bauteils beginnen. Bestimmte Hohlräume wie tiefe Bohrungen mit geringem Durchmesser sind schlecht erreichbare Problemstellen und müssen ebenfalls separat betrachtet werden. Auch diese Fälle werden idealerweise abgedeckt.

Die beschriebenen Kriterien stellen die bestmögliche Ausprägung einer Stützkonstruktion dar und dienen als Bewertungsreferenz. In Abschnitt 6.1 wird diese den Forschungsergebnissen qualitativ gegenübergestellt, um die Erfüllung der Zielsetzung zu prüfen.

4 Lösungsweg

4.1 Grundlegendes Vorgehen

Die in Kapitel 3 formulierte Zielsetzung lässt sich durch verschiedene Konzepte realisieren. In einem ersten Schritt erfolgt die Analyse der unterschiedlichen Randbedingungen und Situationen, in denen Stützstruktur erforderlich ist. Anschließend werden zwei Lösungsansätze vorgestellt und deren Eigenschaften sowie Fertigungsoptionen verglichen. Um die Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen zu ermitteln, werden Methoden der statistischen Versuchsplanung eingesetzt. Auf Basis der nach Versuchsplan gefertigten und ausgewerteten Proben entsteht ein mathematisches Modell der Effekte und Wechselwirkungen, welches eine Einschätzung der Haltekraft zwischen Bauteil und Stützkonstruktion erlaubt. Für die praktische Anwendung werden anschließend die Entfernung der Stützkonstruktion sowie bekannte Problemstellungen und Abhilfemaßnahmen anhand von Demonstratoren diskutiert. Weiterhin werden die Potenziale der Technik für dauerhafte Verbindungen anhand verschiedener Beispiele und einer Versuchsreihe aufgezeigt. Ein Vergleich mit den aufgestellten Anforderungen und Wünschen schließt das Kapitel.

4.2 Das Konzept Mikroverzahnung

Der Begriff Mikroverzahnung wird im Rahmen dieser Arbeit als eine formschlüssige Verbindung zwischen Bauteil und Stützstruktur definiert, welche ein oder mehrere sich wiederholende Wirkelemente besitzt, die sich über nicht mehr als zwei Bauteil-lagen erstrecken. Dies stellt für das FLM-Verfahren die kleinste Wirkeinheit dar, da mindestens zwei benachbarte Schichten für die Herstellung einer formschlüssigen Schnittstelle erforderlich sind. Abbildung 4.1 zeigt den grundlegenden Lösungsansatz mit einer Überlappung von Bauteil und Stützkonstruktion, die eine Verzahnung miteinander eingehen.

Für die Entwicklung der formschlüssigen Stützstrukturen wird explizit diese kleinstmögliche Schnittstelle angestrebt, da die Beeinflussung des Bauteils mit steigender

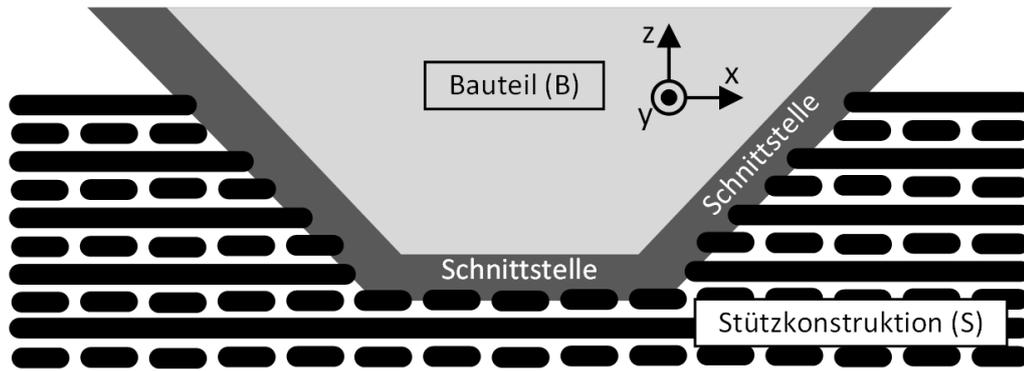


Abb. 4.1: Konzept der Mikroverzahnung zwischen Bauteil und Stützkonstruktion

Größe der Wirkelemente zunimmt. Ein weiterer entscheidender Vorteil gegenüber größeren Formschlusselementen, deren Platzierung abhängig von der Modellgeometrie problematisch sein kann, ist die bessere Eignung für eine verallgemeinerte Lösung, die keinen manuellen Eingriff erfordert. Eine einfache Ausprägung reduziert überdies den softwaretechnischen Aufwand, da möglichst wenige Sonderfälle und Fallunterscheidungen beispielsweise bei der Orientierung der Elemente berücksichtigt werden müssen. Es wird daher eine Lösung gesucht, die einen allgemein funktionsfähigen Ansatz für die nachfolgenden Fälle bietet.

4.2.1 Fallunterscheidungen

Insgesamt werden die drei nachfolgenden Fallunterscheidungen betrachtet, die Einfluss auf die geometrische Ausprägung des Formschlusses im Bereich der Schnittstelle haben. Der Einsatz der Stützkonstruktion unterliegt stets einer Kombination dieser Fälle. Dabei können auch innerhalb eines größeren zusammenhängenden Stützbereichs Kombinationen wie flache und steile Winkel dicht nebeneinander und in Wechselwirkung miteinander auftreten.

Flache und steile Winkel

Grundsätzlich besteht ein Unterschied darin, welchen Überhangwinkel das Bauteil an der jeweils abzustützenden Fläche besitzt. Insgesamt wird ein Bereich von 0° bis 45° betrachtet, da bei größeren Winkeln auch bei problematischen Baumaterialien in den meisten Fällen keine Stützkonstruktion erforderlich ist. Innerhalb dieses Bereichs werden Überhangwinkel von 0° bis $22,5^\circ$ als flache Winkel und solche zwischen $22,5^\circ$ und 45° als steile Winkel definiert. Die Notwendigkeit der Unterscheidung wird anhand eines in Abbildung 4.2 dargestellten Beispiels erläutert.

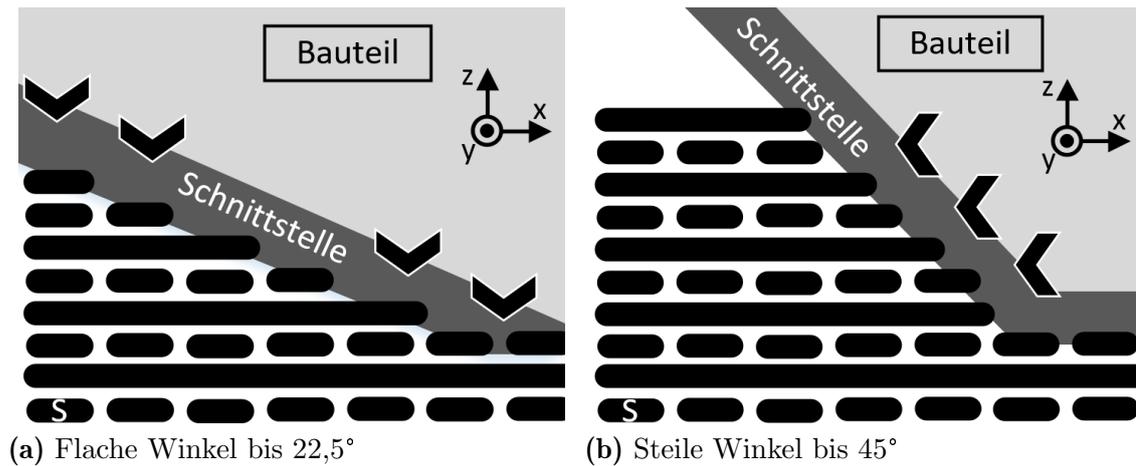


Abb. 4.2: Unterscheidung zwischen flachen ($0^\circ - 22,5^\circ$) und steilen ($22,5^\circ - 45^\circ$) Winkel

Die ersten Lagen des Bauteils auf der Stützkonstruktion besitzen keinen oder nahezu keinen seitlichen Halt, insbesondere gibt es keine Fixierung der aufgetragenen Schmelze durch das unterliegende Stützmaterial. Anders als bei stoffschlüssigen Verbindungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Baumaterial am Stützmaterial haftet. Im Extremfall ist die Adhäsion des Materials an der Düse so hoch, dass es sich an dieser sammelt und nicht abgelegt wird. Für die Aufnahme von Kräften, die aus der Schrumpfung des Baumaterials resultieren, ist überdies eine belastbare Verbindung mit der Stützkonstruktion erforderlich. Selbst auf einer horizontalen Ebene, die einem Überhangwinkel von 0° entspricht und keine seitliche Fixierung bietet, muss eine sichere formschlüssige Verbindung mit der Stützkonstruktion aufgebaut werden. Bei Bauteilen, die im Bereich der Schnittstelle steilere Winkel und weniger Plateaus aufweisen, ist hingegen die seitliche Fixierung entscheidend.

Der Übergang zwischen den zwei genannten Fällen ist fließend. Die Bedeutung der horizontalen Verbindung nimmt mit steigendem Winkel zu, während der Einfluss der vertikalen abnimmt. Für die in Abschnitt 4.2.4 vorgestellten Grundkonzepte zum Aufbau der Verzahnung ergeben sich aus der Fallunterscheidung jeweils abweichende Ausprägungen.

Stützkonstruktion beginnt auf der Bauplatte oder der Bauteiloberfläche

Eine Stützkonstruktion kann auf der Bauplatte oder einer Oberseite des Bauteils beginnen. Die Grundkonzepte müssen diese Fälle berücksichtigen und nutzen unterschiedlich ausgeprägte Schnittstellen, um den Formschluss aufzubauen. Insbesondere bei einer Stützkonstruktion, die auf einer Bauteiloberfläche beginnt, ist die Quali-

tät der Oberfläche kritisch zu betrachten. Die formschlüssigen Elemente müssen stets eine zusätzliche Materialanordnung darstellen, welche nach dem Prozess entfernt werden kann. Das Druckobjekt nimmt daher immer ein größeres Volumen ein als das gewünschte Bauteil. Geometrische Manipulationen zwecks Herstellung der formschlüssigen Verbindung, die am fertigen Bauteil verbleiben müssen, werden als unzulässig angesehen, falls sie die üblicherweise erreichbare Genauigkeit des Verfahrens von 0,1 mm bis 0,2 mm überschreiten.

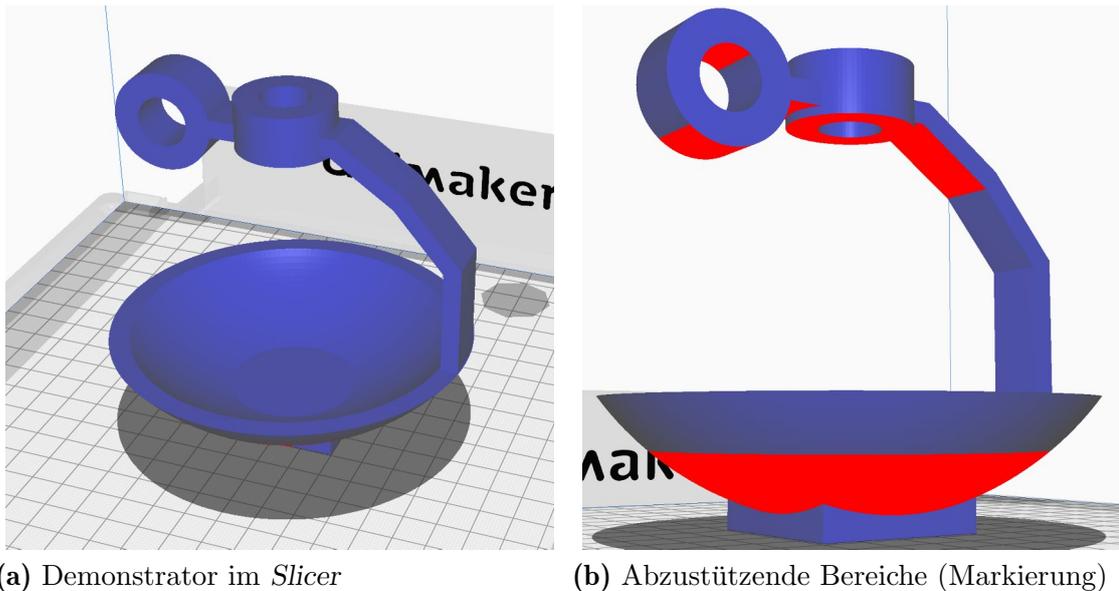


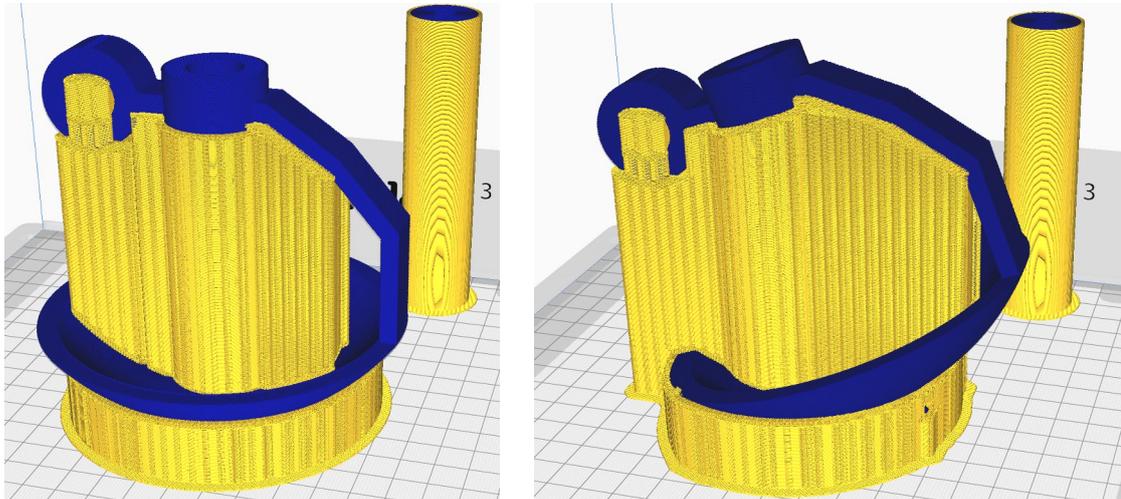
Abb. 4.3: Demonstrator mit einem abzustützenden max. Überhangwinkel von 45°

In Abbildung 4.3 sind beide Fälle dargestellt, die an realen Teilen in abweichenden Ausprägungen auftreten können. Die untere Schale benötigt eine Stützkonstruktion, die auf der Bauplatte beginnt, während die zwei ringförmigen Ausprägungen eine Verbindung mit der Struktur auf der Bauteiloberseite erforderlich machen. Kavitäten sind Sonderfälle, die ohne zusätzliche Werkzeuge wie Bohrer, Durchschläge oder Spitzzangen schlecht oder überhaupt nicht zugänglich sind. Einerseits führt dies zu einer problematischen Entfernung, andererseits können beispielsweise Bohrungen mit geringem Durchmesser eine eigene Art des Formschlusses darstellen. Bei verzweigten Geometrien können dem Stützmaterial ebenfalls alle Bewegungsmöglichkeiten genommen werden, sodass es in diesen Fällen fixiert ist.

Stützinsel oder stabilisierende Verbindung zur Bauplatte

Eine problematische Konfiguration sind konkave Oberflächen, die nach oben geöffnet sind. Das Stützmaterial baut in diesen Fällen keine zusätzliche Verbindung zur umliegenden Stützkonstruktion auf und muss daher eine ausreichende Verbindung mit

der Oberfläche des Bauteils eingehen (vgl. Fälle 4.4). Da diese jedoch möglichst wenig beeinflusst werden soll und dennoch eine sichere Fixierung der Stützkonstruktion erforderlich ist, muss ein Kompromiss gefunden werden.



(a) Insel ohne Verbindung zur Bauplatte (b) Stabilisierender Verbindung zur Bauplatte

Abb. 4.4: Stützzinsel auf einer konkaven Oberfläche und Verbindung von Inseln

4.2.2 Anforderungen an die Mikroverzahnung

Während in Kapitel 3 die übergeordneten Ziele für die Stützkonstruktion dargestellt sind, werden nachfolgend die Kriterien zusammengefasst, die sich auf die Eigenschaften der Mikroverzahnung beziehen. An diese formschlüssige Struktur bestehen spezifische Wünsche und Forderungen, welche für die Bewertung und Auswahl der Konzepte herangezogen werden.

- (a) Kleinstmögliche Oberflächenbeeinflussung
- (b) Sicherer Halt (insbesondere bei Inseln im Bereich der Schnittstelle)
- (c) Möglichst universelles Konzept (wenig Sonderfälle)
- (d) Möglichst einfaches Trennen von Bauteil und Stützkonstruktion
- (e) Keine Modifikationen am Drucksystem erforderlich
- (f) Robust gegenüber Störgrößen (Verfahren soll keine überdurchschnittlich präzise Maschine voraussetzen)

- (g) Kontur des Bauteils soll innerhalb des Druckteils liegen (alle Formschlusselemente sind dem Bauteil hinzugefügt und können manuell entfernt werden, um die Zielkontur herzustellen)

4.2.3 Entfernen der Stützkonstruktion

Da es sich bei der entwickelten Verzahnung um eine formschlüssige Verbindung handelt, kann eine Entfernung der Stützkonstruktion nur durch eine elastische oder plastische Verformung der Verbindungselemente erfolgen. Abbildung 4.5 zeigt den Vorgang anhand einer schematischen Darstellung. In Abhängigkeit der Geometrie von Bauteil und Stützstruktur müssen auch hier zwei verschiedene Situationen betrachtet werden. Der grundlegende Fall liegt vor, wenn die Formschlusselemente in Richtung der primären Ausprägungsrichtung getrennt werden können. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn keine andere Stützkonstruktion diese Trennbewegung behindert. Gibt es beispielsweise eine verbundene Struktur auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils, so kann diese das Entformen behindern. Es ist dann nötig, das Material ausreichend zu verformen oder wegzubrechen, um das Auslösen der Gegenseite zu ermöglichen.

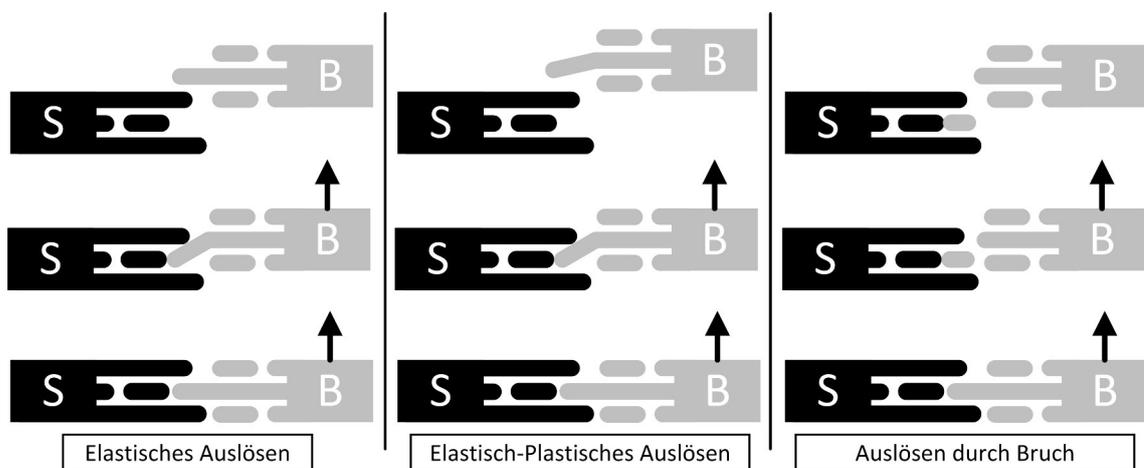


Abb. 4.5: Drei Fälle des Auslösemechanismus bei der formschlüssigen Stützkonstruktion

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass sowohl die Verbindung des einzelnen Formschlusselements als auch die makroskopische Situation bei der Betrachtung verschiedener Konzepte berücksichtigt werden müssen. Aus dem Zusammenhang lässt sich bereits in dieser Entwicklungsphase die Forderung nach einer Segmentierung der Stützkonstruktion ableiten, sodass diese einfacher entfernt werden kann (vgl. Abbildung 4.6). Erfahrungsgemäß kann das Trennen der Struktur insbesondere bei duktilen Werkstoffen aufwändig sein und zusätzliches Werkzeug erforderlich machen. Um ein Einfallen der ersten Bauteillagen in den Trennspace zu vermeiden, sollte die

relativ dünne und damit flexible Schnittstelle aus Stützmaterial trotzdem eine verbundene Oberfläche aufweisen. Falls der Spalt ausreichend klein gestaltet wird, kann auf diese Maßnahme u. U. verzichtet werden. Ein Auflösen der Struktur ist bei der Wahl eines geeigneten Stützmaterials ebenfalls möglich.

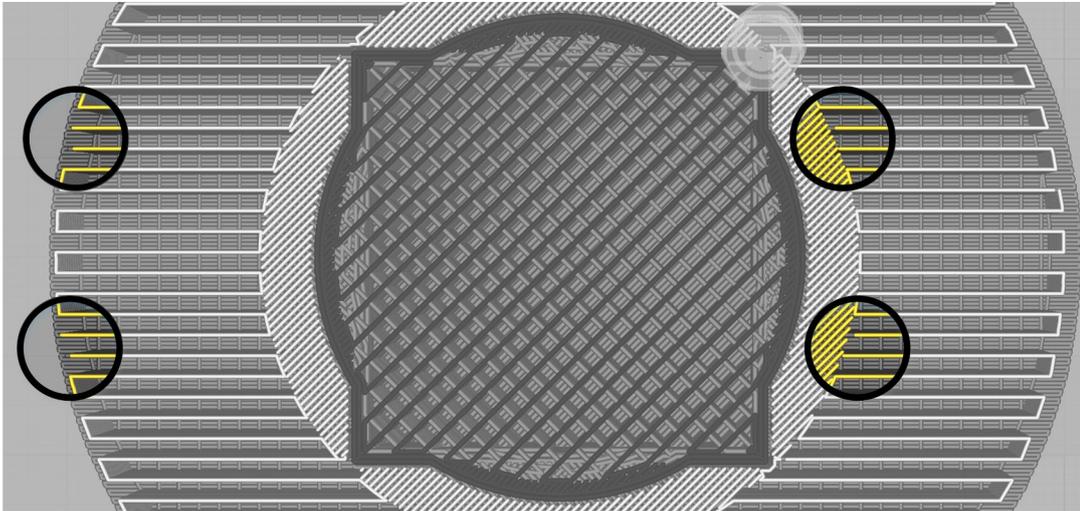


Abb. 4.6: Gesteuerte Unterbrechung der Füllung der Stützkonstruktion im *Slicer*

4.2.4 Betrachtung verschiedener Grundkonzepte

Für den Aufbau der Mikroverzahnung werden zwei verschiedene Grundkonzepte betrachtet, die auf unterschiedlichen Mechanismen basieren. Dabei beschreiben die Konzepte nicht die geometrische Ausprägung der formschlüssigen Elemente, sondern das Verfahren, mit dem diese erzeugt werden. Die zwei nachfolgend vorgestellten Konzepte sind die *druckgeprägte* und die *modellgeprägte Verzahnung*.

Bei der **druckgeprägten Verzahnung** wird der durch den Filamentantrieb aufgeprägte Druck in der Heißkanaldüse genutzt, um das Material in Lücken und Poren der Stützkonstruktion eindringen und sich dort formschlüssig ausprägen zu lassen. Die notwendigen Randbedingungen werden durch eine überhöhte Extrusionsmenge relativ zum freien Volumen unterhalb und seitlich der Düse erzeugt. Der Vorgang ist in Abbildung 4.7a dargestellt.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass alle generierbaren Spalte und Poren eine abgerundete Kontur darstellen. Neben der Oberflächenspannung des Polymers und der kreisförmigen Kontur der Düse gibt es keinen äußeren Einfluss, der eine abweichende Form des Stranges bewirkt. Ein unter diesen Bedingungen entstehender Spalt zwischen zwei Bahnen wird sich erwartungsgemäß zunächst mit einem Radius verengen und anschließend näherungsweise konstant bleiben oder wieder vergrößern. Es ist ebenfalls zu erwarten, dass sich mit tieferem Eindringen des Baumaterials

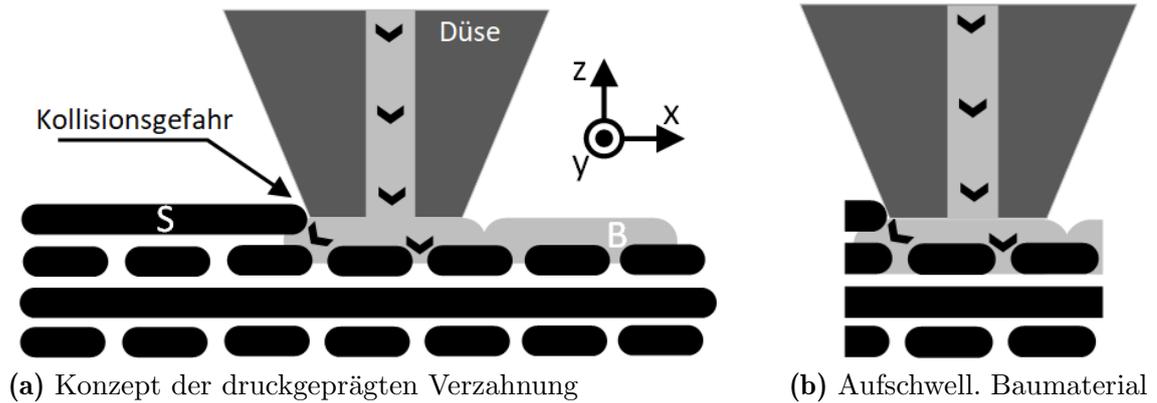


Abb. 4.7: Aufbau der druckgeprägten Mikroverzahnung

eine stärkere Fixierung des Bauteils, aber auch eine aufwändigere Entfernung der Stützkonstruktion einstellt. Bei besonders hoher Eindringtiefe ist das in Abbildung 4.7b dargestellte Aufschwellen des Baumaterials, das eine besonders hohe Haltekraft verspricht, möglich. Das Verfahren setzt einerseits voraus, dass ausreichend Druck aufgebaut werden kann, damit das Polymer in das Gitter der Stützstruktur eindringt. Andererseits müssen entstehende Spalte im Düsenbereich ausreichend Fließwiderstand bieten, um ein übermäßiges Fließen der Schmelze in unwirksame Richtungen zu verhindern.

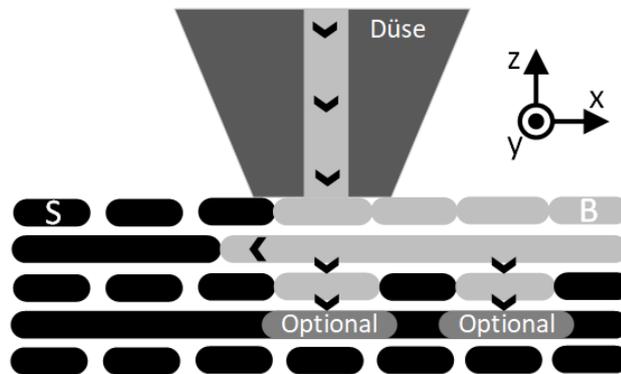


Abb. 4.8: Aufbau der modellgeprägten Verzahnung mit ein- und zweilagiger Verankerung

Die **modellgeprägte Verzahnung** basiert auf Hinterschneidungen, die bereits im Modell vorhanden sind oder im *Slicer* hinzugefügt werden. Sie werden direkt als Kontur des Bauteils und der Stützkonstruktion gefertigt. Bei diesem Verfahren ist kein höherer Druck der Schmelze erforderlich, um ein Eindringen in Spalte oder Poren zu ermöglichen. Die Größe der Hinterschneidungen wird als primärer Faktor für die Stärke der Fixierung des Bauteils eingeschätzt. Abbildung 4.8 zeigt mögliche Ausprägungsformen für flache und steile Winkel, um die modellgeprägte Variante herzustellen.

4.2.5 Bewertung der Konzepte

Im Rahmen dieser Untersuchung wird nur eines der zuvor vorgestellten Konzepte ausgearbeitet. Daher wird an dieser Stelle eine Gegenüberstellung und Bewertung beider Konzepte durchgeführt, sodass eine begründete Auswahl erfolgen kann.

Bei der **druckgeprägten Verzahnung** muss der Druckkopf keine vom Bauteil abweichende Kontur abfahren, um die Verzahnung auszuprägen. Daher sind weniger Oberflächenfehler durch Bahnabweichungen zu erwarten, die häufig an engen Kurven der abgelegten Bahnen beobachtet werden können. Die Ursache hierfür sind i. d. R. hohe Beschleunigungen in Kombination mit unzureichend steifen Maschinengestellen. Da das Baumaterial in die Zwischenräume der Stützkonstruktion fließt, können die Verbindungen besonders fein ausgeführt werden (vgl. Abb. 4.7). Auch eine Düse mit einem Durchmesser von 0,4 mm kann einen Spalt zwischen zwei ebenso breiten Bahnen von wenigen 0,01 mm erzeugen. Die Umsetzung in einer Software zur Manipulation eines G-Codes ist vergleichsweise einfach, da keine zusätzlichen Bahnen generiert werden müssen. Lediglich der Abstand zwischen Düse und Bauteil sowie die extrudierte Menge müssen als primäre Stellgrößen modifiziert werden. Abbildung 4.7 zeigt einen weiteren Vorteil bei flachen Überhangwinkeln und insbesondere bei horizontalen Flächen des Bauteils. Die Stützstruktur kann hier als Gitter ausgeführt werden, in welches das Baumaterial eindringen kann. Da die Bahnen eine abgerundete Außenkontur haben, bietet sich die Möglichkeit, nach ca. einer Eindringtiefe von einer halben Lagenhöhe ein Aufschwellen zu erreichen. Hierbei wird der Aufbau einer besonders stabilen Verbindung erwartet, die u. U. nicht mehr sinnvoll zu trennen ist. Die Verbindung bei steilen Überhangwinkeln kann beispielsweise durch eine offene gitterartige Struktur, in die das Baumaterial eingepresst wird, erreicht werden. Insgesamt wird das Verfahren als besonders robust gegenüber Positionier- und Dosierfehlern eingestuft, da das Material durch den Druck auch in nicht ideal abgebildete Konturen fließt oder bei zu hohem Druck in andere Richtungen ausweicht.

Nachteilig ist die zusätzliche Anforderung eines ausreichenden Schmelzedrucks bzw. einer gesteigerten Vorschubkraft des Filamentantriebs. Erfordert das Verfahren eine zu hohe Vorschubkraft, so kann daraus ein Durchrutschen des Antriebs oder ein Verstopfen der Heißkanaldüse durch aufsteigende Schmelze in den gekühlten Bereich resultieren. Die Viskosität der Schmelze ist überdies sowohl vom eingesetzten Polymer als auch von der Extrusionstemperatur und vielen weiteren Faktoren abhängig. Diese Abhängigkeit kann eine spezifische Einstellung auf den jeweiligen Prozess nötig machen, was dem Optimierungsziel eines universell einsetzbaren Verfahrens widerspricht. Ebenfalls negativ werden die möglichen Kollisionsprobleme mit dem

Vorteile	Nachteile
Feinere Strukturen als Düsendurchmesser realisierbar, daher wird eine geringere Beeinflussung der Oberfläche erwartet	Extrusionssystem muss erhöhten Druck aufbauen können
Einfache Lösung für flache Winkel	Effekt abhängig von der Viskosität des Baumaterials
Einfache Umsetzung in Software	Ausprägung bei steilen Winkeln eher zufällig
Robust bei Positionierfehlern und Dosierfehlern des Druckkopfes (selbstregulierend)	Mögliche Kollisionsprobleme, wenn der Düsenabstand geringer als Lagenhöhe eingestellt werden muss
Geringe Beeinflussung der Bauteilgeometrie	
Tendenziell schnellerer Aufbau des Druckobjektes ohne zusätzliche Bahnen	

Tab. 4.1: Vor- und Nachteile der druckgeprägten Verzahnung

Stützmaterial gewertet. Da die Anzahl der Wechsel zwischen Bau- und Düsenmaterial so gering wie möglich ausfallen sollte, stellen moderne *Slicer* immer zwei Lagen eines Materials vor dem Materialwechsel fertig. Solange die Lagen beider Materialien die gleiche Dicke haben, ergibt sich hieraus keine Kollisionsgefahr. Für die druckgetriebene Verzahnung kann es allerdings erforderlich sein, den Düsenabstand zur Stützkonstruktion absichtlich geringer einzustellen, um das Eindringen des Baumaterials in die Leerräume des Gitters zu begünstigen. Werden die Lagen in diesem Fall nicht in einer spezifischen Reihenfolge abgelegt, so kann der Rand der Düse mit dem bereits abgelegten Stützmaterial kollidieren und Schäden am Fertigungssystem verursachen. Die Kollisionsproblematik ist ebenfalls in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Vor- und Nachteile sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Bei der **modellgeprägten Variante** werden keine zusätzlichen Anforderungen an das additive Fertigungssystem gestellt, welche über die üblichen Aspekte des konventionellen Druckens mit zwei verschiedenen Materialien hinausgehen. Ebenfalls ist positiv zu werten, dass die Eigenschaften des Baumaterials sowie dessen Viskosität keinen signifikanten Einfluss auf die Erzeugung der Verzahnung haben. Durch die vorbestimmte Platzierung jedes formschlüssigen Elements durch eine definierte Bewegung des Druckkopfes sowie die Extrusion einer berechneten Materialmenge besteht tendenziell eine bessere Kontrolle über die entstehende Verzahnung. Kollisionen können ebenfalls im Vorfeld ausgeschlossen werden. Für steile Überhangwinkel liegt

die in Abbildung 4.8 dargestellte Variante der Stützkonstruktion nahe und erscheint zielführend. Die Stützstruktur stellt dabei eine geschlossene Hülle dar, welche der Kontur des Bauteils konzentrisch folgt und abwechselnd mit dieser verzahnt ist.

Vorteile	Nachteile
Ohne gesteigerte Anforderungen an das Drucksystem umsetzbar	Formschlusselemente tendenziell größer, da durch Düsendurchmesser limitiert
Eigenschaften des Baumaterials haben keinen signifikanten Einfluss auf das Verfahren	Lösungen für flache Winkel umfassen eine zusätzliche Lage
Bessere Kontrolle über die entstehende Verzahnung	Softwarelösung bzw. Vorbereitung der Modelldatei tendenziell aufwändiger
Bietet eine einfache Lösung für steile Winkel	Reagiert empfindlicher auf unpräzise Maschinenkalibrierung sowie allgemeine Fertigungstoleranzen
Keine Kollisionsproblematik	Größerer Oberflächenfehler bei flachen Winkeln

Tab. 4.2: Vor- und Nachteile der modellgeprägten Verzahnung

Für flache Winkel entsteht hierdurch jedoch eine deutliche stufenartige Ausprägung der Bauteilkontur, die eine starke Beeinflussung der Oberfläche darstellt. Die manuelle Vorbereitung des Modells bzw. die softwaretechnische Lösung zu dessen automatischer Vorbereitung wird voraussichtlich aufwändiger ausfallen als bei der druckgeprägten Variante, da die formschlüssigen Elemente entlang der Kontur des Bauteils generiert werden müssen. Für sehr flache Winkel und insbesondere bei horizontalen Flächen muss eine zusätzliche Verbindungslage als Basis für den Formschluss vorgesehen werden. Die Haftung dieser Lage kann nicht wie bei der druckgeprägten Variante unmittelbar bei der Ablage des Baumaterials aufgebaut werden, sondern entsteht erst im Zusammenspiel mit dem Stützmaterial der nächsten Lage. Dadurch besteht die Gefahr eines vorzeitigen Ablösens dieser Schicht. Überdies bedingt dieses Vorgehen die Beeinflussung einer zusätzlichen Schicht, in der ein Wechsel zwischen den Materialien stattfinden muss. Für das gesamte Bauteil betrachtet ergibt sich hierdurch ein Mehraufwand an verbrauchten Materialien sowie eine Vergrößerung der Schnittstelle zwischen Bau- und Stützmaterial. Beide Eigenschaften werden negativ bewertet. Um die möglichst kleinen Formschlusselemente entsprechend dem Modell zu positionieren, wird eine exakte Dosierung und Ablage beider Polymere vorausgesetzt. Das Verfahren wird daher als weniger robust gegenüber maschinenbedingten Fertigungsfehlern eingeschätzt.

Zusammenfassende Einschätzung und Auswahl

Die Bewertung zeigt, dass es keine Ausschlusskriterien für eines der Konzepte gibt. Tatsächlich werden auch nach genauerer Betrachtung beide Verfahren als grundsätzlich sinnvoll und aussichtsreich eingeschätzt. Beide Konzepte können auf unterschiedliche Bedürfnisse angepasst werden, indem die Stärke der Verbindung in einem Spektrum von nahezu kraftloser Trennbarkeit bis hin zu einer unlösbaren Verklammerung ähnlich einer Nietverbindung eingestellt werden kann. Für die Bewertung ausschlaggebend ist die erreichbare Qualität des Bauteils sowie die Robustheit des Verfahrens. Die problematische und vermutlich gröbere Ausprägung der formschlüssigen Elemente insbesondere bei flachen Überhangwinkeln im Fall der modellgetriebenen Variante werden daher als gewichtiges Argument bewertet. Hier wird eine zusätzliche Lage beeinflusst und ein häufigerer Materialwechsel ist erforderlich. Bei der druckgeprägten Variante können hingegen feinere Strukturen erzeugt werden, deren Querschnitt kleiner als der Düsendurchmesser ist und die dennoch eine sichere Fixierung des Baumaterials versprechen. In ersten Vorversuchen hat sich der Aufbau eines ausreichenden Schmelzedrucks als unproblematisch erwiesen. Auch bei Antriebskonzepten, die nur eine vergleichsweise geringe Vorschubkraft des Filaments aufbauen können, zeigt sich diese Anforderung als erfüllbar. Dennoch ist die Abhängigkeit von der Viskosität bei der druckgeprägten Variante durchaus als negativ zu werten. **Aus den genannten Gründen wird die druckgeprägte Verzahnung weiterverfolgt.** Mischformen, die das eine Konzept beispielsweise für flache und das andere für steile Überhangwinkel in Kombination einsetzen, werden als Ausblick in Abschnitt 6.2 beschrieben.

4.3 Ausarbeitung der Schnittstellen

4.3.1 Strömung der Schmelze und Druckaufbau

Abbildung 4.9 zeigt die grundlegende Situation bei der Ablage einer Bahn. Die Vorschubkraft des Filaments bewirkt einen Druck im Heißkanal, welcher abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit durch die Düse und weiteren Faktoren reduziert wird. Die erste zentrale Annahme ist, dass mit sinkendem Strömungsquerschnitt der Spalten ein erhöhter Druck erforderlich ist, um das Material bei gleicher Durchflussrate in diese eindringen zu lassen. Dieser Umstand findet bei der Auslegung des Gitters der Stützkonstruktion Berücksichtigung. Die Schmelze hat dabei mehrere Richtungen, in die sie fließen kann, und wird primär dem Weg des größten Strömungsquerschnitts

folgen. Bei ungünstiger Wahl der Zustellung zwischen Düse und Stützkonstruktion in der xy-Ebene ist daher ein übermäßiges Hochquellen des Baumaterials im Düsenbereich möglich.

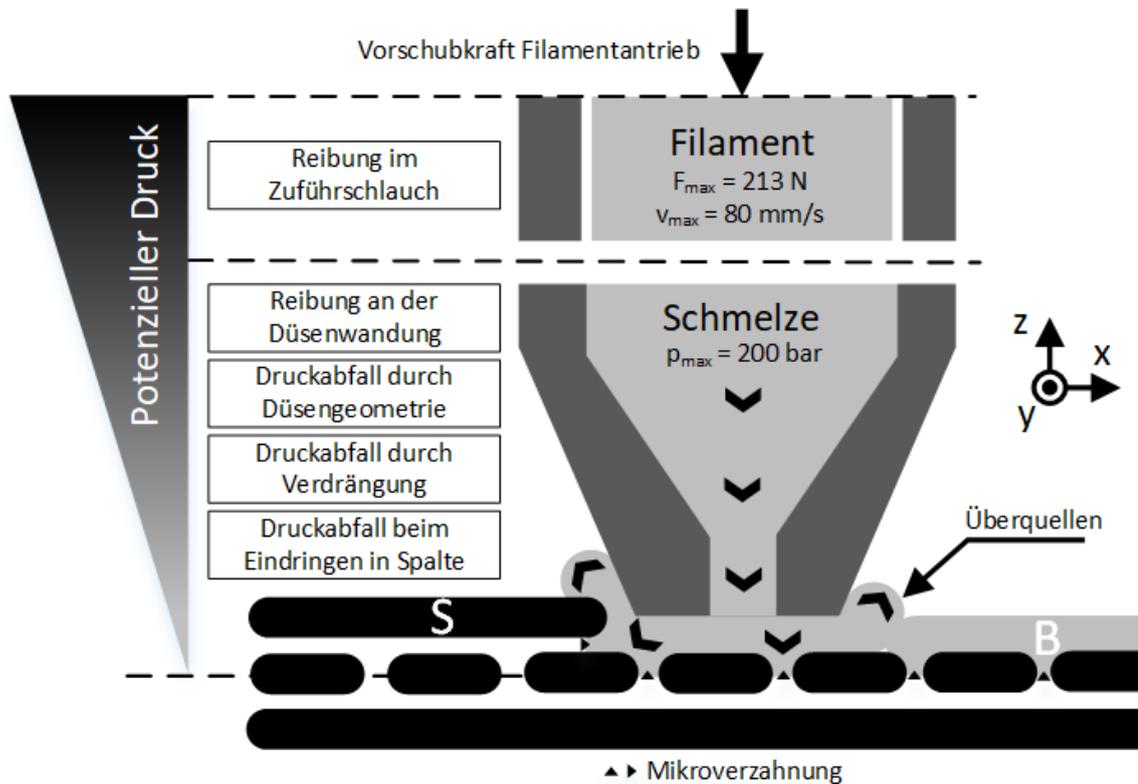


Abb. 4.9: Grundprinzip beim Aufbau der druckgeprägten Mikroverzahnung

Um wirksamen Druck aufzubauen, muss weniger freies Volumen unterhalb der Düse vorhanden sein als Kunststoffschmelze extrudiert wird. Dieses Differenzvolumen ist die Basis für den Aufbau der Mikroverzahnung. Aus diesem Zusammenhang lassen sich die zwei möglichen Optionen zur Beeinflussung unmittelbar ableiten. Zum einen kann die Extrusionsmenge gesteigert werden, zum anderen kann der Spalt durch eine Zustellung der Düse verringert werden. Auch eine Kombination der beiden Modifikationen ist denkbar und wird in Abschnitt 4.6 im Rahmen der empirischen Untersuchung geprüft.

Um eine Basis für die zu erwartenden Prozessgrößen und erreichbaren Drücke zu schaffen, werden diese nachfolgend für zwei exemplarische Extrusionssysteme abgeschätzt und in Tabelle 4.3 gegenübergestellt. Die Auslegung des ersten Systems entspricht dem in dieser Arbeit zur Probenfertigung eingesetzten *Ultimaker 3 (UM 3)* von *Ultimaker BV*, der einen Filamentdurchmesser von 2,85 mm und einen sogenannten *Bowden-Extruder* verwendet. Bei diesem Konzept ist der Filamentantrieb am Maschinenrahmen befestigt und schiebt das Filament durch einen flexiblen Schlauch aus Polytetrafluorethylen (PTFE) in den Druckkopf, der die Heißkanaldüse

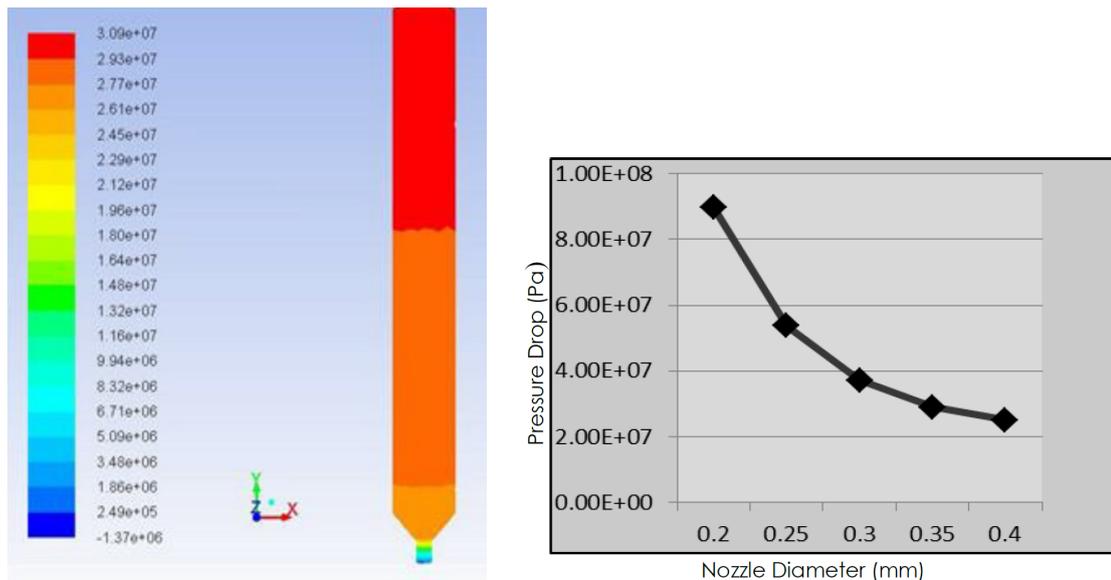
	<i>Bowden</i> -Extruder	Direkt-Extruder
Parameter	Filament \varnothing 2,85 mm	Filament \varnothing 1,75 mm
Motormoment	30 Ncm	15 Ncm
Übersetzung	3,2	3
\varnothing Förderrad	9 mm (einseitig)	5 mm (beidseitig)
Überlastfall	Durchreiben d. Filaments	Schrittverluste Motor
Ideale Vorschubkraft	213 N	180 N
Mech. Wirkungsgrad	75 %	90 %
Erwartete Vorschubkraft	160 N	162 N
\varnothing Schmelzkanal	3,2 mm	2 mm
Schmelzedruck	200 bar	520 bar

Tab. 4.3: Prozesskenngrößen zweier unterschiedlicher Extrusionssysteme

entlang der programmierten Bahnen führt. Das zweite System ist für Filamente mit einem Durchmesser von 1,75 mm ausgelegt und führt den kompakt konstruierten Filamentantrieb direkt am Druckkopf mit. Antrieb und Heißkanaldüse sowie weitere Funktionsgruppen wie zusätzliche Lüfter sind bei diesem Konzept üblicherweise direkt in einem Gehäuse integriert. Die in Tabelle 4.3 aufgeführten Leistungsdaten sind an den Extruder des Typs *BMG* von *Bondtech AB* angenähert, welcher das Filament mit zwei vergleichsweise kleinen Förderrädern beidseitig antreibt. Alle weiteren Parameter beider Systeme sind aus eigener Erfahrung abgeschätzt und an reale Konfigurationen angelehnt.

Der Vergleich zeigt, dass für den erreichbaren Druck im Schmelzbereich der Filamentdurchmesser bzw. der daraus resultierende Durchmesser des Schmelzkanals entscheidend sind. Das Extrusionssystem mit *Bowden*-Extruder erreicht einen theoretischen Druck von ca. 200 bar, während jenes mit direktem Antrieb über 500 bar aufbauen kann. Damit stecken die zwei Systeme in grober Näherung das am Markt übliche Spektrum an Lösungen für die Extrusion von Filamenten bzgl. des erreichbaren Drucks ab. Zwischen diesen zwei Randpunkten existiert eine Vielzahl von Konzepten, bei denen die Umsetzung der Teilfunktionen variiert. So sind beispielsweise *Bowden*-Extruder mit beidseitig antreibenden Förderrädern für einen Filamentdurchmesser von 1,75 mm erhältlich.

[Bel02], [RCL08], [MSI09] und [PSM18] haben u. a. den Druckverlust im Schmelzbereich durch Prozesssimulationen berechnet und erhalten Druckdifferenzen, die



(a) Druckverlust von 300 bar

(b) Einfluss des Düsendurchmessers

Abb. 4.10: Druckverlust in der Heißkanaldüse bei versch. Düsendurchmessern [SAB16]

unter Berücksichtigung der eingesetzten Thermoplaste und Randbedingungen in der gleichen Größenordnung wie die auf Basis des Antriebssystems ermittelten Drücke liegen (vgl. Tabelle 4.3). Abbildung 4.10 zeigt zwei Ergebnisse aus der Untersuchung von [SAB16] über die Abhängigkeit von Druckverlusts und Düsendurchmessers. Im linken Bild ist der simulierte Verlauf des Schmelzedrucks für ein Filament aus Polylactide (PLA) mit einem Durchmesser von 1,8 mm bei einer Wandtemperatur des Schmelzekanals von 160 °C, einer Vorschubgeschwindigkeit des Filaments von 3 mm/s und einem Düsendurchmesser von 0,4 mm dargestellt. Mit den gegebenen Randbedingungen ergibt sich eine Druckdifferenz von ca. 300 bar, die gegenüber Umgebungsdruck am Düsenaustritt angegeben ist. Die rechte Abbildung zeigt die Abhängigkeit vom Düsendurchmesser für fünf verschiedene Einstellungen von 0,2 mm bis 0,4 mm. Kleinere Düsen als 0,4 mm führen dabei mit fallendem Querschnitt schnell zu einem erheblichen Druckabfall von bis zu über 600 bar, der mit den üblichen Filamentantrieben nicht aufzubauen ist.

Die Zusammenführung der Kenndaten der Antriebe sowie der zu erwartenden Druckdifferenzen liefert eine Erklärung für die Etablierung von Düsen mit einem Durchmesser von 0,4 mm als Standardkonfiguration bei den meisten Druckern. Sie stellt einen günstigen Kompromiss zwischen der Dimensionierung der antreibenden sowie schmelzeführenden Komponenten und der erreichbaren Auflösung des Fertigungsprozesses dar. Der reale Druckabfall ist von vielen weiteren Faktoren wie dem Winkel der Düsenverengung und den rheologischen Eigenschaften des verwendeten Thermoplasts abhängig [RCL08].

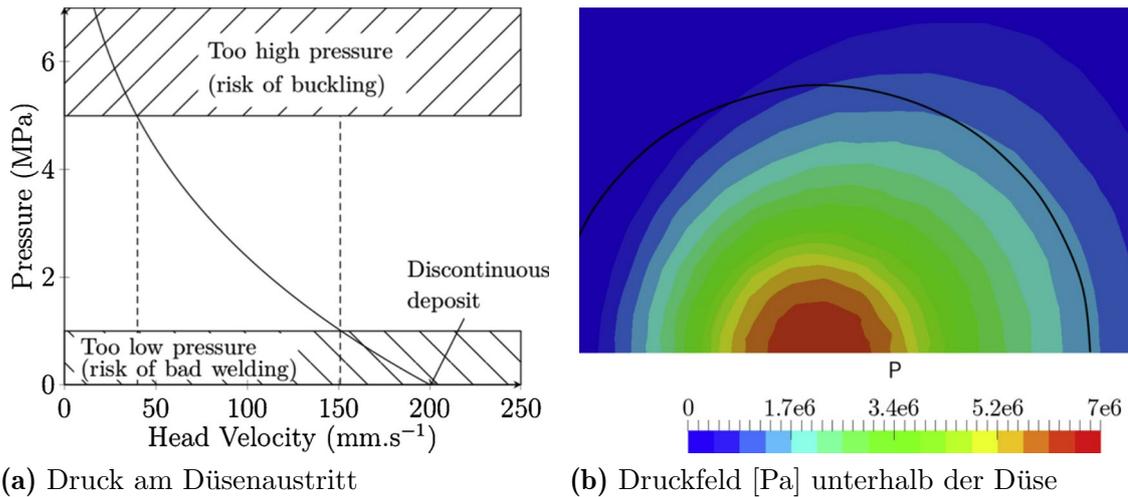


Abb. 4.11: Druck am Düsenaustritt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Druckkopfes und Druckverteilung innerhalb der abgelegten Bahn (Vorschubrichtung links) [APS19]

Unterhalb der Düse fließt das Material je nach gewählter Bahnbreite in die Breite und dringt anschließend aufgrund der Begrenzungen in das Gitter der Stützkonstruktion ein. [APS19] haben den Verlauf des Drucks unterhalb einer Düse mit einem Durchmesser von 0,4 mm für ABS bei einer Schmelztemperatur von 230 °C und einem Materialvorschub von u. a. 32 mm/s simuliert. Abbildung 4.11a zeigt einen Graphen, bei dem der sich einstellende Druck am Düsenaustritt P_0 gegenüber der Geschwindigkeit des Druckkopfes aufgetragen ist. Mit zunehmender Geschwindigkeit des Druckkopfes fällt der verfügbare Druck, wobei die Grenzen für die Betrachtung bei 5 MPa (Gefahr des Ausknickens des Filaments) und 1 MPa (zu geringer Druck für den Lagenverbund) gesetzt werden. Der gesamte Druck, der durch den Filamentantrieb aufgebaut werden muss, ist die Summe von P_0 , dem Druckverlust in der Heißkanaldüse und den mechanischen Verlusten, die am festen Filament entstehen [APS19]. Bei der rechten Darstellung 4.11b ist das sich einstellende Druckfeld unterhalb der Düse abgebildet. Der Düsenaustritt ist mit einem Durchmesser von 0,4 mm im inneren Bereich bei den höchsten Drücken zu finden, während die dünne schwarze Linie die Außenkontur der Düse darstellt. Da die Betrachtung auf halber Höhe der abgelegten Bahn stattfindet, können auch höhere Drücke als der der Umgebung außerhalb der Kontur der Düse vorliegen. Die Untersuchung von [APS19] zeigt weiterhin, dass sich durch eine Verringerung der Bahnbreite eine erhebliche Reduzierung des Druckabfalls realisieren lässt.

Aus den beschriebenen Zusammenhängen können mehrere qualitative Schlüsse für eine vorteilhafte Maschinenauslegung und Prozessführung zum Aufbau der druckgeprägten Verzahnung gezogen werden. Zum einen sind der Einsatz eines Filaments mit einem Durchmesser von 1,75 mm und eines beidseitig antreibenden Extruders,

der im Druckkopf integriert ist, im Sinne eines maximalen Schmelzedrucks vorteilhaft. Der Düsendurchmesser sollte nach Möglichkeit 0,4 mm nicht unterschreiten und darf größer gewählt werden, während die Bahnbreite gering gehalten wird, um einen übermäßigen Druckverlust zu vermeiden. Für die Bahnen, die Teil der Schnittstelle zwischen Bauteil und Stützkonstruktion sind, ist eine geringere Fließgeschwindigkeit der Schmelze beispielsweise durch eine lokale Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfes sinnvoll. Durch diese Maßnahme lässt sich der Druckverlust innerhalb der Heißkanaldüse voraussichtlich reduzieren, sodass mehr Druck für den Aufbau der Verzahnung zur Verfügung steht. Weiterhin kann ergänzt werden, dass die Leerstellen in der Stützkonstruktion einen ähnlichen oder größeren Strömungsquerschnitt besitzen sollten als die radialen Ausweichmöglichkeiten der Schmelze, um ein ausgeprägtes Eindringen in die Struktur zu begünstigen. Der Extremfall ist erreicht, wenn die Düse so positioniert wird, dass der Schmelze nur der Weg in die Stützstruktur bleibt und alle anderen Strömungswege nahezu vollständig verschlossen werden. Druckspitzen, welche den Filamentantrieb überlasten und die Förderung des Filaments abbrechen können, werden in dieser Situation u. U. nicht abgebaut. Gleiches gilt sinngemäß, wenn das Gitter aus Stützmaterial zu kleine Strömungsquerschnitte bietet. Der in dieser Arbeit zur Probenfertigung eingesetzte *Ultimaker 3* ist auf Basis der dargestellten Zusammenhänge eher im unteren Spektrum der verfügbaren Drücke einzuordnen.

Um die Ausprägung der Mikroverzahnung bestimmen und auslegen zu können, wird der Zusammenhang zwischen der Haltekraft von Referenzproben und den relevanten Faktoren mittels empirischer Versuche in Abschnitt 4.6 ermittelt. Die gewählten Faktoren beeinflussen die Größe des Freiraums unterhalb der Düse (*Zustellung xy* [mm] und *Zustellung z* [mm]), die Steigerung der extrudierten Menge (*Extrusionsmenge* [%]) und die Dichte des Gitters der Stützkonstruktion (*Gitterdichte* [%]). Für alle weiteren Einflussgrößen werden für den konventionellen Prozess übliche Einstellungen verwendet. Weiterhin wird die entstehende Verzahnung nach der Zugprüfung optisch untersucht und bewertet.

4.3.2 Lösung der Fallunterscheidungen

Flache und Steile Winkel

Der Übergang von flachen in steile Überhangwinkel ist fließend, sodass die daran gekoppelten Wirkmechanismen stets in Kombination aber mit unterschiedlicher Stärke auftreten. Winkel von 0° bis $22,5^\circ$ werden als flache Winkel und solche von $22,5^\circ$ bis 45° sowie darüber hinaus als steile Winkel definiert (vgl. Definition und Begrün-

derung in Abschnitt 4.2.1). Über 45° ist in der Regel keine Stützkonstruktion mehr erforderlich.

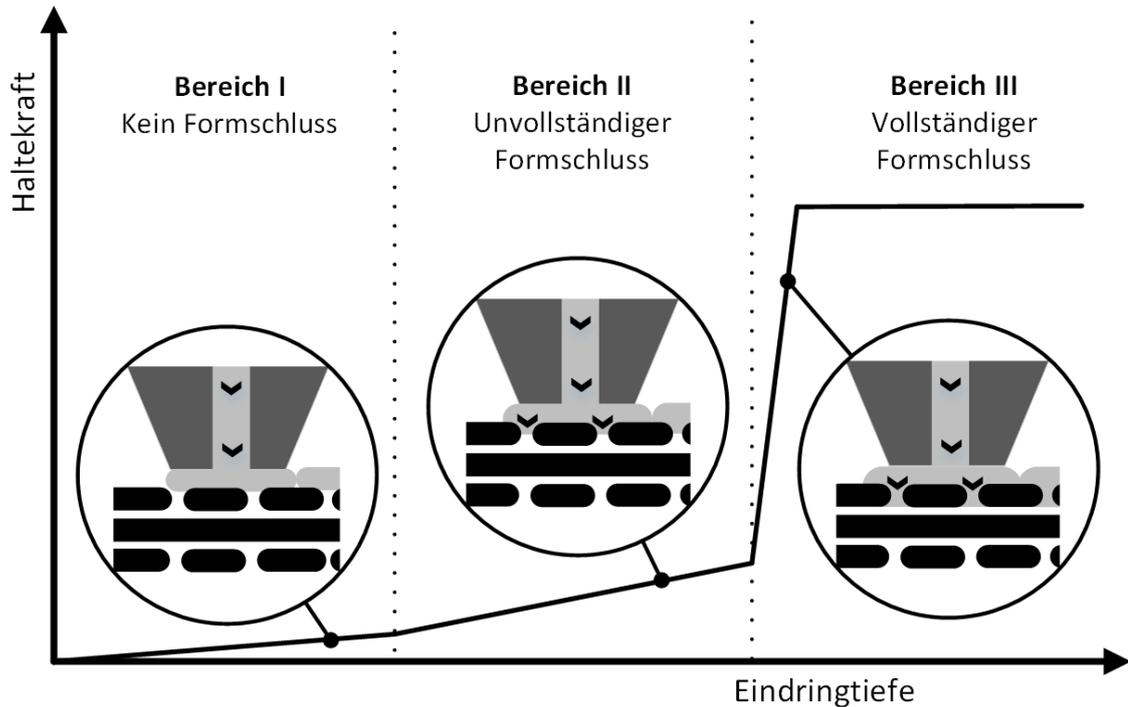


Abb. 4.12: Erwartete Haltekraft in Abh. der Eindringtiefe bei flachen Winkeln

Bei **flachen Winkeln** wirken die Spalte der Stützkonstruktion als Ankerpunkte, in die das Material primär in vertikaler Richtung eingepresst wird. Insbesondere bei Bauteilkonturen, welche Plateaus besitzen, deren Orientierung näherungsweise der der xy-Ebene entspricht, ist dieser Fall entscheidend. Die Situation des Einpressens ist in Abbildung 4.12 im Detail dargestellt. Bis zu einer Eindringtiefe, die der halben Bahnhöhe entspricht, ist das einzelne Stützelement unvollständig formschlüssig ausgeprägt. Erst wenn die Tiefe größer als die Hälfte der Bahnhöhe wird, kann durch ein Aufschwellen des Polymers nach Durchfließen der Engstelle eine vollständig formschlüssige Verbindung entstehen. Der treibende Mechanismus, der zur Verbreiterung des extrudierten Stranges führt, ist das sogenannte Aufschwellen nach der Düse bzw. hier nach dem Durchfließen der Engstelle zwischen den Bahnen. Der Effekt basiert auf der unvollständigen Relaxation des Polymers nach der Extrusion. Sobald der Schmelzkanal einen größeren Querschnitt annimmt, bauen die Polymermoleküle einen Teil der Spannungen durch die Formänderung in Richtung des Ausgangszustandes vor der Verengung ab. Dieses viskoelastische Verhalten der Thermoplaste ist von verschiedenen Faktoren wie der Formänderungsgeschwindigkeit, der Schmelztemperatur und der durchschnittlichen Länge der Molekülketten abhängig. Es ist zu erwarten, dass sich insbesondere im Bereich einer Eindringtiefe von einer halben Bahnhöhe im Übergang vom unvollständigen zum vollständigen Formschluss star-

ke Veränderungen in der Haltekraft ergeben. Der erwartete Zusammenhang ist in Abbildung 4.12 qualitativ dargestellt und lässt sich in folgende Bereiche einteilen:

- (I) Das Baumaterial liegt mit nur leichtem Andruck auf der gitterartigen Stützkonstruktion. Dabei ist keine oder nur eine geringe Anhaftung zu erwarten. Es liegt unvollständiger Formschluss vor, der zur vorzeitigen Ablösung des Materials während des Drucks oder unmittelbar bei der Aufbringung der ersten Bauteilschicht führt.
- (II) Das Baumaterial erreicht eine stärkere Ausprägung der Verzahnung als im Bereich I, wobei weiterhin ein unvollständiger Formschluss vorliegt. Dieser reicht allerdings aus, um ein kritisches Ablösen zu verhindern. Abschnitt II ist grundsätzlich als Zieleinstellung für die formschlüssige Stützkonstruktion geeignet. Für Materialien, welche eine besonders starke Fixierung benötigen, ist allerdings Bereich III zu bevorzugen. Der Beginn dieses Bereich bzw. das Ende von Bereich I sind nur durch Versuche zu bestimmen, während der Übergang zu Bereich III durch eine Eindringtiefe von einer halben Bahnhöhe definiert werden kann. Das Lösen der Verbindung erfolgt überwiegend durch eine elastische Verformung.
- (III) Im Bereich III liegt vollständiger Formschluss vor. Der extrudierte Strang besitzt eine Verbreiterung nach der Engstelle im Gitter der Stützkonstruktion, wobei die Kraft zum Trennen der Verbindung geringer ist als die Festigkeit des Materials im dünnsten Querschnitt. Das Material lässt sich ohne Abreißen des eingedrungenen Baumaterials durch elastische sowie plastische Verformung entfernen. Mit zunehmender Eindringtiefe wird die Ausprägung der Verzahnung so stark, dass sie nicht mehr zerstörungsfrei aus der Stützstruktur gelöst werden kann. Bei Entfernung reißt das Baumaterial ab und verbleibt teilweise oder vollständig im Gitter der Stützstruktur. Prinzipiell ist ein Abreißen oder Abscheren dieser Verbindungen unkritisch, da sie lediglich zusätzliches Baumaterial darstellen, welches nicht Teil der finalen Bauteilkontur ist. Die Haltekraft kann im Bereich III allerdings so groß werden, dass eine manuelle Entfernung nur unter Einsatz von Werkzeugen und größerer Krafteinwirkung sowie mit Beschädigung des Bauteils möglich ist. Auch mit höherer Eindringtiefe ist keine weitere Steigerung der Haltekraft zu erwarten, da nicht die Verzahnung sondern die Festigkeit des Materials den limitierenden Faktor darstellt. Dieser Fall im Bereich III eignet sich nicht für den Einsatz als Stützkonstruktion, bietet aber Potenzial für dauerhafte Verbindungen von Thermoplasten, die keine stoffschlüssige Verbindung eingehen.

Für Bereich III soll ein einfaches Rechenbeispiel verdeutlichen, wie hoch die potenzielle Haltekraft bei ungünstig gewählten Einstellungen werden kann. Eine quadratische Schicht eines Bauteils mit einer Kantenlänge von 20 mm besitzt eine Querschnittsfläche von 400 mm^2 . Bei einem Füllungsgrad der Stützkonstruktion von 80 % ergibt sich eine wirksame Fläche der Freiräume in den verbleibenden 20 % von 80 mm^2 , die durch Baumaterial ausgefüllt werden. Als Baumaterial wird ein exemplarischer Thermoplast mit einer Zugfestigkeit von 50 N/mm^2 angenommen. Unter idealen Bedingungen ergibt sich hierdurch eine Haltekraft von 4000 N. Beim FLM-Verfahren werden insbesondere in z-Richtung nur deutlich reduzierte Zugfestigkeiten gegenüber den Materialkennwerten erreicht. Allerdings führt selbst eine Reduzierung der angenommenen Zugfestigkeit zwischen den Lagen um 50 % zu einer Haltekraft von 2000 N. Für eine manuelle Entfernung der Stützkonstruktion sind diese Werte deutlich zu hoch, insbesondere da es sich im Beispiel um eine vergleichsweise kleine Kontaktfläche handelt. Bereich III eignet sich mit zunehmender Eindringtiefe daher eher für die dauerhafte Verbindung von Thermoplasten, die keine stoffschlüssige Verbindung eingehen. Das Potenzial wird anhand einer Versuchsreihe in Abschnitt 4.10 bewertet.

Bei **steilen Winkeln** entstehen unterschiedliche Kontaktsituationen in Abhängigkeit der Orientierung der Stützkonstruktion zur Bauteilkontur. Die Problemstellung ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

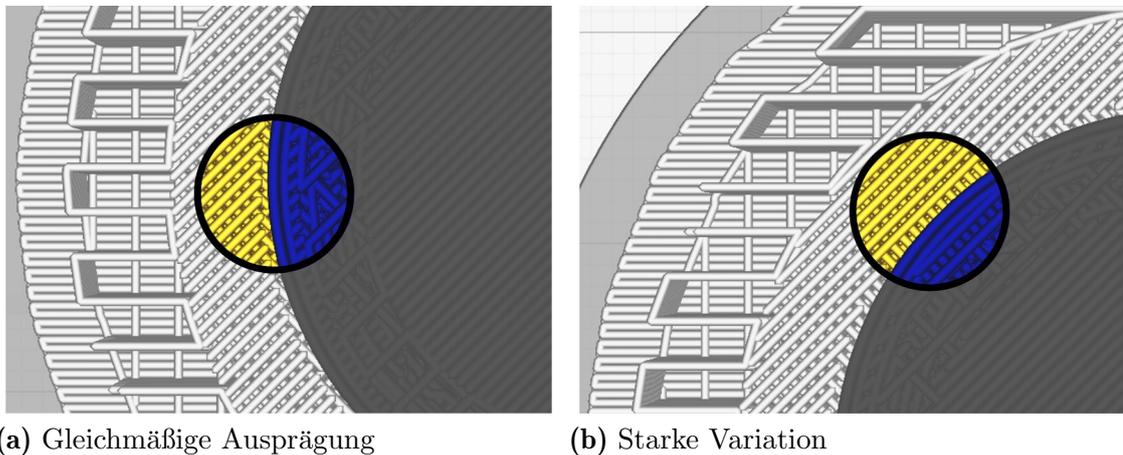


Abb. 4.13: Variierende Kontaktsituation in Abhängigkeit der Bauteilkontur

In der linken Abbildung verläuft die Bahn des Bauteils in einem Winkel von ca. 45° zur Orientierung der Stützkonstruktion. Hieraus ergeben sich gleichmäßige Leerstellen, in die das Material eindringen kann. Durch die sich wiederholende Rotation des Musters um 90° entsteht in der jeweils nächsten Schicht eine vergleichbare Situation. Daher ist dieser Fall gut kontrollierbar und bietet in jeder Schicht eine gleichbleibende Ausprägung der formschlüssigen Verbindung. Die Haltekraft erreicht in jeder

Schicht näherungsweise die gleiche Stärke. Der andere Extremfall ist die Orientierung der Stützkonstruktion um weitere 45° , sodass das Muster in einer Lage orthogonal auf der Außenseite der Bahn endet und in der nächsten Schicht tangential zu dieser verläuft. Die orthogonale Orientierung wird als unkritisch angenommen, während die tangentialen zwei ungünstige Eigenschaften besitzt. Einerseits bietet der Verlauf der Stützkonstruktion keine fixierenden Leerstellen, die durch Baumaterial besetzt werden können. Nach der Grundidee des Konzepts kann so zumindest lokal keine Kontur mit ausreichendem Formschluss ausgeprägt werden. Andererseits führen die diskreten Abstände zwischen den Bahnen der Stützstruktur zu unterschiedlichen Distanzen zwischen diesen und der Außenbahn des Bauteils (vgl. Abbildung 4.13b). Je nach Ausprägung und Positionierung des Modells im *Slicer* können daher sehr unterschiedliche Haltekräfte am Umfang der Bauteilkontur entstehen. Grundsätzlich schafft die schichtweise Rotation zwischen den Lagen Abhilfe. Bei Baumaterialien, die eine starke Fixierung voraussetzen, kann diese Situation u. U. zu lokalen Ablösungen führen. Ein Konzept für ein optimiertes Ablegemuster wird in Abschnitt 6.2 beschrieben.

Konturen von realen Bauteilen stellen nahezu in allen Fällen eine komplexe Mischung verschiedener Oberflächenwinkel dar. Eine Optimierung der Ausrichtung des Bauteils durch den Nutzer kann daher nur in trivialen Fällen als angemessene bzw. wirksame Maßnahme genannt werden. Anders als bei flachen Winkeln kann die genaue Ausprägung der formschlüssigen Elemente nicht einheitlich bestimmt werden, da diese unmittelbar von der geometrischen Ausprägung von Bauteil und Stützkonstruktion an jeder Kontaktstelle innerhalb einer Lage sowie der vorherigen und nächsten Lage abhängen. Grundsätzlich ist eine schuppenartige Struktur an der Bauteilunterseite zu erwarten, die abgestützt wird. Der Aufbau des Formschlusses wird bei steilen Winkeln primär durch das horizontale Eindringen in das Gitter der Stützkonstruktion erreicht. Zusätzliche Haltekraft kann durch nachfolgende Schichten aufgebaut werden, welche das bereits abgelegte Material weiter einschließen. Der theoretische Verlauf einer in z-Richtung angreifenden Haltekraft bezogen auf die Eindringtiefe ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

- (I) Im Bereich I liegt kein Formschluss vor, sodass sich das Bauteil vorzeitig im Druckprozess lösen kann. Das Baumaterial dringt nicht ausreichend tief in die Leerstellen der Stützkonstruktion ein, um eine ausreichende Haltekraft aufzubauen. Dieser Bereich ist höchstens für Materialien geeignet, die eine reine Abstützung und nahezu keine niederhaltende Kraft benötigen.
- (II) Im Bereich II besitzt das Baumaterial einen unvollständig ausgeprägten Formschluss, der bereits eine ausreichende Haltekraft für bestimmte Baumaterialien

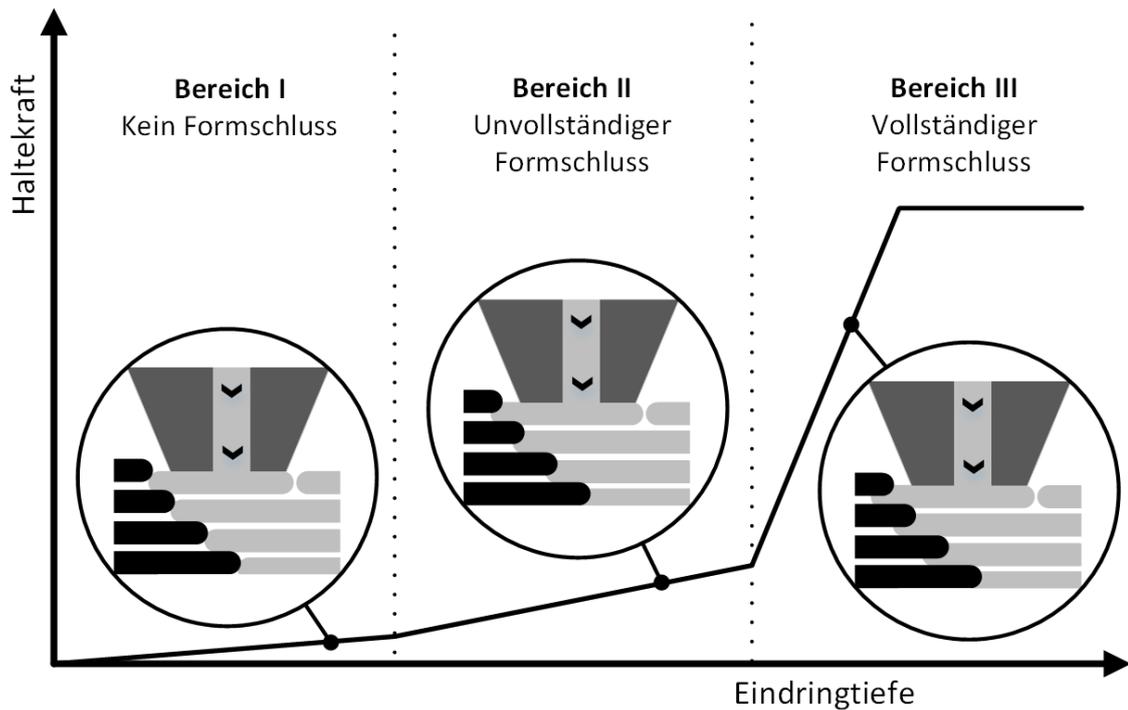


Abb. 4.14: Erwartete Haltekraft in Abh. der Eindringtiefe bei steilen Winkeln

en besitzt. Unter Belastung können Bauteil und Stützkonstruktion durch eine überwiegend elastische Verformung der Verbindung ohne Materialbruch getrennt werden. Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt die Haltekraft zu, bis Bereich III erreicht ist.

- (III)** Im Bereich III erfolgt das Trennen der Verbindung zunehmend durch die plastische Deformation. Die Haltekraft nimmt dabei deutlich zu und erreicht mit zunehmender Eindringtiefe ein Maximum, wenn die nötige Kraft zum Auslösen der Verzahnung die Festigkeit des Baumaterials übersteigt und ein Abscheren erfolgt. Auch mit höherer Eindringtiefe ist keine weitere Steigerung der Haltekraft zu erwarten. Ein Aufschwellen spielt bei den steilen Winkeln aufgrund der Ausprägung des Stützgitters voraussichtlich eine untergeordnete Rolle, während hohe Haltekraft überwiegend durch das Umschließen des Baumaterials durch nachfolgende Lagen erreicht werden.

Stützkonstruktion beginnt auf Bauteiloberfläche oder Bauplatte

Die Startzone der Stützstruktur spielt eine entscheidende Rolle, da die Schnittstelle eine gitterartige Geometrie aufweisen muss. Für Stützbereiche, die auf der Bauplatte beginnen, kann die Oberfläche ohne Berücksichtigung des Bauteils ausgelegt werden. Deutlich kritischer ist die Bauteiloberseite als Startzone, da diese nicht als

offenes Gitter ausgeführt werden kann. Da diese Oberfläche nach der Entfernung aller Stützkonstruktionen dem Ursprungsmodell entspricht und damit frei von Leerstellen sein soll, ist eine solche Beeinflussung der Kontur unzulässig. Beide Fälle werden nachfolgend betrachtet und gelöst.

Für den **Fall einer auf der Bauplattform beginnenden Struktur** wird eine offene Gitterstruktur gewählt, in die das Material eindringen kann. *Cura* bietet dieses Ablegemuster als Typ *Linie* an. Dieses Muster eignet sich besonders, da es sowohl für die flachen als auch die steilen Winkel Zwischenräume bietet, in die Material eindringen kann. Grundsätzlich sind auch andere Varianten denkbar, bei denen die einzelnen Bahnen zwischen den Enden nicht verbunden sind und so Leerstellen bieten. Typ *Linie* ist allerdings aufgrund der einfachen Bahnen, die nur eine Beschleunigung und Verzögerung an der Start- bzw. Endpunkten erforderlich machen, besonders schnell zu fertigen. Durch die abwechselnde Rotation des Ablegemusters zwischen den Schichten um 90° wird eine mechanisch stabile Struktur aufgebaut, die gut steuerbare Zwischenräume für das Eindringen des Baumaterials bietet.

Abbildung 4.15 zeigt das Muster im *Slicer* anhand der Stützkonstruktion eines Demonstrators. Maßgeblich für die Ausprägung der Verzahnung ist die *Gitterdichte* als Quotient der Breite der abgelegten Bahnen und des Abstandes zwischen diesen, wobei ein vollständig geschlossenes Gitter einem Wert von 1 bzw. 100 % und ein Spalt zwischen den Bahnen gleich der Bahnbreite einem Wert von 0,5 bzw. 50 % entsprechen.

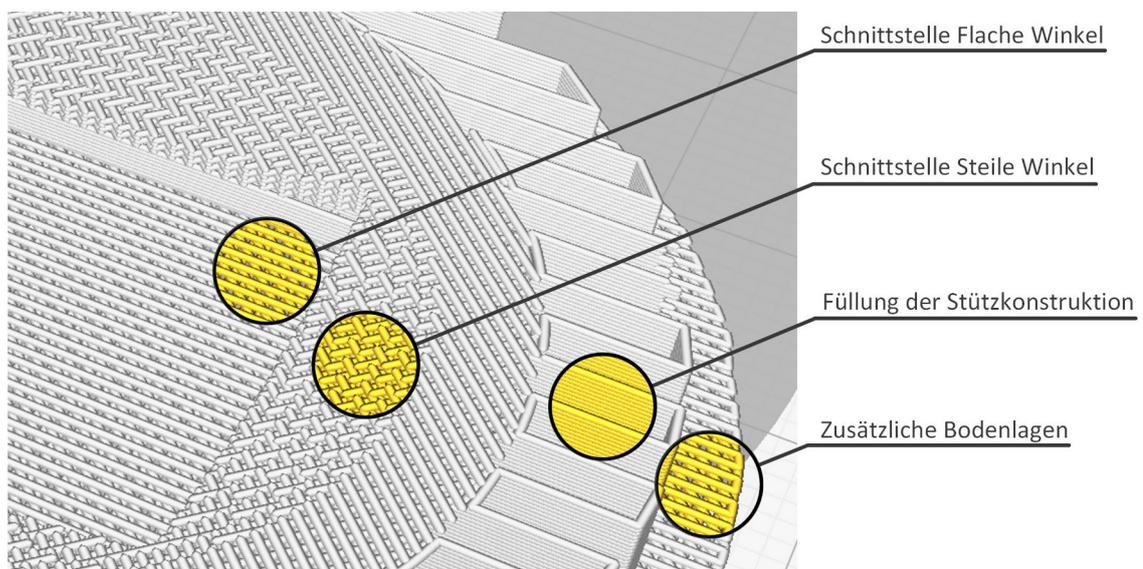


Abb. 4.15: Aufbau der Stützkonstruktion bei Stützstruktur auf der Bauplatte

Bei einer **Stützkonstruktion, die auf einer Bauteiloberseite beginnt**, wird eine zusätzliche Verbindungsstruktur auf dem Bauteil aus Baumaterial aufgebracht. Dies ist ein Kompromiss, da die direkte Modifikation des Bauteils ausgeschlossen wird.

Die zusätzliche Struktur kann später entfernt und das eingegebene Modell erhalten werden. Nachteilig ist die zumindest teilweise stoffschlüssige Verbindung der unteren Schnittstelle der Stützkonstruktion und der Bauteiloberseite. Es ist zu erwarten, dass nach der Entfernung des Stützmaterials kleinere Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche zurückbleiben.

Es existieren verschiedene Methoden, um diese Fehlstellen möglichst gering zu halten. Anders als bei Bauteilunterseiten, die auf einer Stützkonstruktion abgelegt werden, ist im vorliegenden Fall keine vollflächige Abstützung, sondern nur die mechanische Verankerung der Verbindungsschicht nötig. Die stoffschlüssige Verbindung benötigt hierzu nur eine sehr geringe Kontaktfläche bzw. räumlich verteilte Kontaktpunkte, um diese Anforderung zu erfüllen. Ein leichtes Einfallen in die gitterartige Struktur kann akzeptiert werden, solange die noch aufgeschmolzenen Bahnen nicht die Bauteiloberfläche berühren und diese beeinflussen. *Cura* bietet die Möglichkeit, eine gestufte Stützkonstruktion als Schnittstelle auf der Bauteiloberseite zu generieren (vgl. Abbildung 4.16). Diese Anpassung der unteren Schnittstelle ist eine günstige Option, um die beschriebene Verbindungsstärke bei geringer Beeinträchtigung der Oberfläche zu erreichen. Für die so gefertigte Verbindung gelten abgesehen von der abweichenden Verankerung die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei Stützstrukturen, die auf der Bauplattform beginnen. Die Problemstellung des Formschlusses bei diesem Fall kann daher in eine allgemeine Lösung überführt werden, wodurch das Beschreibungsmodell und der Einsatz der Technik vereinfacht werden. Alternative Ansätze, um den Kompromiss zu lösen, werden für weiterführende Untersuchungen in Abschnitt 6.2 beschrieben.

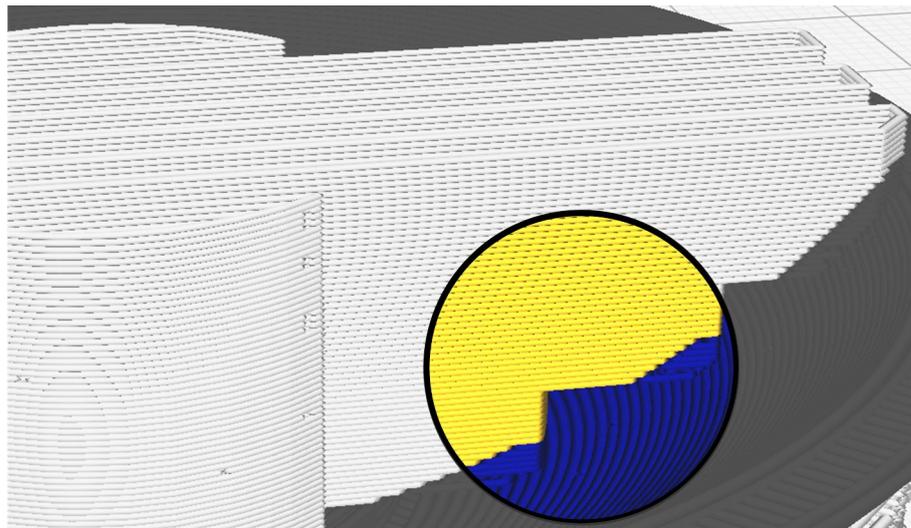


Abb. 4.16: Aufbau der Stützkonstruktion (hell) auf einer Bauteiloberseite (dunkel)

Insel oder stabilisierende Verbindung zur Bauplatte

Stützkonstruktionen, die auf der Oberseite eines Bauteils beginnen und nicht mit anderer Stützkonstruktion verbunden sind, stellen mit dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ansatz ebenfalls keinen Sonderfall mehr da. Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine ausreichende Stabilität gerade bei kleinen Inseln sichergestellt wird. Mit zunehmender Distanz zwischen unterer Schnittstelle und abzustützender Bauteilkontur können durch Berührung der Düse und Vibrationen der Anlage Kräfte auftreten, welche die formschlüssige Verbindung deformieren und lösen. Um die Stützstruktur besser an Bauteil anzubinden, wird die Schnittstelle im *Slicer* die Bauteilkontur umfließend um wenige Millimeter vergrößert (siehe Abb. 4.17). Die gleiche Maßnahme wird für kleinere Inseln aus Stützstruktur angewandt, um die Verbindung mit der Bauplattform zu optimieren und die Robustheit der Struktur zu steigern.

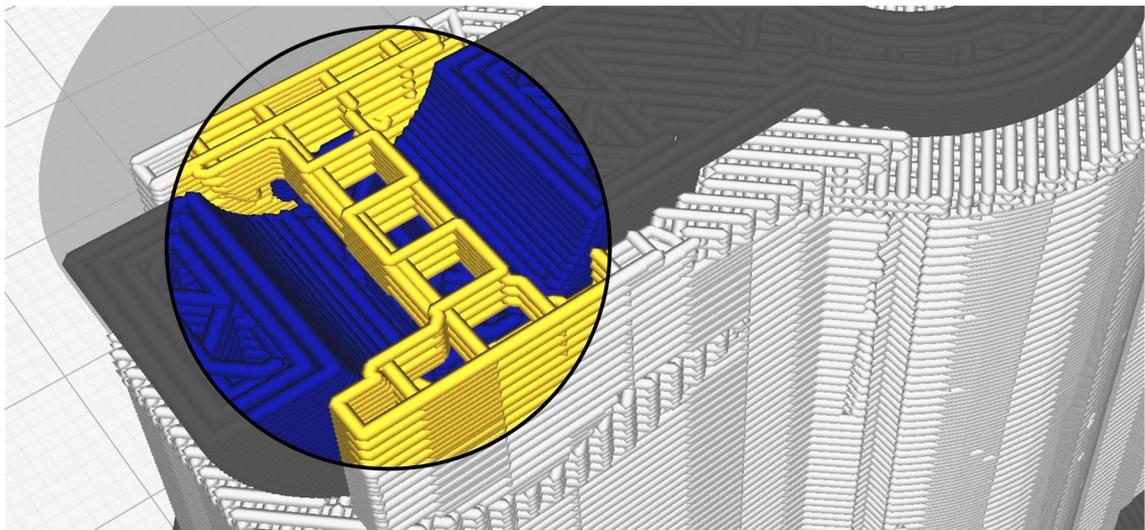
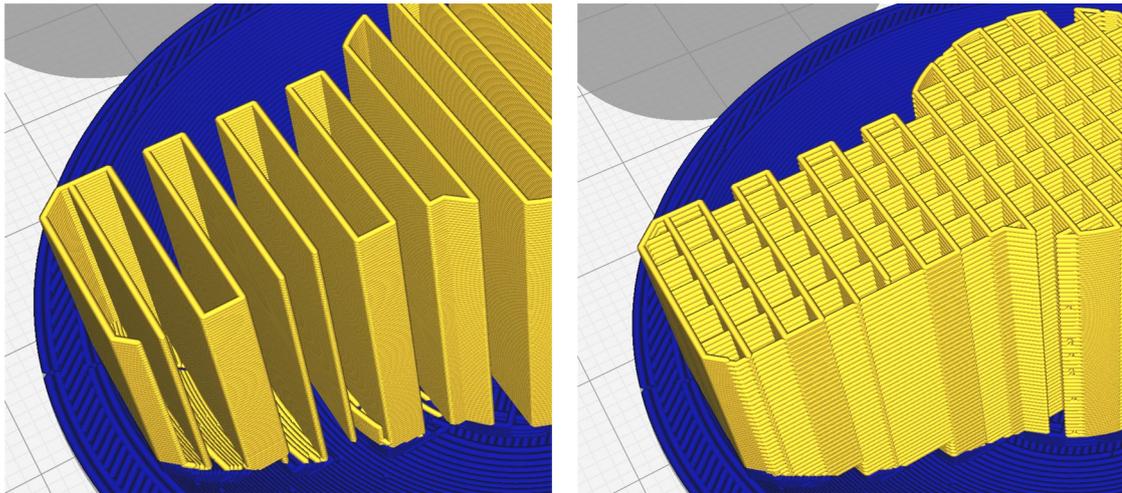


Abb. 4.17: Verbundene Stützkonstruktion zur Stabilisierung der Stützinsel

4.3.3 Füllung der Stützkonstruktion

Die Füllung der Stützstruktur wird als rotiertes Gitter mit verbundenen Umkehrpunkten ausgeführt. Da dieser Teil der Struktur nur mit der unteren und oberen Schnittstelle verbunden ist, sind verschiedene Optionen denkbar. Ein bestmögliches Verhältnis von Gewicht und Stabilität bieten die Typen *Gyroid* oder *Honeycomb*, welche durch biologische Strukturen inspiriert sind. Die Wahl fällt allerdings auf eine einfachere Struktur mit der Bezeichnung *ZigZag*, da diese eine gleichmäßigere Füllung der Kontaktfläche zu den Schnittstellen besitzt. Bei der Basisform dieses Musters wird die Grundorientierung allerdings nicht mit dem Wechsel der Lage um

einen Winkel rotiert, sodass gerade bei in z-Richtung betrachtet langen Stützkonstruktionen eine instabile Struktur entsteht, die sich unter Last leicht verformt. Für die Untersuchung wird daher eine lagenweise Rotation um 90° eingestellt, die in einer stabileren Ausprägung resultiert. Ebenfalls führt die Rotation durch die Überkreuzung der aktuellen und der vorherigen Lage zu einer größeren effektiv wirksamen Stützoberfläche, die einem übermäßigen Einfallen der oberen Schnittstelle entgegenwirkt, ohne mehr Material zu verbrauchen (vgl. Abb. 4.18).



(a) Instabiles Muster

(b) Stabiles Muster

Abb. 4.18: ZigZag-Muster mit 20 % Gitterdichte als Füllstruktur ohne und mit Rotation

4.3.4 Gegenseitige Blockierung von Stützelementen

Durch Verbindungen zwischen den Stützelementen können makroskopische Effekte entstehen, die ein Blockieren der Stützbereiche beim Trennen bewirken. Diese Situation liegt beispielsweise vor, wenn die Stützkonstruktion das Bauteil auf gleicher Höhe an mehreren Stellen umfließt und keine natürlich entstehenden Trennstellen aufweist. Die Struktur bildet in diesem Fall eine das Bauteil umfassende Verklammerung. Als Gegenbeispiel können zwei am Bauteil gegenüberliegende Inseln betrachtet werden, welche separat gelöst werden können und keine Blockierung aufbauen. Solche Situationen können selbst bei großvolumigen Bauteilen entstehen, bei denen sich die blockierenden Elemente über die längste Dimension des Druckobjekts gegenüberstehen.

Der Effekt ist grundsätzlich wünschenswert, da er eine verstärkende Wirkung auf die formschlüssige Verbindung hat. Für das Trennen der Materialien kann sich hieraus allerdings eine Problemstellung ergeben, wenn die Füllung der Stützstruktur großvolumig und mechanisch steif ausgeführt ist. In einem solchen Fall kann die das

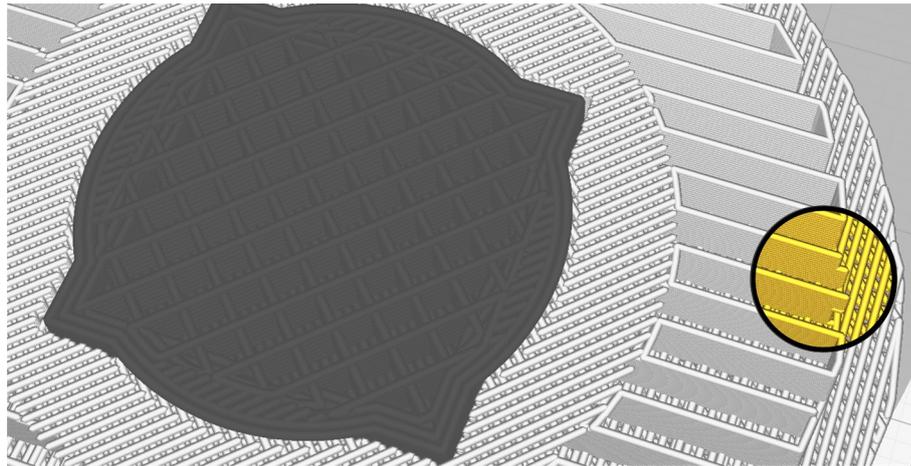


Abb. 4.19: Unterbrochene Füllstruktur und gitterartige Ausprägung der oberen Schnittstelle

Bauteil umschließende Stützkonstruktion eine deutlich höhere Haltekraft aufbauen, als es die Einstellung des einzelnen Stützelements zulassen würde.

Eine Methode zur unmittelbaren Auflösung dieser potenziellen Problemstellung ist die Auftrennung der zusammenhängenden Stützbereiche in kleinere Segmente. Diese Funktion von *Cura* ist zwar nicht zur Verwendung mit einer formschlüssigen Stützstruktur gedacht, allerdings bietet sich die Nutzung der automatischen Unterteilung anhand des Volumens an (siehe Abb. 4.19).

4.3.5 Kollisionsproblematik

Bei der druckgeprägten Verzahnung kann es aufgrund der Zustellung der Düse in z -Richtung zu einer Kollision zwischen der Außenkontur und der bereits abgelegten Stützkonstruktion kommen. Abbildung 4.20 zeigt eine schematische Darstellung der Situation. Die Stützstruktur wird in der aktuellen Lage als erstes abgelegt. Nach dem Wechsel auf das Baumaterial wird die Düse zur Reduzierung des Spalts auf eine geringere Lagenhöhe eingestellt (*Zustellung z*). Die Kollision findet an den seitlichen Bereichen statt, da die Düsenfläche in der Regel größer ist als die abgelegte Bahn. Die Größe der Überschneidung ist von der Geometrie der Düsen Spitze, der Bahnbreite und der Zustellung der Düse in z -Richtung sowie in der xy -Ebene abhängig.

Da die Heißkanaldüse häufig eine mechanische Schwachstelle mit geringem Querschnitt zur Reduzierung der Wärmeleitung darstellt, sind jegliche Kollisionen zu vermeiden. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die heiße Düse das bereits teilweise abgekühlte und verfestigte Stützmaterial beim Kontakt schnell genug erhitzt und ohne nennenswerte Kräfte deformiert. Hierzu ist die Vorschubgeschwin-

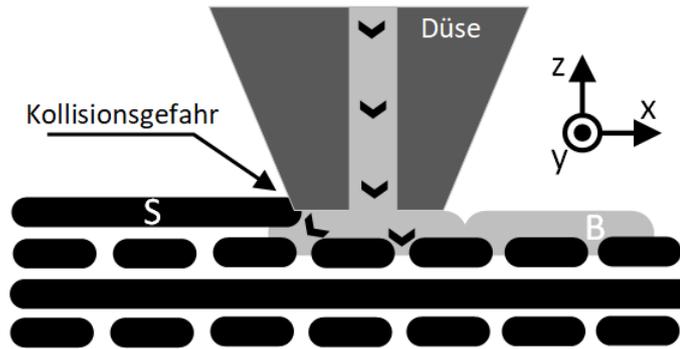


Abb. 4.20: Kollisionsgefahr zwischen Düsenkontur und Stützkonstruktion

digkeit des Druckkopfes üblicherweise deutlich zu hoch. Um sicherzustellen, dass Kollisionen vermieden werden, kann die Reihenfolge der Aufbringung von Stütz- und Baumaterial innerhalb der jeweils aktiven Schicht modifiziert werden. In jeder Lage sind zunächst die Abschnitte des Bauteils und anschließend jene der Stützkonstruktion zu fertigen. Der Düsenwechsel findet in jeder Lage statt, was gegenüber dem konventionellen Verfahren bei der Fertigung mit mehreren Materialien einen Mehraufwand darstellt. Durch eine geschickte Auswahl der Prozessgrößen lässt sich die Kollisionsproblematik eventuell auch ohne die beschriebene Modifikation der Druckreihenfolge gänzlich vermeiden. Für die Entwicklung des Prozesses werden die Schichten mit der beschriebenen Sortierung aufgebaut, um im untersuchten Faktorraum uneingeschränkt arbeiten zu können. Der aktive Aufbau der Mikroverzahnung fällt durch diese Umkehrung dem Stützmaterial zu, wobei die hergeleiteten Zusammenhänge weiterhin Gültigkeit besitzen.

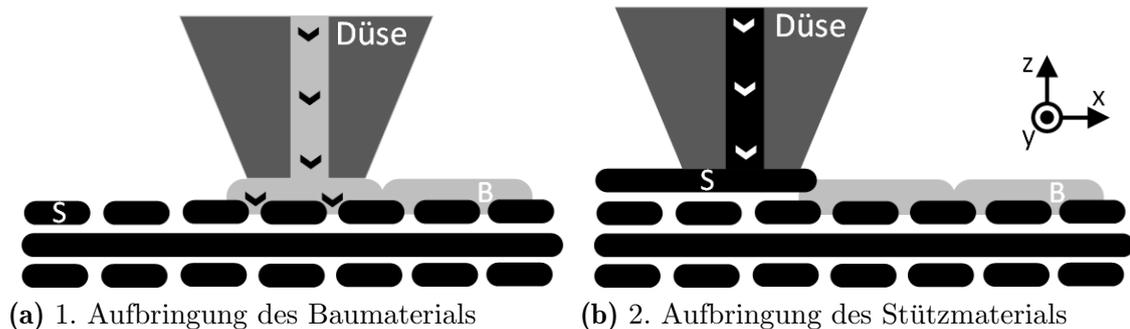


Abb. 4.21: Reihenfolge der Materialaufbringung zur Vermeidung von Kollisionen

4.4 Softwaretechnische Umsetzung

4.4.1 Notwendige Zusatzfunktionen

Für die Fertigung der formschlüssigen Stützkonstruktion können die meisten Funktionen und Einstellungen der stoffschlüssigen konventionellen Variante im *Slicer* (hier *Cura*) weiterverwendet werden. Allerdings gibt es mehrere Zusatzfunktionen, die überdies erforderlich sind und über die kein *Slicer* derzeit verfügt. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Software geschrieben, welche die nachfolgenden Möglichkeiten zur Manipulation des G-Codes bietet.

Einstellung des Düsenabstandes in z-Richtung Diese Modifikation stellt die erste Option zur Einstellung des Drucks unterhalb der Düse dar. Die Software soll in der Lage sein, die z-Koordinaten aller Programmzeilen relativ um einen frei wählbaren Wert für beide Düsen unabhängig anzupassen.

Multiplikation der Extrusionsmenge Diese Modifikation stellt die zweite Option zur Einstellung der Differenz zwischen freiem Volumen unterhalb der Düse und extrudierter Schmelze dar. Die Anwendung ist hier spezifisch nur auf die außenliegende Bahn des Bauteils und nur auf Bahnen, die in Kontakt mit der Stützkonstruktion stehen, anzuwenden. Eine Steigerung der Extrusionsmenge für das gesamte Bauteil würde zu einer starken Fehlausprägung dessen führen. Die Software muss daher die Außenbahn identifizieren und die extrudierte Menge in den entsprechenden Programmzeilen anpassen.

Modifikation der Ablegereihenfolge von Stütz- und Baumaterial Durch die im vorherigen Abschnitt beschriebene Kollisionproblematik ist eine Anpassung der Ablegereihenfolge von Stütz- und Baumaterial erforderlich. Die Software benötigt daher eine Funktion, welche die jeweils aktive Düse sowie die dazugehörigen Bewegungen erkennt und losgelöst voneinander sortieren kann. Dabei sind die Übergänge zwischen den Materialien zu betrachten und zu ergänzen, da nur die Hälfte der Wechselbewegungen im ursprünglichen G-Code vorhanden sind.

Visualisierung des modifizierten G-Code Weiterhin wird eine Visualisierung vorgestellt, welche den G-Code schichtweise darstellen kann und eine Überprüfung aller Modifikationen an diesem ermöglicht. Ein solches Werkzeug ist für die Entwicklung der Stützkonstruktion notwendig, um Fehler in gefertigten Proben zweifelsfrei dem additiven Fertigungssystem oder der Software zuzuordnen und beheben zu können.

Nachfolgend wird zunächst der grundsätzliche Datenfluss vorgestellt. Anschließend erfolgt die qualitative Beschreibung der Einzelmodule. Die Software, die nachfolgend auch als *G-Code Manipulator* bezeichnet wird, liegt der Arbeit als ausführbare Datei auf dem eingereichten Datenträger bei.

4.4.2 Datenfluss und Verarbeitungskonzept

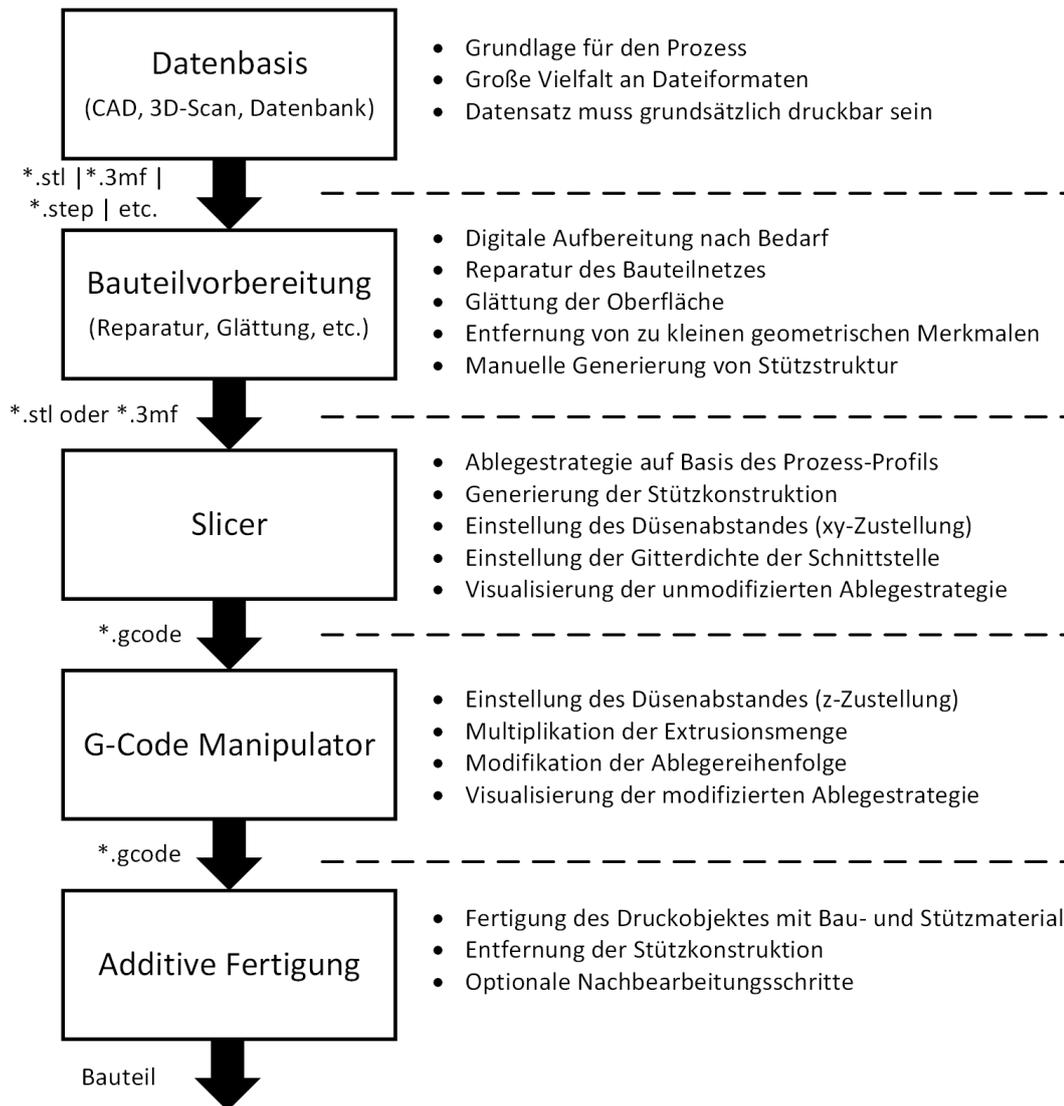


Abb. 4.22: Digitale Verarbeitungsschritte und Integration der Manipulation des G-Code

Abbildung 4.22 zeigt den Dateifluss, der mit der Eingabe des digitalen Modells in einem beliebigen Dateiformat beginnt. Üblicherweise werden solche Modelle in einer CAD-Anwendung erstellt, durch einen 3D-Scanner erfasst oder aus einer Modelldatenbanken heruntergeladen. Das Modell muss einen geschlossenen Körper ohne Fehlstellen abbilden, da der *Slicer* andernfalls nicht identifizieren kann, welcher Teil des Volumens sich innerhalb und welcher sich außerhalb des Modells befindet. In die-

sen Fällen entsteht u. U eine fehlerhafte Bahnplanung, sodass zunächst eine Reparatur der Datei durch spezialisierte Software wie *Autodesk Meshmixer* oder *Autodesk Netfabb* notwendig ist. Diese und vergleichbare Anwendungen besitzen überdies weitere Zusatzfunktionen, die eine Optimierung des Bauteils für die additive Fertigung ermöglichen.

Das eingelesene Modell wird anschließend durch den Nutzer im virtuellen Bau- raum positioniert und orientiert. Ansätze zur automatischen Orientierung sind in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, wobei *Cura* ebenfalls über eine Erweiterung verfügt, welche diese Aufgabe übernehmen kann. Bei der Methode, die das Plugin zur Ermittlung der idealen Orientierung ermittelt, wird allerdings nur die abstützende Fläche und nicht die Stabilität während des Fertigungsprozesses bewertet. Neben der Stützkonstruktion, die *Cura* automatisch nach der Regel des Überhangwinkels generiert, können Elemente an weiteren Positionen manuell hinzugefügt werden. Die anschließende Generierung der eigentlichen Struktur erfolgt wie zuvor automatisch durch den *Slicer*. Sobald diese Vorbereitungen abgeschlossen sind, können die Bahnen unter Berücksichtigung aller Einstellungen der Prozessprofile generiert und in einer Vorschau angezeigt werden. Insofern das Ergebnis akzeptabel ist, kann hieraus der G-Code generiert und exportiert werden. Dieser enthält neben den Fahrbefehlen der Achsen weitere Befehle wie die Steuerung der Düsen- und Druckbetttemperaturen oder der Drehzahl eines Zusatzlüfters.

Im nächsten Schritt wird der G-Code üblicherweise in die Steuerung des additiven Fertigungssystems eingelesen und ausgeführt. Da zusätzliche Modifikationen an der Extrusionsmenge sowie der Positionierung der Druckköpfe und eine Umsortierung der Reihenfolge von Bau- und Stützmaterial notwendig sind, wird die Datei als Zwischenschritt in den *G-Code Manipulator* eingelesen, verändert und neu ausgegeben. Das Modul ermöglicht überdies die Visualisierung der jeweiligen Schicht in einer 2D-Ansicht zu Prüfzwecken.

Der erneut exportierte G-Code wird abschließend in den 3D-Drucker eingelesen und ausgeführt. An der Anlage sind weder Modifikationen im Bereich der Steuerungssoftware noch mechanischer Art erforderlich, da nur für das FLM-Verfahren übliche Befehle auf Basis von *DIN 66025* eingesetzt werden. Eine Erweiterung des Befehlsatzes ist nicht erforderlich. Auch moderne FLM-Systeme besitzen keine Protokollierungsfunktionen, die beispielsweise Temperaturschwankungen der Düse durch den Zusatzlüfter oder den tatsächlichen Massenstrom im Extruder erfassen. Daher entstehen im letzten Prozessschritt außer der Druckdauer keine weiteren digitalen Informationen, die ausgewertet und weiterverarbeitet werden können.

4.4.3 Modellverarbeitung im Slicer und Grundeinstellung

Allgemein

In diesem Abschnitt wird die Verarbeitung im *Slicer* im Detail vorgestellt. Da *Cura* weit über einhundert Einstellungen für die Prozess- und Maschinenkonfiguration bei der Generierung des G-Codes berücksichtigt, werden hier nur jene betrachtet, die sich explizit auf die Generierung der Stützkonstruktion beziehen. Für die übrigen Einstellungen können die üblichen Profile verwendet werden, welche im konventionellen Druckverfahren für die gewählten Thermoplaste eingesetzt werden.

Füllung der Stützkonstruktion

Die Füllung der Stützkonstruktion wird als 90°-rotierendes Gitter des Typs *ZigZag* ausgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.3) und aus Stützmaterial gefertigt. Um einen stabilen Aufbau auch bei kleinen Inseln der Stützkonstruktion zu gewährleisten, wird die Fläche der Stützstruktur in jeder Lage um 1 mm expandiert. Die Dichte des Gitters wird mit 20 % festgelegt, da sich dieser Wert nach eigener Erfahrung als stabile Grundlage erwiesen hat. Zur weiteren Stabilisierung der Stützkonstruktion werden Bereiche, die nicht weiter als 5 mm voneinander entfernt sind, zu einem zusammenliegenden Bereich zusammengefasst. Die Lagenhöhe kann grundsätzlich als ganzzahliges Vielfaches von der des Bauteils eingestellt werden, allerdings wird der realisierbare Schmelzestrom mit dieser Funktion schnell überschritten, falls die Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfes nicht reduziert wird. Daher wird die Lagenhöhe der Stützkonstruktion mit der des Bauteils gleichgesetzt.

Obere Schnittstelle der Stützstruktur

Die obere Schnittstelle der Stützkonstruktion wird als Typ *Linie* ausgeführt und ebenfalls um 90° mit jeder Schicht rotiert (Auswahl siehe Abschnitt 4.3.2). In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass mehrere Schichten der oberen Schnittstelle auf der Füllung der Stützstruktur abgelegt werden müssen, um eine gleichmäßige Ausprägung ohne Einfallen zu erhalten. Daher werden die letzten fünf Schichten vor dem Kontakt mit der Kontur des Bauteils als obere Schnittstelle ausgeführt. Ferner wird eine zusätzliche horizontale Expansion von 1 mm in die Füllung der Stützkonstruktion gewählt. Andernfalls kann es insbesondere bei steilen Winkeln zu sehr kleinen Stützbereichen der oberen und unteren Schnittstelle kommen, welche der Drucker nicht ausreichend präzise darstellen kann. Die obere Schnittstelle wird aus Stützma-

terial mit einer Gitterdichte von ca. 80 % gefertigt. Die Dichte wird im Rahmen der empirischen Untersuchung in Abschnitt 4.6 variiert.

Untere Schnittstelle der Stützstruktur

Im Gegensatz zu den anderen beiden Funktionsbereichen wird die untere Schnittstelle aus Bauteilmaterial gefertigt, um sich leicht stoffschlüssig mit der Oberseite des Bauteils zu verbinden, auf der sie beginnt. Zusätzlich wird eine treppenförmige Ausprägung der Schnittstelle eingestellt, sodass sich vergleichsweise wenige Kontaktpunkte ergeben, welche die Oberfläche beeinträchtigen. Für die Grundstruktur wird ebenfalls der Typ *Linie* mit einer lagenweisen Rotation um 90° und einer Gitterdichte von ca. 80 % eingesetzt.

Manuelle Platzierung von Stützstruktur

Für die manuelle Platzierung der Stützstruktur gelten die gleichen Regeln wie für die automatisch generierten Bereiche. Die selektierten Flächenelemente werden in Richtung des Druckbetts projiziert und durch die Füllung der Stützstruktur sowie durch die obere und untere Schnittstelle ausgefüllt. Nach der Berechnung der Bahnen sind die manuell hinzugefügten Bereiche nicht mehr von den restlichen zu unterscheiden (vgl. Abbildung 4.33).

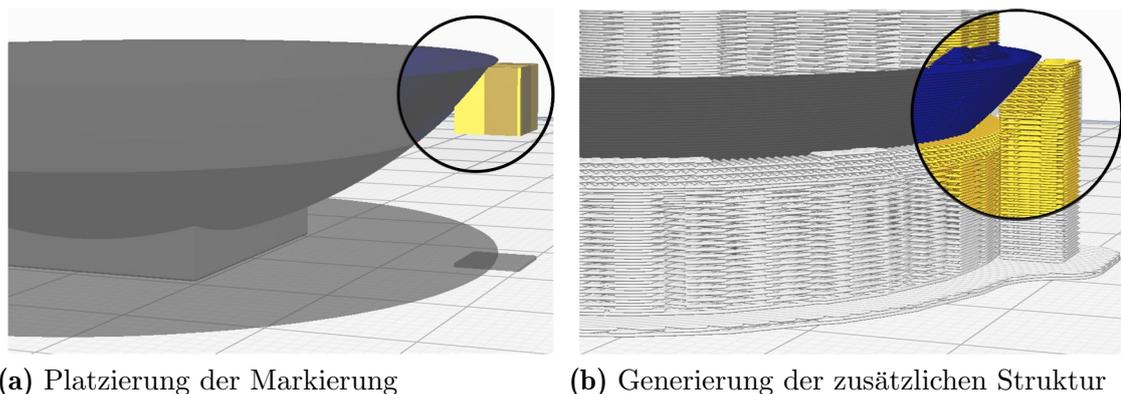


Abb. 4.23: Manuelle Platzierung und Integration in die autom. generierte Stützstruktur

Berechnung, Prüfung und Export der Bahnplanung

Aus Bauteil, Profileinstellungen und manueller Stützstrukturplatzierung berechnet der *Slicer* die Bahnplanung. Das Ergebnis kann anschließend in einer Voransicht betrachtet werden. Hier sind die einzelnen Lagen und Bahnen sowie Verfahrensbewegun-

gen des Druckkopfes ohne Materialextrusion sichtbar. Außerdem können verschiedene Darstellungsformen in Falschfarben eingestellt werden, sodass beispielsweise die äußeren Wände von der inneren Füllstruktur des Bauteils besser zu unterscheiden sind. Diese verschiedenen Typen sind für die nachfolgende Manipulation entscheidend, da sie als Kommentare im G-Code hinterlegt sind und als Markierungen für die nachträgliche Zuordnung der Funktionsbereiche genutzt werden.

4.4.4 Manipulation und Visualisierung des G-Code

Zur Manipulation und Anzeige des G-Codes werden zwei unabhängige Anwendungen geschrieben. Der *G-Code Manipulator* ist ein Softwarewerkzeug, welches den G-Code einlesen und diesen anhand verschiedener einstellbarer Parameter modifizieren und als neuen G-Code für die weitere Verwendung ausgeben kann. Das Anzeigetool ist in der Lage, sowohl die unmodifizierte Ausgabe des *Slicers* als auch die modifizierte des *Manipulators* zu visualisieren. Nachfolgend wird die jeweilige Funktionsweise der zwei in *Python 3.7* geschriebenen Anwendungen im Detail beschrieben.

Die ***G-Code Manipulator*** liest zunächst die bereits durch den *Slicer* erzeugte Datei ein und ordnet den Inhalt nach den verwendeten Materialien und Lagen in Listen ein. Weiterhin wird zwischen den verschiedenen Typen wie der inneren und äußeren Wand (*WALL-INNER*, *WALL-OUTER*), Boden- und Decklagen (*SKIN*), innere Füllstruktur des Bauteils (*FILL*) sowie der Füllung der Stützstruktur und deren Schnittstellen unterschieden (*SUPPORT*, *SUPPORT-INTERFACE*), die als Kommentare enthalten sind. Die Betrachtung dieser Typen und der dazugehörigen Fahrbefehle bzw. deren Start- und Endpunkten dieser ist für die Berechnung der zusätzlichen Materialextrusion entscheidend. Auch moderne *Slicer* verwenden eine Aneinanderreihung von linearen Bewegungen, sodass keine Sonderfälle wie Kurven berücksichtigt werden müssen. Abbildung 4.24 zeigt die Visualisierung zweier aufeinanderfolgender Lagen mit Stützstruktur- und Bauteilbahnen. Das Bauteil liegt dabei nur mit einer Hälfte auf der unterliegenden Stützkonstruktion.

Im nächsten Schritt wird ein rechteckiges Raster mit einstellbarer Auflösung angelegt, dessen Größe durch die minimale und maximale Position in der x- und y-Koordinate innerhalb der Stützkonstruktion bestimmt wird. Alle Bewegungen, unabhängig davon, welchem Bahntyp sie angehören, liegen innerhalb dieses Rasters, welches zunächst auf allen Plätzen mit 0 (deaktiviert) initialisiert wird. Die Auflösung kann durch den Nutzer frei gewählt werden und hat unmittelbare Auswirkungen auf die Präzision und die benötigte Durchlaufzeit der nachfolgend beschriebenen Berechnung. Als Vereinfachung werden überdies die x- und y-Koordinaten, die zu

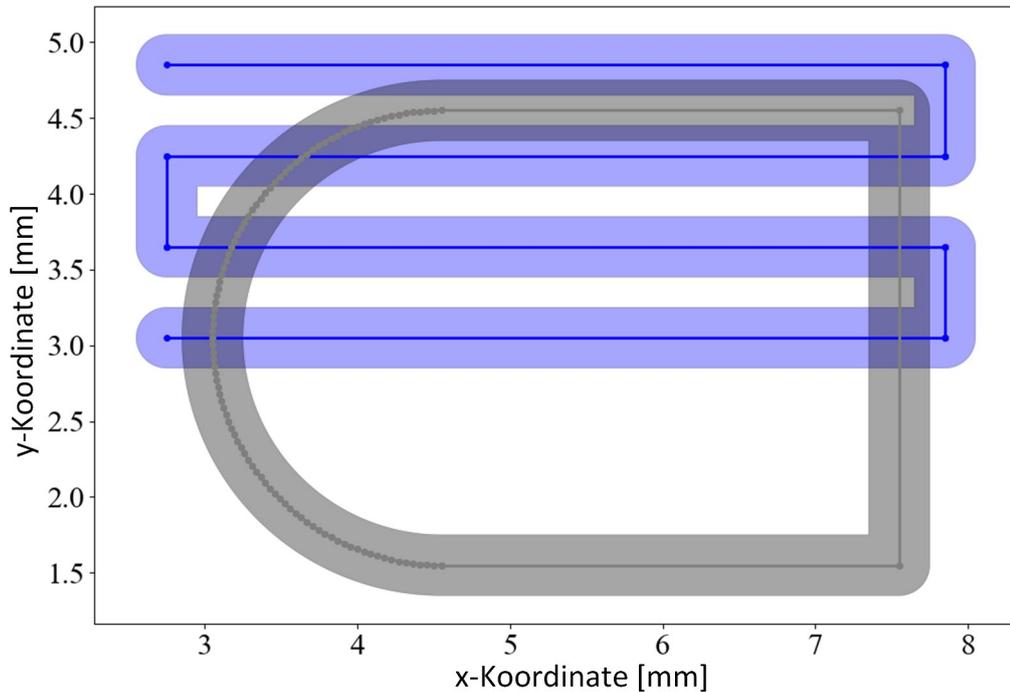


Abb. 4.24: Darstellung einer Lage mit Bauteilkontur (grau) und Stützkonstruktion in der vorherigen Lage (blau) mit einer Bahnbreite von jeweils 0,4 mm

jedem Index im Raster gehören, in zwei eindimensionalen Arrays gespeichert. Nach Abschluss der Berechnung kann so der Zusammenhang zwischen den aktivierten Rasterplätzen und realen Koordinaten wiederhergestellt werden, während die rechenintensiven Operationen effektiv in Matrizenform erfolgen. Diese Maßnahme führt zu einer erheblichen Verkürzung der Berechnungszeit.

Die linearen Bewegungen, aus denen der G-Code aufgebaut ist, besitzen unterschiedliche Längen in Abhängigkeit von der Kontur, die sie abbilden. Ein Kreis wird beispielsweise aus einer hohen Anzahl kurzer Bewegungen approximiert, während ein Rechteck ohne Abweichungen durch vier vergleichsweise lange Bewegungen beschrieben wird. Um eine gleichmäßige Aktivierung von Rasterplätzen zu erreichen, werden daher für jede Bewegung zusätzliche Zwischenpunkte interpoliert. Andernfalls würden nur der Anfangs- und Endpunkt als Überfahren markiert. Die Interpolation wird dabei der gewählten Rastergröße angepasst.

Die so erhaltenen Punkte werden in das Raster als +1 addiert, wodurch das Feld die Information über vorhandene Stützkonstruktion darstellt (rote Felder in Abbildung 4.25). Da die Stützkonstruktion aber stets nur bis zur Außenkontur des Bauteils reicht, aber mit dieser nicht überdeckt ist, werden die den aktivierten Feldern umliegenden Felder ebenfalls aktiviert (gelbe Felder in Abbildung 4.25). Der Radius kann dabei in diskreten Schritten gewählt werden. Die so erweitert ausgewählten Bereiche sind diejenigen, die im nächsten Schritt mit der Bauteilkontur abgeglichen

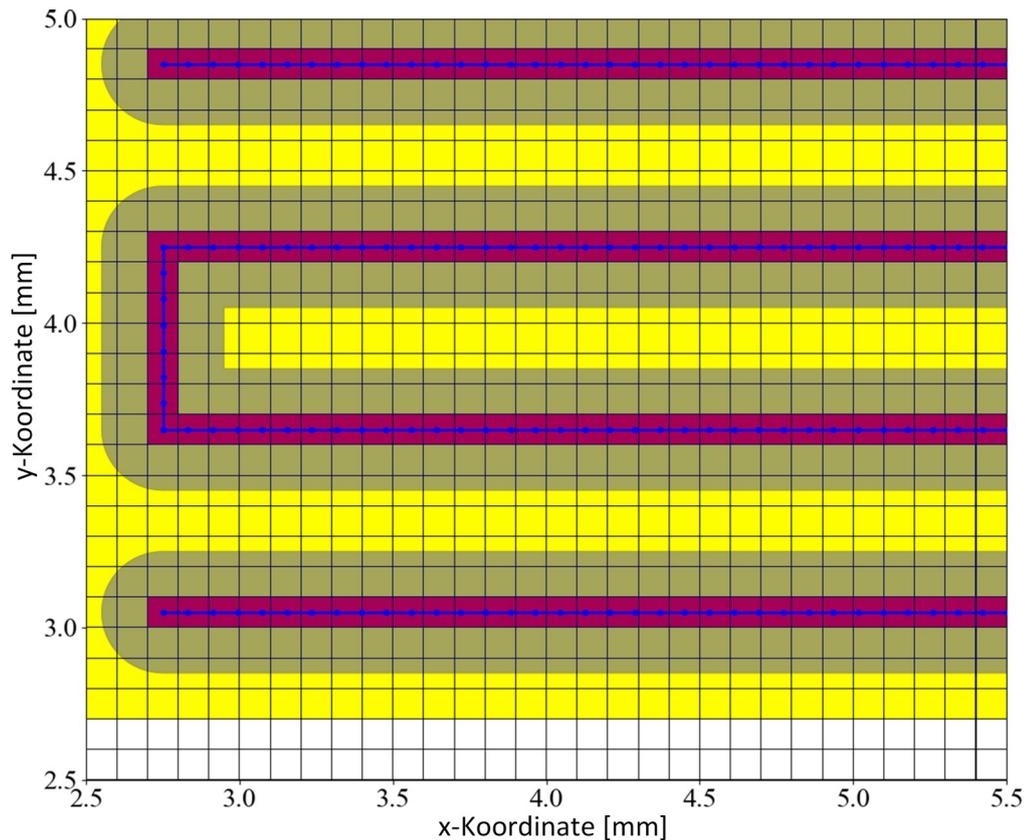


Abb. 4.25: Aktivierung der Rasterplätze (rot) und der Modifikationszone (gelb)

werden. Auf diese Weise wird bestimmt, ob die Bauteilkontur mit Stützkonstruktion Kontakt hat und die Materialmenge um einen einstellbaren Faktor gesteigert wird.

Nach der Aktivierung der Felder für die Stützkonstruktion werden die Bahnen der Typen *SKIN* und *WALL-OUTER* betrachtet. Hier ist aus den zuvor genannten Gründen ebenfalls eine Interpolation notwendig. Hinzu kommt die Besonderheit, dass auch ein Teilbereich einer einzigen linearen Bewegung in Kontakt mit der Stützstruktur stehen kann, während dies auf den Rest der Strecke nicht zutrifft. Eine feinere Auflösung der Bewegungsbefehle ist daher schon deswegen erforderlich, damit die Information über eine erhöhte Extrusionsmenge überhaupt im final exportierten G-Code differenziert abgebildet werden kann. Aus diesem Grund ist die exportierte Datei stets größer als die vom *Slicer* eingegebene. Die interpolierten Punkte werden anschließend den Feldern im Raster durch einen Abgleich mit den zuvor gespeicherten Arrays der x- und y-Koordinaten zugeordnet. Zur Detektion der überschrittenen Bereiche wird abschließend geprüft, welche Felder sowohl durch die Kontur des Bauteils als auch durch den erweiterten Bereich der Stützkonstruktion überdeckt werden. Dabei wird nicht nur die aktuelle Schicht, sondern auch die jeweils vorherige betrachtet, indem die zwei Raster elementweise addiert

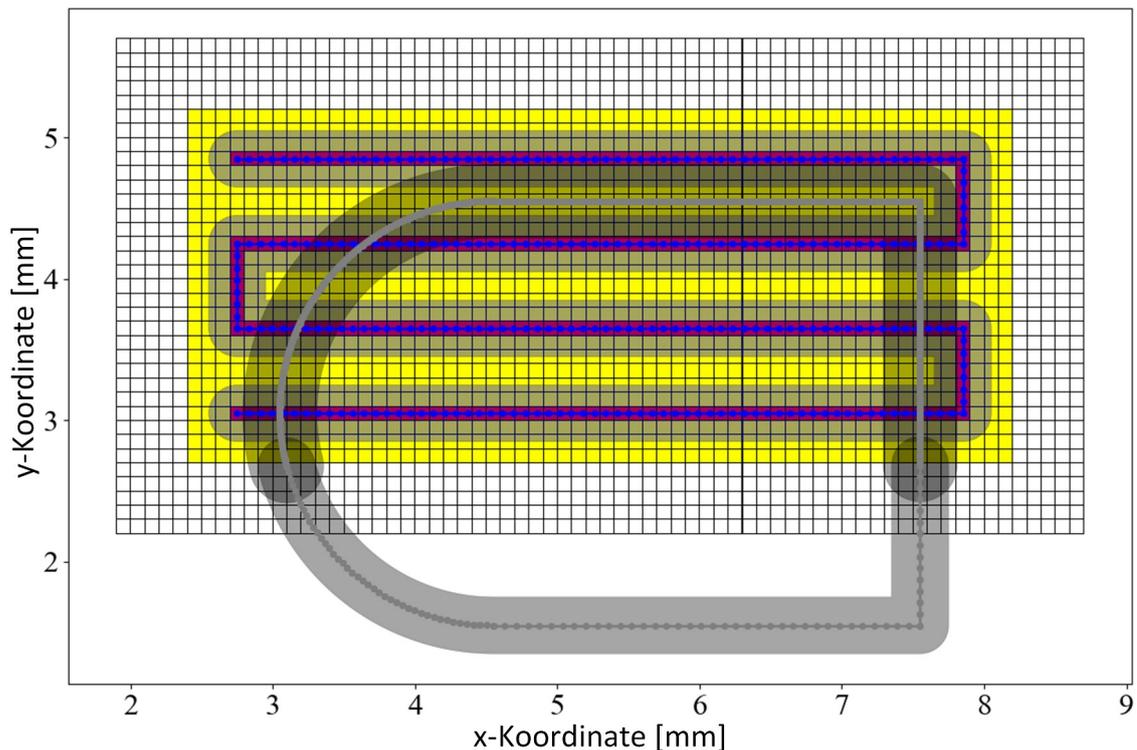


Abb. 4.26: Anpassung der Extrusionsmenge (Verbreiterung der abgelegten Bahn)

werden. In der Auswertung kann ein Feld daher den Wert 0, 1 oder 2 annehmen, wobei in jedem Fall, wenn der Wert gleich 0 ist, die Steigerung der Extrusionsmenge durchgeführt wird. Eine Überschneidung mit der vorherigen Schicht deutet darauf hin, dass die Bauteilkontur unter einem flachen Überhangwinkel oder horizontal auf der Stützkonstruktion liegt. Währenddessen ist eine Überschneidung mit der aktuell betrachteten Lage ein Anzeichen für eine Stützkonstruktion, die unter einem steilen Winkel anliegt.

Während die Extrusion von zusätzlichem Material eine komplexere Problemstellung darstellt, ist das Reduzieren des Düsenabstandes durch eine Anpassung aller z-Koordinaten, die einem bestimmten Extruder bzw. Material zugeordnet sind, vergleichsweise einfach. Die Software durchläuft den G-Code dazu zeilenweise und addiert einen in der Bedienoberfläche definierten Wert, solange der dazugehörige Extruder aktiviert ist. Diese Information wird ebenfalls dem ursprünglich eingegebenen Code entnommen.

Gleiches gilt für die in Abschnitt 4.3.5 beschriebene Umsortierung der Einsatzreihenfolge der Druckköpfe in jeder Schicht. Um Kollisionen zu vermeiden, soll stets der Druckkopf, welcher das Bauteil fertigt, als erstes eingesetzt werden, da dieser je nach Konfiguration mit einer Zustellung in z-Richtung eingestellt ist. Mögliche Kollisionen werden so vermieden. Der durch *Cura* generierte Code wird unter Er-

gänzung der entsprechenden Zusatzbewegungen für den Wechsel zwischen Bau- und Stützmaterial neu zusammengestellt.

Abschließend werden alle Bewegungsbefehle mit der modifizierter Extrusionsmenge, der Verschiebung der z-Koordinate und unter Berücksichtigung der modifizierten Ablegereihenfolge in die Ausgabedatei geschrieben. Zusätzliche Befehle beispielsweise zur Steuerung der Temperatur oder des Zusatzlüfters werden an entsprechender Position wieder eingefügt, sodass letztlich ein funktionsfähiger G-Code entsteht. Die Bedienoberfläche des *G-Code Manipulators* mit den beschriebenen Konfigurationsmöglichkeiten ist in Abbildung 4.27 dargestellt.

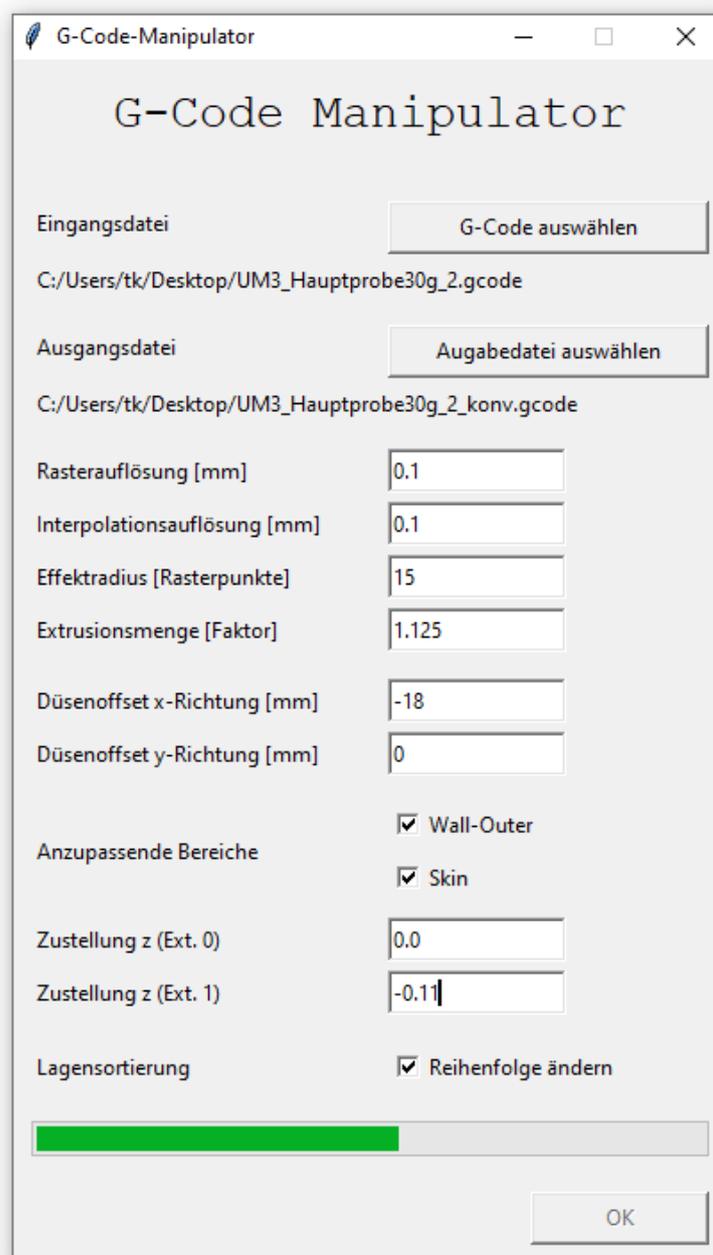


Abb. 4.27: Eingabemaske des *G-Code Manipulators*

Mit der **Anwendung zur Anzeige des G-Codes** soll sichergestellt werden, dass der tatsächliche Code visualisiert wird und keine abgewandelte Version, welche durch Funktionen im Hintergrund einer Anwendung wie der in *Cura* integrierten Vorschau modifiziert wird. Daher wird eine eigene Implementierung ebenfalls in *Python 3.7* eingesetzt. Abbildung 4.28 zeigt die Bedienoberfläche mit dem Hauptanzeigefenster und der Bedienleiste zum Durchschalten der Schichten und zur Auswahl der Anzeigooptionen. Beim Start der Anwendung muss zunächst der Filamentdurchmesser, der Abstand der Druckköpfe und die Formatierung des G-Codes (der *Ultimaker 3* verwendet die unternehmenseigene Variante *Griffin*) ausgewählt werden. Diese Zusatzinformationen werden für eine korrekte Darstellung beispielsweise der Bahnbreite benötigt.

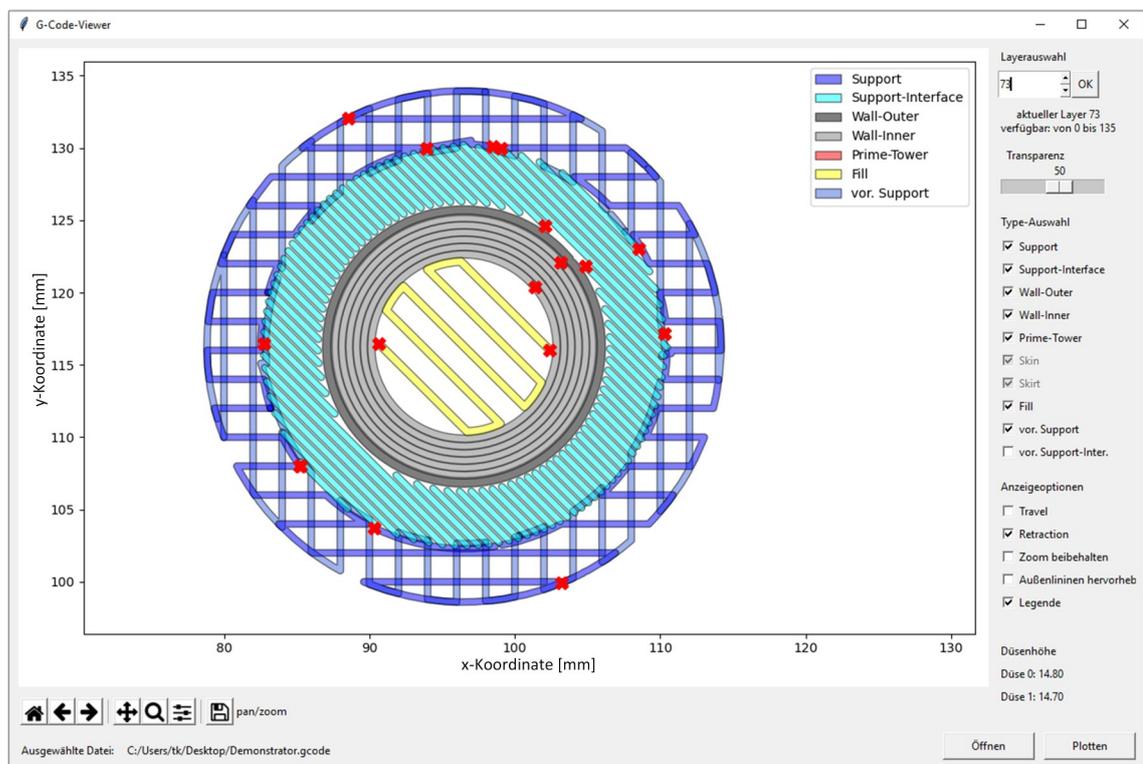


Abb. 4.28: Oberfläche des Anzeigetools und Visualisierung einer Lage

Einzelne Bahntypen und der Materialrückzug sowie -vorschub können über die Auswahl gezielt ein- und ausgeblendet werden. Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit, die Farbauswahl der Bahntypen abgestuft transparent einzustellen. Dadurch können sich überlappende Bahnen, die durch die Steigerung der Materialmenge entstehen, sowie die Überschneidung mit der Stützkonstruktion der vorherigen Lage effektiv geprüft werden. In den durchgeführten Versuchen weicht das überschüssig erscheinende Material in die Leerstellen der Stützstruktur aus. Überdies bietet die Anwendung die üblichen Kontrollelemente, um die Anzeige zu verschieben, zu skalieren oder Bereiche als Bild abzuspeichern.

4.5 Vorbereitung empirischer Versuche

4.5.1 Probengeometrie

Für die Proben werden zwei verschiedene Geometrien verwendet, die sich durch die Form der Schnittstelle zwischen den zwei eingesetzten Materialien unterscheiden. Die Schnittstelle für die Stützstruktur unter flachem Überhangwinkel besteht aus zwei sich gegenüberliegenden ebenen Kontaktflächen (vgl. Abb. 4.29). Bei den Proben zur Untersuchung von steilen Winkeln besitzt die obere Probenhälfte einen Kegelstumpf mit einem Winkel zwischen Mantellinie und Kegelachse von 30° (vgl. Abb. 4.30). Beide Bauteile weisen eine in z -Richtung projizierte Kreisfläche mit einem Durchmesser von 30 mm auf. Die untere Probenhälfte ist für flache und steile Winkel identisch. Für die Untersuchung von flachen Winkeln wird die Einstellung mit einem Überhangwinkel von 0° gewählt, da so die Beeinflussung durch die seitlich anliegende Stützstruktur ausgeschlossen werden kann. Bei den Proben mit steilem Überhangwinkel werden 30° festgelegt, da die Wahl keine Randeinstellung darstellen (sinnvoller max. Überhangwinkel 45°) und gleichzeitig deutlich im Bereich steiler Winkel liegen sollte. Dabei ist zu erwarten, dass der Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße kontinuierlich mit dem Überhangwinkel variiert. Im *Slicer* werden die Probenhälften mit einem Abstand von 3 mm in z -Richtung zueinander positioniert. Anschließend wird der so entstehende Spalt bei der Generierung der Bahnen entsprechend der Einstellung der Faktoren mit dem Gitter der Stützkonstruktion gefüllt.

Alle Proben besitzen eine einheitliche Geometrie zur Befestigung in der Probenaufnahme. An der oberen Hälfte sind konkave Ausprägungen eingelassen, die eine Fixierung ermöglichen und ohne Stützkonstruktion gefertigt werden können. Die untere Hälfte besitzt einen Absatz, welcher eine freie Rotation der Probe in der Aufnahme ermöglicht, um Torsionsmomente beim Einspannen zu verhindern.

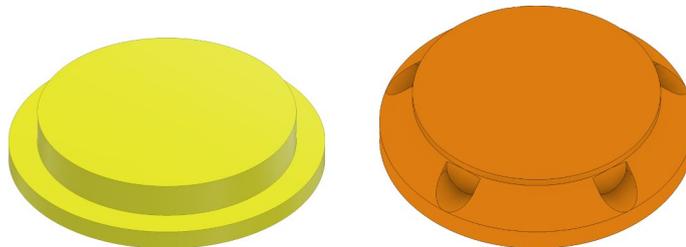


Abb. 4.29: Untere Probenhälfte (links) und obere Probenhälfte für flache Winkel (rechts)

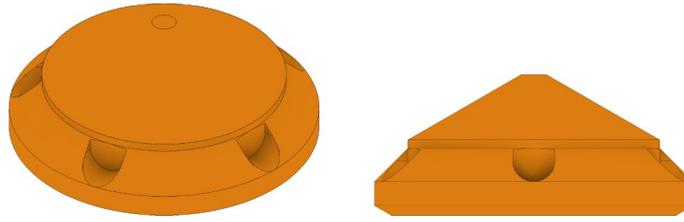


Abb. 4.30: Obere Probenhälfte für steile Winkel in zwei Ansichten

4.5.2 Zugprüfanlage und Aufnahmevorrichtung

Für die Zugversuche wird eine Universalprüfmaschine des Typs *Quasar 25* von *Galdabini SPA* mit einer maximalen Zugkraft von 25 kN eingesetzt. Da bei den gefertigten Proben eine wesentlich geringere Haltekraft zu erwarten ist, wird eine zusätzliche Kraftmessdose des Typs *U2A* der *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* mit einem Nennmessbereich von 500 N zwischen die in die Maschine integrierte 25 kN Messdose und die Probenaufnahme montiert und mit einem Messverstärker der Anlage verbunden. Durch diese Maßnahme steht eine deutlich höhere Auflösung im relevanten Messbereich zur Verfügung.

Bei der Messung wird kein zusätzliches Extensometer eingesetzt, sondern lediglich der Weg der Traverse genutzt. Zum einen lässt die sehr flache und spezialisierte Probengeometrie die Befestigung eines Wegaufnehmers an relevanter Position nicht zu, zum anderen liefert eine genauere Erfassung der Dehnung der Probe während des Zugversuchs keine relevanten Informationen. Die entstehende Dehnung resultiert zu einem nennenswerten Anteil aus der Nachgiebigkeit der Probenaufnahme (vgl. Abbildung 4.31) sowie Bereichen der Probe, die selbst nicht Teil der Verzahnung sind.

Da einige der Proben bereits bei sehr geringer Kraft getrennt werden können, ist neben einem geeigneten Transport zur Zugprüfmaschine eine Probenaufnahme erforderlich, welche die Prüfkörper beim Einspannen nicht beschädigt und einen einachsigen Zugversuch ohne Querkräfte und Torsionsmomente erlaubt. Die Handhabung der Proben zeigt, dass beispielsweise eine exzentrisch angreifende Zugkraft zu einem deutlich verfälschten Versuchsergebnis führt, was sich durch ein vorzeitiges Lösen der formschlüssigen Verbindung äußert.

Die Probenaufnahme besteht aus zwei Schalen, in welche die Proben eingelegt und positioniert werden. Sowohl der Absatz als auch die eingelassenen Mulden an jeder Hälfte der Probe werden durch die Rändelschrauben fixiert. Dabei sind die Aufnahmen so toleriert, dass die Proben in keine Zwangslage gebracht werden können, sondern auf den Rändelschrauben kraftlos aufliegen. Durch den Aufbau können die zwei Halteschalen auch noch nach dem Einlegen der Proben zueinander verdreht werden,

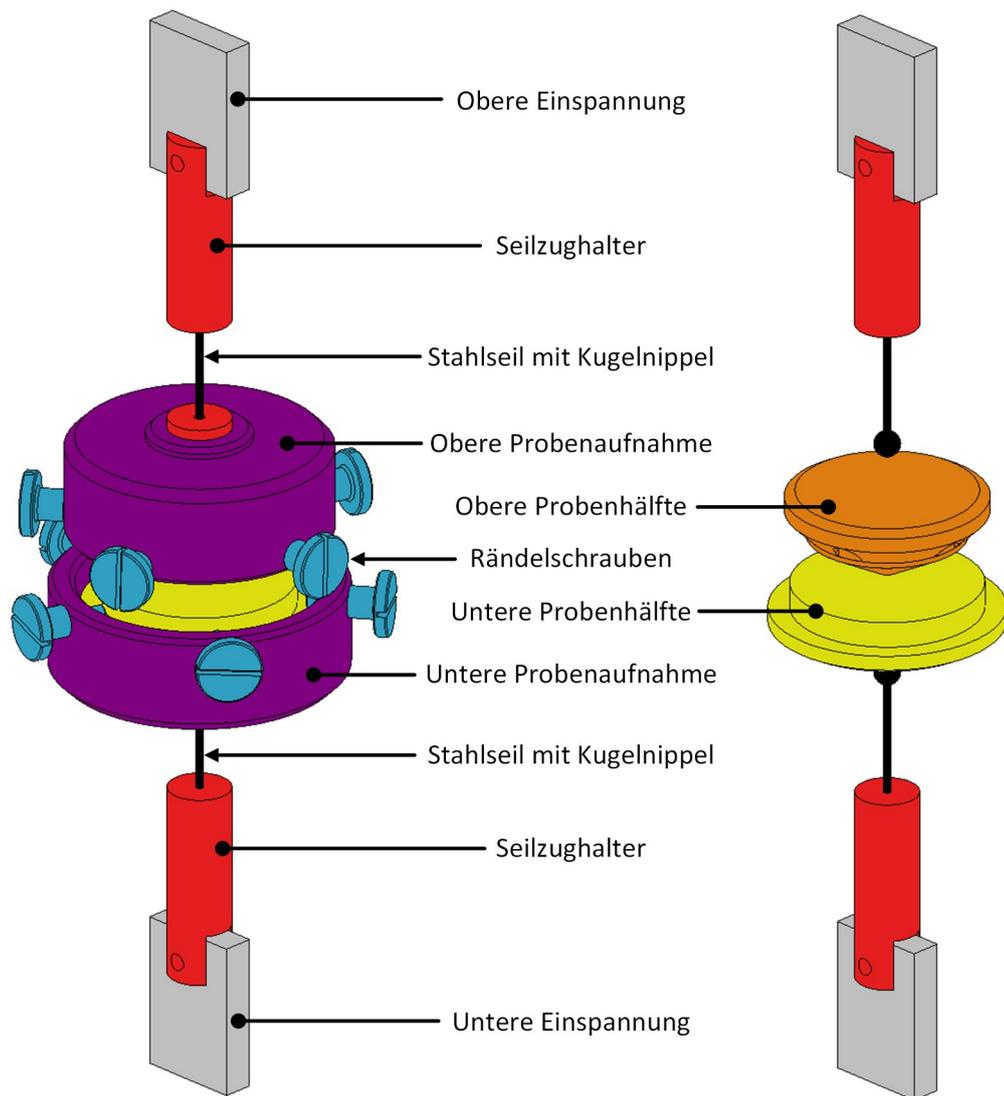


Abb. 4.31: Aufnahmevorrichtung als CAD-Modell mit und ohne Probenaufnahmen



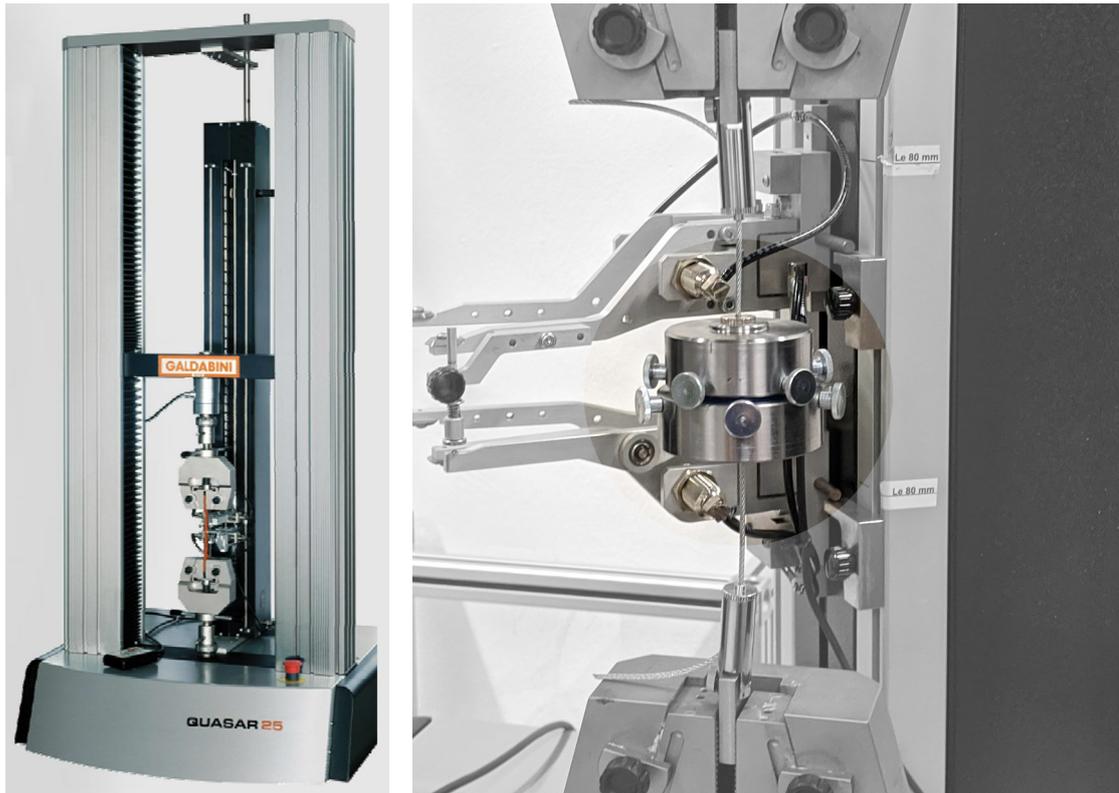
Abb. 4.32: Gefertigte Probenaufnahme mit eingelegter Probe

sodass möglichst geringe Drehmomente beim Aufbau der Vorspannung eingebracht werden. An den Halteschalen werden beidseitig zwei 40 mm lange Stahlseile mit einem Durchmesser von 1,5 mm befestigt, an deren Enden Aufnahmeplatten schwenkbar befestigt werden. Die Platten werden mit Hilfe der Universalspannbacken der Prüfmaschine aufgenommen und verbleiben für den Probenwechsel sowie die Dauer einer Versuchsreihe eingespannt. Durch die Stahlseile können nahezu keine Momente und Querkräfte übertragen werden, sodass eine möglichst unbeeinflusste Messung durchgeführt werden kann.

4.5.3 Ablauf der Zugprüfung

Zu Beginn eines Prüfzyklus wird die Traverse der Zugprüfanlage in die Startposition heruntergefahren, sodass die Probe in die Probenaufnahme eingespannt bzw. diejenige aus dem vorherigen Versuch zunächst entfernt werden kann. Beim Einlegen der Probe wird als erstes die obere Seite eingelegt sowie fixiert und anschließend die untere befestigt, da das Gewicht des unteren Teils der Probenaufnahme als Belastung der Probe erfasst werden soll. Zum Einlegen werden die Rändelschrauben soweit herausgedreht, dass die jeweilige Seite ohne Gegenkraft eingeschoben werden kann. Anschließend werden die Schrauben bis zum Anschlag handfest wieder eingeschraubt. Die Probe ist in dieser Situation nicht verspannt, sondern liegt auf den in die Probenaufnahme hineinstehenden Gewinden der Schrauben auf. Im nächsten Schritt wird die in diesem Zustand anliegende Kraft in der Software der Universalprüfmaschine als Nullpunkt konfiguriert. Anders als bei starren Probenaufnahmen, deren Gewichtskraft durch den Rahmen der Anlage aufgenommen wird, hängt das Gewicht der unteren Probenaufnahme an der Probe selbst und belastet diese unmittelbar nach dem Einspannen bereits mit etwa 2,5 N.

Anschließend beginnt die Zugprüfung mit der automatisierten Aufbringung der Vorspannung von 3,5 N. Die Traverse wird hierzu solange auseinandergefahren, bis die Kraft durch das Spannen der Stahlseile erreicht ist. Der Wechsel zur eigentlichen Zugprüfung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min und die Überwachung des Abbruchkriteriums *Probenbruch* erfolgen ebenfalls automatisch. Als Zielwert wird die maximal erreichte Zugkraft als Haltekraft ermittelt, welche die jeweilige Probe vor dem Probenbruch bzw. der Trennung der Probenhälften aufbringen kann. Durch die spezifische Gestaltung der Proben und der Aufnahme, die durch die verwendeten Stahlseile vergleichsweise nachgiebig ist, ist die Bestimmung weiterer üblicher Kennwerte wie die des Elastizitätsmoduls nicht sinnvoll. Nach der Erfassung der Versuchsergebnisse wird die Traverse wieder in die Ausgangsposition verfahren, so-



(a) Universalprüfmaschine (b) Aufnahme mit eingelegter Probe ohne Vorspannung

Abb. 4.33: Zugprüfanlage *Galdabini QUASAR25* und angepasste Probenaufnahme

dass die nun zerstörte Probe aus der Aufnahme entfernt werden kann. Anschließend kann der nächste Testzyklus durchgeführt werden.

4.5.4 Thermoplaste für die Probenfertigung

Für die Probenfertigung werden die Filamente der *Verbatim GmbH* aus PLA und PETG verwendet, die mit einem Durchmesser von 2,85 mm für den eingesetzten *Ultimaker 3 (UM3)* geeignet sind. Die Wahl fällt auf diesen Hersteller, da *Verbatim* ein Datenblatt für die Produkte zur Verfügung stellt, welches zumindest die wichtigsten Materialeigenschaften enthält (vgl. Abb. 4.4). Grundsätzlich werden mit PLA und PETG zwei Polymere eingesetzt, welche keine signifikante Haftung miteinander eingehen und überdies keine übermäßige Schrumpfung durch thermische Abkühlung erfahren. Ebenfalls bauen die Kunststoffe einen ausreichenden Lagenzusammenhalt auch bei den Umgebungsbedingungen eines nicht geschlossenen Bauraums auf, so dass sie auf dem *UM3* sinnvoll verarbeitet werden können.

An dieser Stelle kann argumentiert werden, dass der Einsatz eines teilkristallinen Thermoplasts für die obere Probenhälfte eher der grundlegenden Entwicklungsrich-

Parameter	Stützstruktur (PLA)	Bauteil (PETG)
Durchmessergenauigkeit	2,85 +/- 0,05 mm	2,85 +/- 0,1 mm
Verarbeitungstemperatur	200 °C bis 220 °C	230 °C bis 250 °C
Dichte	1,24 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Temperaturfestigkeit	58 °C (DSC)	70 °C (ASTM 648)
Streckspannung	63 MPa (ISO 527)	50 MPa (ISO 527)
Streckdehnung	4 % (ISO 527)	6 % (ISO 527)
Schmelzindex (ISO 1133, 190 °C, 2,16 kg)	3,0 g/(10 min)	6,4 g/(10 min)

Tab. 4.4: Thermoplaste für die Probenfertigung [Ver21]

tung entspricht und damit vorzuziehen ist. Allerdings dienen diese Versuche explizit der Untersuchung der Schnittstelle. Damit ein vollständiges Modell der Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen erstellt werden kann, müssen sowohl Proben mit hoher als auch solche mit sehr schwacher Verbindungskraft gefertigt werden. Wird ein teilkristalliner Werkstoff gewählt, so ist ein vorzeitiges Ablösen der oberen Probenhälfte zumindest bei schwacher Haltekraft sehr wahrscheinlich. Stattdessen wird bei dem beschriebenen Vorgehen zunächst der Zusammenhang ermittelt und anschließend anhand des Beschreibungsmodells eine geeignete Konfiguration für einen teilkristallinen Thermoplast als Demonstrator gewählt. So sind die Versuchsergebnisse auch auf andere Thermoplaste übertragbar bzw. bilden die Grundlage zur Einstellung der Schnittstelle zwischen Stützkonstruktion und Bauteil.

4.5.5 Probenfertigung

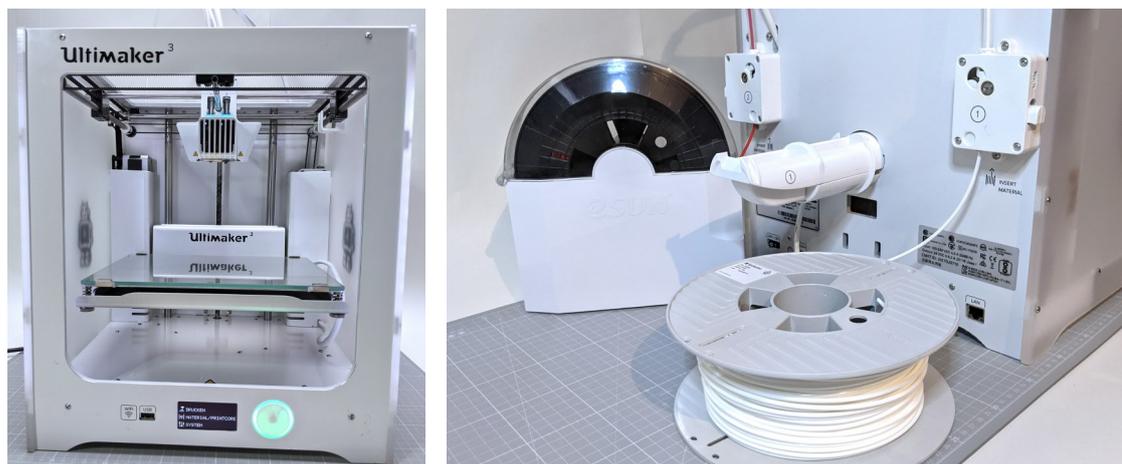
Voraussetzungen

Für die Fertigung der Proben werden ein additives Fertigungssystem und eine entsprechende Peripherie u. a. zur Materialtrocknung sowie Hilfsmittel wie Haftvermittler benötigt. Ziel und Herausforderung sind die bestmögliche Kontrolle aller Prozess- und Umgebungsbedingungen, um die stets vorhandenen Störeinflüsse auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. Alle verbleibenden Störgrößen führen i. d. R. zu einer erhöhten Standardabweichung der Messergebnisse, woraus ein reduzierter Informationsgehalt der Untersuchung oder ein erhöhter Versuchsumfang resultieren. Eine detaillierte Betrachtung aller an den Versuchen sowie der Auswertung beteiligten Komponenten ist daher sinnvoll.

Die Ergebnisse der Untersuchung und daraus resultierende Modelle zur Beschreibung der Zusammenhänge besitzen nur unmittelbar für dieses Versuchssystem Gültigkeit. Die zuvor qualitativ hergeleiteten Zusammenhänge werden darüber hinaus als gültig angesehen (vgl. Kapitel 4.2). Allerdings ist zu erwarten, dass sich zumindest die Koeffizienten des Beschreibungsmodells beispielsweise bei variierendem Düsendurchmesser verändern.

Additives Fertigungssystem

Für die Fertigung der Proben wird mit dem *Ultimaker 3* ein additives Fertigungssystem von *Ultimaker B.v.* eingesetzt, welches über einen Druckkopf mit zwei separaten Heißkanaldüsen verfügt. Abbildung 4.34 zeigt den Drucker und die Materialzufuhr auf der Rückseite des Geräts. Das hygroskopische PETG wird direkt aus der Vorrichtung zur Materialtrocknung gefördert und hier aufbewahrt. Für die Versuche werden die vom Hersteller als *Printcores AA* (linker Extruder) und *BB* (rechter Extruder) bezeichneten Heißkanaldüsen mit einem Düsendurchmesser von 0,4 mm verwendet. Dieser Düsendurchmesser wird in vielen Fällen als Standardkonfiguration von Desktop-Geräten eingesetzt und stellt einen häufig gewählten Kompromiss zwischen der Auflösung des Druckobjektes und der Dauer des Fertigungsprozesses dar. Alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen werden mit dieser Konfiguration durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu begünstigen.



(a) *UM3* Frontansicht

(b) Materialzufuhr und Konditionierung

Abb. 4.34: *Ultimaker 3* mit Materialzufuhr und Aufbewahrungseinheit *eBOX*

Der Drucker verfügt über zwei separate Düsen, deren Mittelpunkte möglichst präzise zueinander eingestellt werden sollten, um eine Verschiebung der Bauteilkoordinaten zu vermeiden. Der *UM3* verfügt hierzu über eine halbautomatische Funktion, bei der ein Testmuster mit beiden Materialien gedruckt und mit einem mitgelieferten

Referenzblatt verglichen wird. Das Vorgehen kann dabei mit dem Ablesen eines Nonius z. B. bei einem Messschieber verglichen werden. Es wird sowohl der x- als auch y-Abstand zwischen den Düsen gewählt, bei dem die abgelegten Linien bestmöglich fluchten. Gegenüber der Werkseinstellung hat sich für das konkret eingesetzte Gerät eine Abweichung von 0,15 mm in x-Richtung und 0,05 mm in y-Richtung ergeben. Die späteren Versuche zeigen, dass Abweichungen in dieser Größenordnung bereits deutliche Auswirkungen auf die Haltekraft zwischen den Probekörpern haben. Insbesondere führen die Abweichungen zu einer Verschiebung der Probekörpern zueinander. Die Verbindung wird in diesem Fall auf einer Seite mit zu geringem und auf der gegenüberliegenden Seite mit zu hohem Spalt zwischen den Probenhälften ausgeführt. Die Situation ist in Abbildung 4.35 schematisch dargestellt.

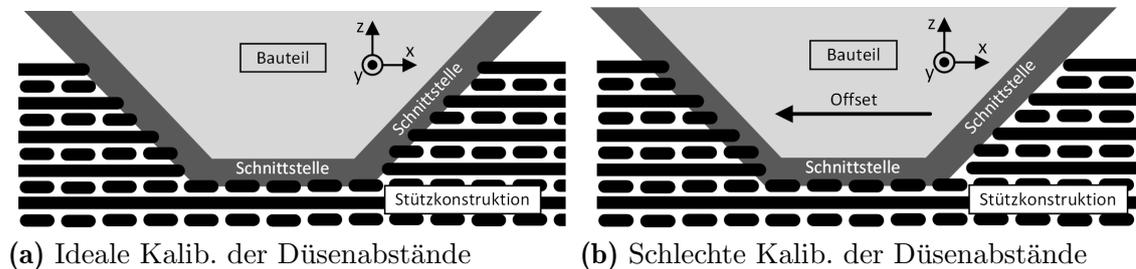


Abb. 4.35: Einfluss der Kalibrierung des Drucksystems

Die Kalibrierung des Abstandes in z-Richtung wird durch den Drucker automatisch durchgeführt. Zur Detektion der jeweiligen Düsenposition wird die Bauplattform mit geringem Vorschub in Richtung der Düse verfahren, bis die zwei Objekte in Kontakt kommen. Beide *Printcores* werden durch einen internen Mechanismus mit Federkraft gegen einen elektrisch kontaktierten Anschlag zur Positionierung gedrückt. Sobald das Druckbett die Düse in positive z-Richtung anhebt, wird der Kontakt getrennt. Die Steuerung detektiert in dieser Situation die abgetastete Tiefe und speichert diese im internen Speicher. Der Vorgang wird für beide Düsen und mehrere Positionen auf der Bauplattform wiederholt. Damit ist der *UM3* zusätzlich in der Lage, eine begrenzte Schiefstellung der Bauplattform durch eine kontinuierliche Nachstellung in Richtung der z-Achse zu kompensieren. Abweichungen in der Kalibrierung des z-Abstandes der Düsen führen dazu, dass das Baumaterial mehr oder weniger stark in das Stützmaterial eingepresst wird. Damit wirken sich derartige Abweichungen unmittelbar auf die erzielte Haltekraft aus.

Bei der Einrichtung des Versuchssystems hat sich die Nachgiebigkeit der Bauplattform des *Ultimaker 3*, die einseitig geführt und angetrieben ist, überdies als Problemstellung herausgestellt. Dieser Aufbau der z-Achse sorgt für eine relativ geringe Steifigkeit gegen das Kippen, insbesondere im vorderen Bereich des Bauraums. Dies wird besonders beim automatischen Abtasten der Bauplattform deutlich, da

für das Auslösen der federbelasteten Kontakte der *Printcores* eine nennenswerte Kraft aufgebracht werden muss. Das Druckbett neigt sich unter dieser Belastung zunehmend mit größer werdendem Abstand zur Aufhängung. Die Steuerung scheint diesen Umstand durch eine im Speicher abgelegte Korrekturtabelle zu berücksichtigen. Allerdings zeigen Testdrucke, welche die gesamte Baufläche belegen, dass die abgelegten Bahnen nicht überall gleich breit und dick sind. Als Abhilfe wird die Bauplatte manuell durch die Rändelschrauben der Bauplattform nivelliert. Hierzu wird der Abstand zwischen Düse und Bauplattform mit Hilfe einer Fühlerlehre auf einen Spalt von 0,05 mm eingestellt. Der Vorgang wird für mehrere Punkte wiederholt, um eine Parallelität der Bewegungsebene des Druckkopfes und der Oberfläche der Bauplatte zu erreichen.

Da der Bauraum des *UM 3* zur Front- und Oberseite des Geräts großflächig geöffnet ist, unterliegt die Probenfertigung nicht nur der Umgebungstemperatur, sondern auch Luftströmungen im Umgebungsraum. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird die vom Hersteller erhältliche Frontabdeckung aus transparentem Kunststoff eingesetzt. Der Bauraum bleibt an der Oberseite weiterhin geöffnet.

Materialkonditionierung

Das Material wird für mindestens 8 Stunden bei 65 °C in einem Industrieofen des Modells *ED 23* der *Binder GmbH* getrocknet und anschließend in einer Aufbewahrungseinheit *eBOX* des Herstellers *eSUN* mit integrierter Beheizung bei 60 °C gelagert. Eine geringe Menge an Trocknungsmittel befindet sich ebenfalls in der Aufbewahrungsbox, um die Feuchtigkeitszunahme zwischen den Versuchen gering zu halten.

Neben der Konditionierung des Filaments außerhalb der Drucker wird auch das Material in der Düse auf einen möglichst gleichbleibenden Zustand vorbereitet. Die Schmelzzone des *UM 3* besitzt nach eigener Berechnung ein Volumen von ca. 120 mm³. Um thermisch geschädigtes Material vor dem eigentlichen Druckobjekt aus dem Heißkanaldüse entfernen, wird eine Zusatzgeometrie gedruckt, die durch *Cura* automatisch generiert werden kann. Beim PLA werden lediglich 20 mm³ aus der Düse entfernt, da es nicht über einen längeren Zeitraum auf erhöhter Temperatur in der Düse steht. Sobald kein PLA mehr eingesetzt wird, erfolgt eine vollständige Abschaltung der Beheizung des Materials und ein Rückzug des Filaments von 16 mm. Das PETG wird hingegen bereits zu Beginn des Druckprozesses auf Wartetemperatur aufgeheizt. Da das Filament aber bei Deaktivierung 12 mm zurückgezogen wird, werden nur die ersten 70 mm³ für das zusätzliche Bauteil verwendet. Abbil-

Abbildung 4.36 zeigt das Druckteil, welches nach jedem Düsenwechsel angefahren und zur Konditionierung der Schmelze genutzt wird.



Abb. 4.36: Abstreifturm zur Konditionierung der Schmelze beim Düsenwechsel

Haftvermittler und weitere Hilfsmittel

Um das verwendete Stützmaterial auf der Bauplattform zu fixieren, wird als zusätzlicher Haftvermittler *DimaFix* von *DIMA 3D s.l.* auf die Bauplattform appliziert. Je nach Wahl des Stützmaterials kann auf diese Maßnahme verzichtet werden. Das verwendete PLA baut allerdings nahezu keine Haftung mit der mitgelieferten Bauplatte des *UM 3* aus Glas auf. Durch den Haftvermittler wird eine mäßige Anhaftung erreicht, sodass die gedruckten Proben im Druckprozess sicher fixiert sind und nach dessen Beendigung zerstörungsfrei gelöst werden können. Für das Ablösen wird ein Spachtel verwendet, der unter die Probe geschoben wird, ohne die Schnittstelle zwischen Stütz- und Baumaterial zu belasten und damit die spätere Zugprüfung zu beeinflussen. An der Düse anhaftendes Material kann sich während des Druckprozesses lösen und im ungünstigen Fall die Ausprägung der Schnittstelle verändern. Daher werden beide Düsen nach jeder Probe mit einer Drahtbürste mit Messingborsten gereinigt.

Allgemeine Fertigungsparameter

In Tabelle 4.5 sind die wichtigsten Grundeinstellungen zusammengefasst, die für die Fertigung aller Probenkörper verwendet werden. Überdies werden u. a. die Parameter *Gitterdichte* und *Materialmenge* der formschlüssigen Schnittstelle bei der

Parameter	Stützstruktur (PLA)	Bauteil (PETG)
Düsendurchmesser	0,4 mm	0,4 mm
Extrusionstemperatur	225 °C	240 °C
Temp. Bauplattform	50 °C	50 °C
Lagenbreite	0,4 mm	0,4 mm
Lagenhöhe	0,2 mm	0,2 mm
Außenlinien	7	4
Bodenlagen	7	4
Decklagen	7	4
Füllungsdichte	20 %	20 %
Kühlung	30 % - 100 %	15 % - 30 %
Mittlere Druckgeschw.	45 mm/s	45 mm/s

Tab. 4.5: Basisparameter für die Probenfertigung

Durchführung der empirischen Versuche variiert. Die gewählten Einstellungen entsprechen den Herstellerangaben und Standardprofilen des *Ultimaker 3* in *Cura* und stellen keine besonderen Anforderungen an Material oder Maschine. Während PLA als Stützmaterial mit 225 °C Düsentemperatur und einer Kühlung von 30 % bis 100 % gedruckt wird, erfolgt die Extrusion von PETG mit 240 °C und einer geringeren Kühlung von 15 % bis 30 %. Die Luftmenge ist abhängig von der Lagendauer und wird bis auf das angegebene Maximum bei einer minimalen Lagendauer von 5 s gesteigert.

4.6 Empirische Versuche

4.6.1 Vorgehen

Für die Planung und Durchführung der empirischen Versuche werden die Methoden der statistischen Versuchsplanung angewandt, um einen möglichst hohen Aussagegehalt der Untersuchung zu erreichen. Dabei stellen die nachfolgend angewandten Techniken eine etablierte Basis für eine strukturierte Durchführung dar. Zunächst werden die nötigen Grundlagen vermittelt, welche für das Verständnis erforderlich sind. Im Rahmen dieser Arbeit können allerdings nicht alle Details zu den angewandten Methoden ausführlich beschrieben werden. Es sei daher auf vertiefende

Fachliteratur wie [SvH10], [Kle16] und insbesondere auf [Mei18] für den Einsatz der Statistiksoftware *JMP* von *SAS Institute Inc.* verwiesen. Anschließend wird das Versuchssystem inklusive seiner Grenzen sowie der ein- und austretenden Stoff-, Energie- und Informationsflüsse beschrieben. Im nächsten Schritt werden die beteiligten Komponenten im inneren des Systems beschrieben und ihre Eignung für die Untersuchung sichergestellt. Nach der Auswahl eines geeigneten Versuchsplans werden die Proben gefertigt und durch eine zerstörende Zugprüfung ausgewertet. Abschließend folgen die Modellbildung und Diskussion der gefundenen Zusammenhänge.

4.6.2 Statistische Grundlagen

Einleitung

Das folgende Unterkapitel 4.6.2 ist stark an Kapitel 3 der unveröffentlichten Bachelorarbeit des Autors mit dem Titel *Experimentelle Untersuchung signifikanter Einflussgrößen auf das Zeitspannungsvolumen beim Bandschleifen von Edelstahl* angelehnt, die im Jahr 2012 erstellt wurde. Das Kapitel ist inhaltlich an diese Ausarbeitung angepasst, entspricht in den wesentlichen Punkten aber der Bachelorarbeit und wurde auch damals mit der Intention einer kurzen, wenn auch als notwendig empfundenen Einführung in die grundlegenden statistischen Zusammenhänge zusammengestellt. Zunächst werden einige essentielle Grundbegriffe und Konzepte eingeführt, die zur weiteren Beschreibung erforderlich sind. Anschließend werden die Bedeutung der Normalverteilung sowie Abweichungen von dieser für die statistische Versuchsplanung erläutert. Die beschriebenen Zusammenhänge verdeutlichen die Erforderlichkeit einer präzisen Definition des Versuchssystems, der Analyse aller beteiligten Komponenten und der umfänglich dokumentierten Versuchsdurchführung.

Grundbegriffe

Faktoren und Zielgrößen Als Faktoren werden diejenigen Einflussgrößen bezeichnet, die im Laufe der Versuchsdurchführung systematisch variiert werden. Im vorliegenden Fall soll bestimmt werden, ob der Faktor einen Einfluss auf die festgelegte Zielgröße besitzt bzw. wie groß dieser ist. Die Faktoren werden auf mindestens zwei Stufen getestet, die beispielsweise eine geringe oder hohe Gitterdichte der Stützkonstruktion darstellen, während die erreichte Haltekraft zwischen den Probenhälften als Zielgröße betrachtet wird [SvH10].

Die H_0 -Hypothese Bei der Untersuchung von Faktoren wird zunächst von der Annahme ausgegangen, dass sie keinen Einfluss auf die Zielgröße haben. Dies wird als Nullhypothese (H_0) bezeichnet. Die Alternativhypothese (H_A) wird dann gewählt, wenn die aufgenommene Beobachtung nicht mit der Annahme von H_0 vereinbar und ein signifikanter Einfluss wahrscheinlich ist [SvH10]. Die Abkürzungen H_0 sowie H_A sind [Mei18] entnommen.

Das α -Risiko Das α -Risiko beschreibt die Wahrscheinlichkeit, die H_0 -Hypothese abzulehnen, obwohl kein signifikanter Einfluss besteht. Üblicherweise wird die Alternativhypothese H_A angenommen, falls diese Wahrscheinlichkeit ein α -Risiko von beispielsweise 0,05 bzw. 5 % unterschreitet. Die Wahrscheinlichkeit, einen Effekt fälschlicherweise anzunehmen, der nicht existiert, wird in diesen Fällen als ausreichend gering akzeptiert [SvH10].

Das β -Risiko Das β -Risiko beschreibt die Wahrscheinlichkeit, die H_0 -Hypothese anzunehmen, obwohl ein signifikanter Einfluss besteht. Häufig ist es zweckdienlicher, die *Power* eines Versuchs zu ermitteln, welche als $1 - \beta$ definiert ist und eine Aussage darüber liefert, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, einen signifikanten Einfluss als solchen zu erkennen [SvH10].

Die Normalverteilung und ihre Bedeutung

Jedes beobachtete natürliche System unterliegt Schwankungen. Daher treten selbst bei Versuchswiederholungen mit konstanten Parametern Differenzen im Ergebnis auf. Die Messwerte streuen um einen Mittelwert, wobei große Abweichungen in der Regel seltener auftreten als Punkte, die nahe dem Mittelwert liegen. Messungen realer Systeme, auf deren Verhalten eine Vielzahl verschiedener Einflüsse einwirkt, lassen sich häufig durch die sogenannte Normalverteilung beschreiben [Kle16].

Abbildung 4.37 zeigt eine generierte Zufallsverteilung von Messwerten, die einer Normalverteilung folgen. Dazu wird das auf der Abszisse aufgetragene Merkmal in Wertebereiche unterteilt und die absolute Häufigkeit der aufgetretenen Beobachtungen in jedem Bereich auf der Ordinate aufgetragen. Form und Größe des entstehenden Histogramms sind abhängig von der Menge der eingetragenen Messwerte und der gewählten Breite der Gruppen. Um die Ergebnisse unabhängig betrachten zu können, wird die absolute Häufigkeit auf die Gesamtzahl der Messwerte bezogen, sodass sich die relative Häufigkeit ergibt. Zusätzlich kann die Abhängigkeit von der Gruppenbreite eliminiert werden, indem die relative Häufigkeit auf diese bezogen wird.

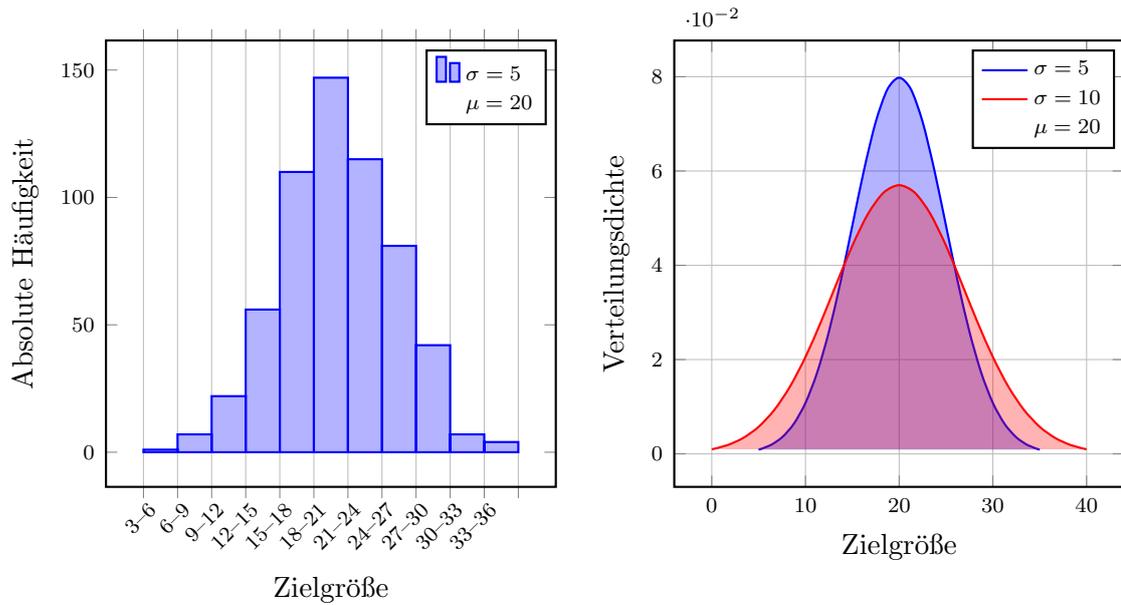


Abb. 4.37: Histogramm und entsprechende Verteilungsdichte einer Normalverteilung

Die letztgenannte Umformung liefert die Häufigkeitsdichte, die mit steigender Anzahl der Messwerte und sinkender Gruppenbreite in die Verteilungsdichte übergeht [Kle16].

Verteilungsdichte:
$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Schätzer des Mittelwertes:
$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.2)$$

Schätzer der Varianz:
$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.3)$$

Schätzer der Standardabweichung:
$$s = \sqrt{s^2} \quad (4.4)$$

Die in Abbildung 4.37 dargestellte Kurve beschreibt die Dichte der Normalverteilung und folgt der Funktion 4.1. Als Parameter besitzt diese den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ , welche die Form der Dichtefunktion bestimmen. Aus einer Menge n an Einzelwerten y_i können die Schätzer \bar{y} , s^2 und s für den Mittelwert μ , die Varianz σ^2 und die Standardabweichung σ durch Anwendung der Gleichungen 4.2 bis 4.4 bestimmt werden [Kle16].

Die Verteilungsdichte besitzt die entscheidende Eigenschaft, dass die Fläche unter der Kurve die Wahrscheinlichkeit darstellt, mit der ein Wert aus einem betrachteten Wertebereich auftritt. Abbildung 4.38a zeigt die rechte Seite einer Normalverteilungsdichte, die durch Quantilschritte in flächengleiche Segmente — Bereiche gleicher Auftretenswahrscheinlichkeit — aufgeteilt wird. Dadurch, dass Werte in den

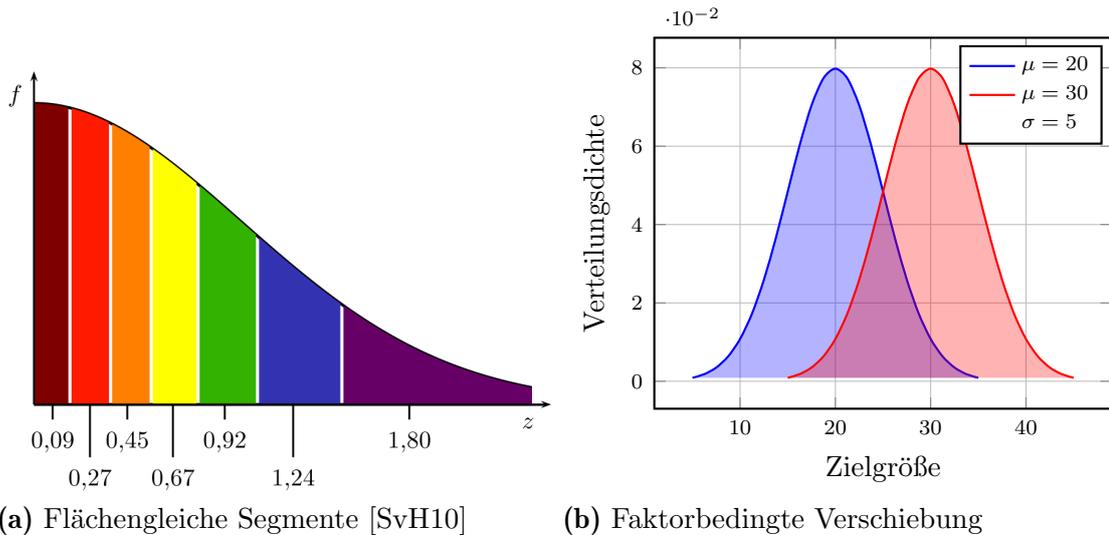


Abb. 4.38: Quantilschritte und Mittelwertverschiebung

äußeren Bereichen viel seltener auftreten als solche nahe dem Mittelwert, besitzen diese Bereiche eine wesentlich größere Breite [SvH10]. Mit den vorgestellten Konzepten lässt sich bereits der zentrale Gedanke der Versuchsauswertung darstellen. Dieser soll anhand einer fiktiven Versuchsdurchführung als Minimalbeispiel erläutert werden.

Für den vorliegenden Fall werden Probenkörper mit geringer und hoher Gitterdichte der Stützkonstruktion gefertigt sowie geprüft. Für beide Gruppen an Proben können separat die Schätzwerte \bar{y} und s^2 für Mittelwert und Varianz bestimmt werden. Abbildung 4.38b zeigt zwei fiktive Verteilungskurven und die Verschiebung des Mittelwerts durch den Wechsel der Faktorstufe. Das Ziel der Auswertung ist die Entscheidung, ob zwischen der Veränderung der Gitterdichte und der erzielten Haltekraft ein signifikanter Einfluss besteht.

Zunächst wird von der H_0 -Hypothese ausgegangen, welche in diesem Fall dafür steht, dass es keinen Einfluss der Gitterdichte gibt und alle Messwerte aus derselben Verteilung stammen. An dieser Stelle wird mit dem P-Wert ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eingeführt, dass **unter Annahme der H_0 -Hypothese die beobachtete Werteverteilung und extremere auftreten** [WH11]. Diese Betrachtungsweise ist essenziell und taucht später als Ergebnis der Analysemethoden wieder auf, welche eine Berechnung des Wertes ermöglichen.

Die H_0 -Hypothese wird abgelehnt, falls der P-Wert unter das akzeptierte α -Risiko fällt. Dies bedeutet nicht, dass die gefällte Entscheidung in jedem Falle korrekt ist, sondern dass die Wahrscheinlichkeit, einen Effekt irrtümlich als signifikant anzunehmen, als ausreichend gering erscheint. Im Falle des Beispiels kann auf diese Weise

abgeschätzt werden, ob die Messwerte bei erhöhter Gitterdichte aus einer neuen Normalverteilung mit verschobenem Mittelwert stammen oder lediglich Teil einer Normalverteilung mit größerer Standardabweichung sind.

Bei Betrachtung der Abbildung 4.38b werden zwei Zusammenhänge intuitiv deutlich. Die Irrtumswahrscheinlichkeit und damit auch der Versuchsumfang fallen, wenn die Standardabweichung sinkt und die Verschiebung des Mittelwertes steigt. Distinkte Verteilungen sind leicht zu erkennen und auf die Variation der Faktorstufen zurückzuführen, während kleine Auswirkungen auf die Zielgröße, insbesondere bei hoher Standardabweichung, diesen nur mit zunehmender Unsicherheit zugeordnet werden können. Die Stärke der Einflüsse der Faktoren kann grundsätzlich nicht beeinflusst werden, sondern ist durch den Gegenstand der Untersuchung vorgegeben. Hingegen kann die Standardabweichung durch die nachfolgenden Maßnahmen positiv beeinflusst werden.

4.6.3 Definition des Versuchssystems

Überblick

Die Definition des Versuchssystems beschreibt das Zusammenwirken der Komponenten des Versuchsaufbaus und strukturiert diesen. Als erstes werden hierzu die Systemgrenzen gezogen und die ein- sowie austretenden Stoff-, Energie- und Informationsflüsse angetragen (siehe Abbildung 4.39). Im einem weiteren Schritt wird der zunächst als *Blackbox* betrachtete Prozess zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen möglichst präzise identifiziert. Abschließend werden die für die Durchführung der Versuchsplanung erforderlichen Qualitätsmerkmale und Einflussgrößen festgelegt. Die grundlegende Schwierigkeit dieses Vorgehens liegt in der Überlagerung der Prozesseinflüsse und der Einwirkung nicht identifizierter oder falsch eingeschätzter Einflussgrößen. Gelingt keine vollständige Beschreibung des Versuchssystems, so kann der gesuchte Zusammenhang zwischen den Faktoren und Qualitätsmerkmalen nicht oder nur unzureichend bestimmt werden.

Systemgrenzen

Zunächst wird das Gesamtsystem als *Blackbox* mit definierten Grenzen betrachtet, um den Rahmen der Untersuchung und eine eindeutige Aufstellung der Ein- und Ausgangsgrößen festzulegen. Diese Größen beschreiben den Austausch von Stoff,

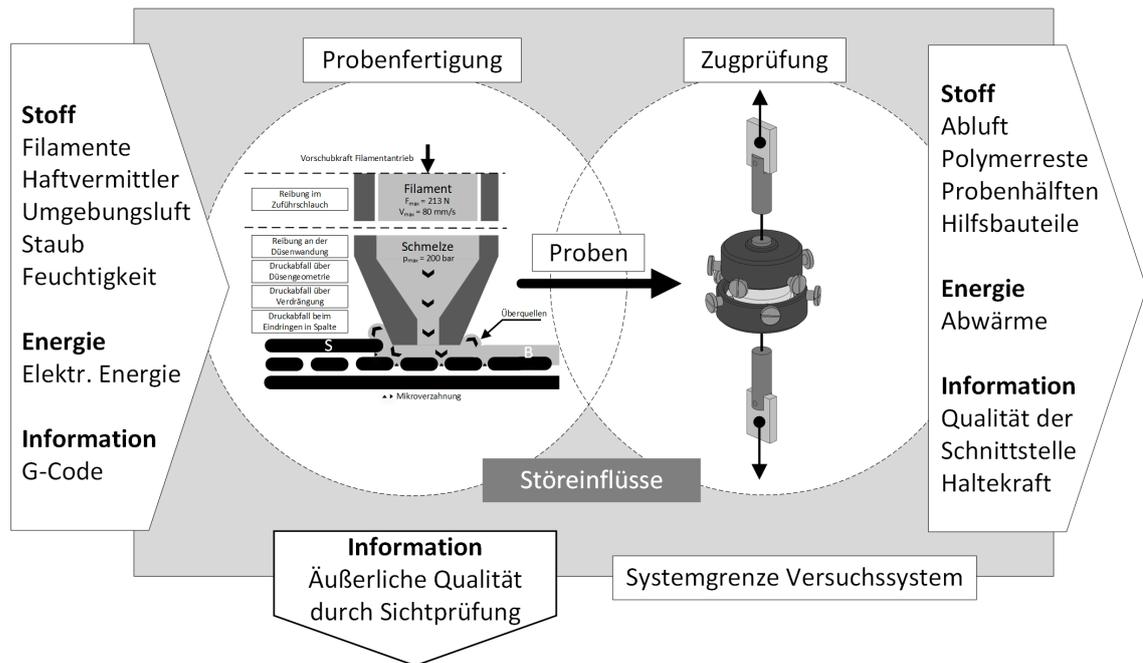


Abb. 4.39: Darstellung des Versuchssystems mit Stoff-, Energie- und Informationsflüssen

Energie und Information über die Systemgrenzen und werden in eben jene drei Kategorien eingeteilt.

Als **Stofffluss** treten die zwei Filamente aus Stütz- und Baumaterial sowie der Haftvermittler als Hilfsstoff in das System ein. Für den Prozess sind dabei der Zustand der Materialkonditionierung (Trocknung) und die relevanten Eigenschaften des Polymers für die additive Fertigung von Bedeutung. Während auf die Materialkonditionierung des Filaments positiv eingewirkt werden kann, ist die Einhaltung des Durchmessers innerhalb der Toleranzen durch den Hersteller vorgegeben. Umgebungsluft tritt ebenfalls in das System ein, da der *UM 3* keinen geschlossenen Bauraum besitzt. Die in Abschnitt 4.5.5 beschriebene Abdeckung der vorderen Zugangsöffnung dient lediglich der Reduzierung des Luftaustausches. Aus dem System tritt als Stofffluss die gefertigte Probe und Abfall in Form des Druckobjektes für den Düsenwechsel aus. Sonstige Polymerrückstände an der Düse werden ebenfalls zyklisch aus dem Drucksystem entfernt. Nach dem Druckprozess wird die Probe in die Prüfanlage eingelegt und einer zerstörenden Zugprüfung unterzogen, sodass am Ende die zwei Probenhälften vorliegen.

Der **Energiefluss** beläuft sich auf die für den Betrieb der Anlagen aufgewendete elektrische Energie, die das System an verschiedener Stelle in Form von Abwärme verlässt. Maßgeblich für den Energieverbrauch ist die Beheizung der Bauplattform sowie der Düse.

Von besonderem Interesse für die Untersuchung ist der **Informationsfluss**. In das Versuchssystem werden die Steuerungsbefehle eingegeben, die der *Slicer* sowie der *G-Code Manipulator* generieren. Während des Druckprozesses werden keinerlei Daten protokolliert, lediglich der Druckfortschritt wird grafisch angezeigt. Nach der Fertigstellung entsteht die Information, ob das Bauteil nach Sichtprüfung in Ordnung ist oder offensichtliche Fehler aufweist. Innere Fehlstellen können zu diesem Zeitpunkt nicht identifiziert und daher nicht mit Sicherheit dem Fertigungs- oder Prüfprozess zugeordnet werden. Die anschließende Zugprüfung generiert eine Information über die mechanische Belastbarkeit der Verbindung zwischen den Probenhälften (Haltekraft).

Qualitätsmerkmale

Das im Rahmen der Untersuchung primär fokussierte Qualitätsmerkmal ist die Haltekraft zwischen den Probenhälften aus Bau- und Stützmaterial, die durch eine Zugprüfung ermittelt wird. Das sekundäre Qualitätsmerkmal ist die Oberflächenqualität, welche in qualitativer Form bewertet wird. Sie ist kein Optimierungsziel, da sie konzeptbedingt mit der Stärke der Ausprägung der formschlüssigen Elemente korreliert. Hinterschneidungen führen mit zunehmender Größe zwangsläufig zu einer größeren Oberflächenrauheit und einer damit geringeren Oberflächenqualität. Die verschiedenen Kombinationen der Faktorstufen werden hinsichtlich dieser beiden Qualitätsmerkmale protokolliert, um in der Auswertung die Stärke der Einflussgrößen bestimmen zu können.

Die Wahl der Qualitätsmerkmale ermöglicht nach der Auswertung und Modellbildung, eine passende Konfiguration für einen Anwendungsfall zu wählen und die dadurch erreichbare Oberflächenqualität abzuschätzen. Nicht für jede Materialkombination ist eine möglichst starke Fixierung des Bauteils durch die Stützkonstruktion angemessen. Es erscheint im Gegenteil vorteilhaft, eine schwächere Ausprägung der formschlüssigen Verbindung zu wählen, um eine maximale Oberflächenqualität und ein einfaches Lösen der Stützkonstruktion zu begünstigen.

Einflussgrößen und Zielbereiche

Zur weiteren Beschreibung des Systems werden die identifizierten Einflussgrößen weiter in Faktoren, Störgrößen und konstante Einflussgrößen gegliedert. Abbildung 4.40 zeigt ein Ursache-Wirkungs-Diagramm, das die Zusammenhänge darstellt.

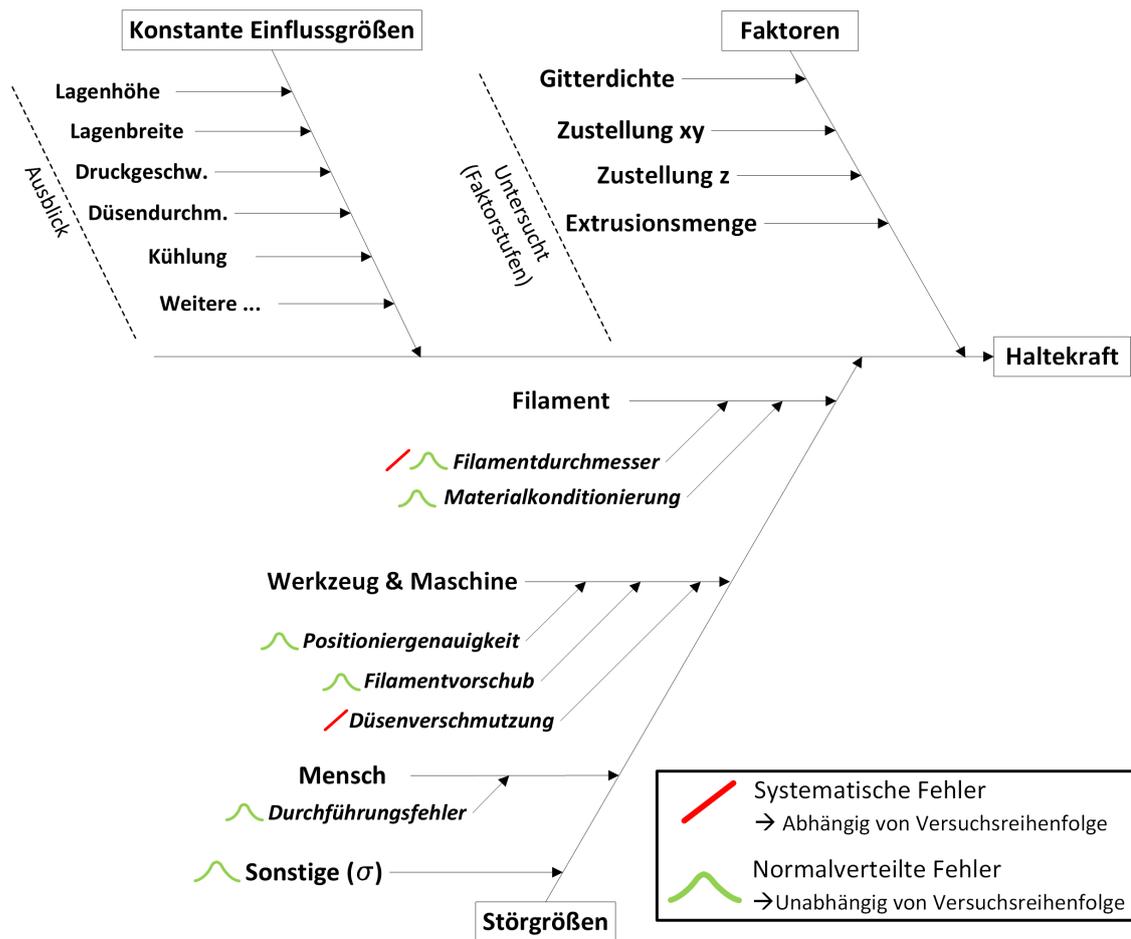


Abb. 4.40: Ursache-Wirkungs-Diagramm der untersuchten Zusammenhänge

Als **Faktoren** werden diejenigen Versuchsparameter bezeichnet, die gezielt auf mindestens zwei Stufen eingestellt werden und deren Einfluss auf die Qualitätsmerkmale untersucht wird. Die Stufen stellen die verschiedenen Zustände der Faktoren dar und müssen mit bestmöglicher Wiederholgenauigkeit eingestellt werden. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass alle Stufenkombinationen der unterschiedlichen Faktoren durchführbar sind und sich in den Extrempunkten nicht gegenseitig ausschließen.

Zur Planung und Auswertung der Versuche wird die statistische Software *JMP Pro* (*JMP*) in der Version 14.1.0 von *SAS Institute Inc.* verwendet. Um die Versuchspläne übersichtlicher und vergleichbar zu gestalten, werden in Anlehnung an die Software die Faktorstufen mit den Bezeichnungen a , $-$, 0 , $+$ und A kodiert, welche für die insgesamt fünf untersuchten Stufen jedes Faktors stehen (vgl. Tabelle 4.6):

Die Faktoren A bis D werden als stetig festgelegt und können daher bei der Generierung der Versuchspläne beliebige Werte innerhalb der Grenzen annehmen. Der Überhangwinkel wird als kategorialer Faktor (E) definiert und lediglich in zwei Stufen untersucht. Grundsätzlich gibt es mehrere Optionen mit dem kategorialen Faktor in der Modellbildung umzugehen. Im Rahmen dieser Untersuchung werden

zwei separate Versuchspläne für die beiden Faktorstufen 0° (VP 0°) und 30° (VP 30°) erstellt. Ob eine Interpolation der Modellkoeffizienten zwischen den zwei Stufen sinnvoll ist, wird nach der Anpassung beider Beschreibungsmodelle entschieden.

Sym.	Faktor	Einheit	Faktorstufen				
			a	-	0	+	A
A	Zustellung z	mm (Abstand)	-0,167	-0,15	-0,11	-0,07	-0,053
B	Zustellung xy	mm (Abstand)	0,117	0,2	0,4	0,6	0,683
C	Gitterdichte	% (Anteil)	60,86	65,0	75,0	85,0	89,14
D	Extrusionsmenge	% (Basiswert)	94,8	100,0	112,5	125,0	130,18
E	Stützwinkel	$^\circ$ (Grad)		0		30	

Tab. 4.6: Untersuchte Faktoren und Stufen

Um sicherzustellen, dass alle Faktorkombinationen des Versuchsplans zu einer erfolgreichen Fertigung einer Probe führen, werden diejenigen Kombinationen mit einer zu erwartenden maximalen und minimalen Haltekraft für Vorversuche gefertigt und geprüft. Die Werte für die Faktorstufen werden durch *JMP* auf Basis eines *Central-Composite-Designs (CCD)* generiert, wobei ein verkürzter Verlängerungsfaktor von 1,414 gewählt wird. Als Verlängerungsfaktor wäre ein Wert von 1,668 bis 1,682 für die Orthogonalität und Rotierbarkeit des Versuchsplans ideal, allerdings führen die daraus resultierenden extremen Faktorkombinationen zu fehlerhaften Proben, die nicht ausgewertet werden können. Es wird ein *CCD* verwendet, da dieses Design sehr wirtschaftlich bzgl. des Versuchsumfanges bei gleichzeitig hohem Informationsgehalt ist. Ein Versuchsplan nach *George E. P. Box* und *Donald Behnken (Box-Behnken Design)* oder ein frei konfiguriertes Design sind aufgrund der gut abzubildenden Eckpunkte in der Probenfertigung nicht sinnvoll bzw. nötig. Auf ein *Screening* der Faktoren wird bei dieser Untersuchung verzichtet, da die Faktoren zum einen mit hoher Sicherheit signifikant sind und zum anderen die grundlegende Auswahl darstellen, die für den Aufbau des Formschlusses relevant ist.

Als **konstante Einflussgrößen** sind jene Parameter definiert, die während der Versuchsdurchführung näherungsweise konstant gehalten werden. Die aufgeführten Einträge im entsprechenden Zweig des Ursache-Wirkungs-Diagramms 4.40 sind als Beispiele für diese Einflussgrößen zu verstehen, da durchaus weitere potenzielle Größen benannt werden können. In diesem Bereich liegen auch mögliche Felder für weiterführende Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Störgrößen sind Einflussgrößen, deren Zustand Schwankungen unterlegen ist und die gleichzeitig nicht kontrolliert eingestellt werden können. Zur besseren Einteilung werden an dieser Stelle zwei verschiedene Typen von Störgrößen definiert, welche sich in ihrer Abhängigkeit von der Versuchsabfolge unterscheiden. Während die *unabhängigen Störgrößen* zu jedem Zeitpunkt einer Normalverteilung mit demselben Mittelwert folgen, zeigen die *abhängigen Störgrößen* eine Trendbewegung und können zur Verfälschung und folglich Fehlinterpretation der Messergebnisse führen.

4.6.4 Auslegung der Versuchspläne

Statistische Randbedingungen

Kennwert	Versuchspl. 0° (VP 0°)	Versuchspl. 30° (VP 30°)
α -Risiko	5 %	5 %
β -Risiko	10 %	10 %
Teststärke (<i>Power</i>)	90 %	90 %
Mittelpunktversuche	≥ 5	≥ 5
Wiederholungen	0	0
Faktoren	Zustellung z Gitterdichte Extrusionsmenge	Zustellung z Zustellung xy Extrusionsmenge
Qualitätsmerkmal	Haltekraft	Haltekraft
Standardabweichung	3,38 N	6,56 N
Identifizierbarer Einfluss	ca. 5 N	ca. 8 N

Tab. 4.7: Statistische Randbedingungen für beide Versuchspläne VP 0° und VP 30°

Für die Untersuchung werden zwei Versuchspläne generiert, welche den Raum der Faktorkombinationen anhand des Überhangwinkels aufteilen. Vor der eigentlichen Generierung der Pläne sind die statistischen Randbedingungen zu bestimmen.

Das α -Risiko und das β -Risiko werden mit nach der Literatur üblichen Werten auf 5 % und 10 % bzw. eine Teststärke von 90 % festgelegt. Es sollen überdies mindestens fünf Mittelpunktversuche verwendet werden, damit die Versuche zur Abschätzung der Standardabweichung sinnvoll verwertet werden können. Diese fünf Versuche, die im Vorfeld durchgeführt werden, liefern eine Standardabweichung von 3,38 N für den VP 0° und 6,56 N für den VP 30°.

Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies für beide Versuchspläne, dass eine Wahrscheinlichkeit von 5 % besteht, einen Effekt aufgrund der auftretenden Standardabweichung als signifikant anzunehmen, obwohl dieser nicht existiert. Gleichzeitig besteht eine Wahrscheinlichkeit von 90 %, einen Effekt korrekt als signifikant zu identifizieren, der bei Variation seiner Faktorstufe mindestens einen Einfluss von 5 N bzw. 8 N auf das Qualitätsmerkmal ausübt. Diese erste Einschätzung wird anhand eines üblichen *CCD* mit Hilfe von *JMP* durchgeführt. Grundsätzlich sind alle in Tabelle 4.7 dargestellten Kennwerte bis auf die Standardabweichung frei wählbar. Die im Rahmen der Untersuchung erzielten Ergebnisse müssen allerdings unter diesen spezifisch gewählten Randbedingungen betrachtet werden. Die erreichte Standardabweichung, die sinnvoll identifizierbare Effektstärke und der an dieser Stelle absehbare Versuchsumfang weisen darauf hin, dass die Vorbereitungen der Versuche sowie die Charakterisierung des Versuchssystems für das Ziel der Untersuchung ausreichend sind.

Die untersuchten Faktoren für die zwei Versuchspläne unterscheiden sich in einer Position aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der Schnittstelle. Für die unter 0° gefertigten Proben existiert keine sinnvolle Zustellung in der *xy*-Ebene, da hier kein Stützmaterial angeordnet ist. Mit diesem Versuchsplan wird hingegen der primär entscheidende Faktor *Gitterdichte* für die vertikale Einpressrichtung untersucht. Für die Versuche mit einem Überhangwinkel von 30° wird eine mittlere Gitterdichte als konstante Einflussgröße festgelegt und nicht variiert. Stattdessen wird hier die relevante Zustellung des Stützmaterials in der *xy*-Ebene untersucht. Die Reihenfolge, in der die zwei Versuchspläne durchgeführt werden, ist durch das beschriebene Vorgehen festgelegt. Da der Aufwand zur Variation der Faktorstufen insgesamt gering und für jeden Faktor gleich ist, wird der Versuchsplan vollständig randomisiert. Von einer Blockbildung wird aufgrund des Versuchsumfanges abgesehen.

Versuchsplan für flache Winkel (VP 0°)

Für beide Versuchspläne wird aus den beschriebenen Gründen das *CCD* als Basis verwendet. *JMP* bietet für die jeweils drei eingetragenen Faktoren mehrere Versuchspläne an, wobei sich die verschiedenen *CCD* nur durch den gewählten Verlängerungsfaktor und die Anzahl an Mittelpunktversuchen unterscheiden. Da die Fertigung und Prüfung der Proben einen akzeptablen Aufwand darstellen, wird ein Plan mit 23 Versuchen gewählt. Mit neun Mittelpunktversuchen ist dies der umfangreichste Versuchsplan, den die Software vorschlägt. Der Verlängerungsfaktor wird mit 1,414 kürzer eingestellt als vorgeschlagen, da andernfalls entweder der gültige Versuchs-

raum unnötig eingeschränkt wird oder Faktorkombinationen generiert werden, die nicht gefertigt werden können.

Sym.	Koeffizient (Einfluss 5 N)	Testst. (RMSE 3,38 N)	Korrelation
K	Achsenabschnitt	98,8 %	0 %
A	Zustellung z	99,7 %	0 %
C	Gitterdichte	99,7 %	0 %
D	Extrusionsmenge	99,7 %	0 %
AA	(Zustellung z) ²	98,5 %	17,9 % (CC & DD)
CC	(Gitterdichte) ²	98,5 %	17,9 % (AA & DD)
DD	(Extrusionsmenge) ²	98,5 %	17,9 % (AA & CC)
AC	Zust. z · Gitterdichte	97,1 %	0 %
AD	Zust. z · Extrusionsm.	97,1 %	0 %
CD	Gitterd. · Extrusionsm.	97,1 %	0 %

Tab. 4.8: Korrelationsmatrix und Teststärke für VP 0°

Tabelle 4.8 zeigt die Bewertung des generierten Versuchsplans. Dabei werden die Haupteffekte A, C und D, deren quadratische Einflüsse sowie die einfachen Wechselwirkungen betrachtet. Mehrfach-Wechselwirkungen höherer Ordnung besitzen üblicherweise einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Qualitätsmerkmal. Daher werden diese nur betrachtet, falls kein ausreichend passendes Beschreibungsmodell für die Zusammenhänge gefunden werden kann. Für eine Effektstärke von 5 N und eine Standardabweichung der Messergebnisse von 3,38 N ergibt sich für alle Terme eine ausreichende Teststärke von über 90 %. Die ebenfalls angegebenen Korrelationen sind ein Maß für die Vermischung der Effekte verschiedener Faktoren, die durch den Versuchsplan hervorgerufen werden. Grundsätzlich ist hier ein Wert von 0 % anzustreben, um eine eindeutige Zuordnung der Effekte zu ermöglichen. Bei dem erzeugten Versuchsplan korrelieren die quadratischen Effekte zu 17,9 % mit den Wechselwirkungen. Unter diesen Bedingungen kann eine starke Wechselwirkung zu einem fälschlicherweise als signifikant angenommenen quadratischen Effekt führen. Da die Korrelation relativ schwach ist und die Wahrscheinlichkeit für starke Wechselwirkungen ebenfalls als gering eingeschätzt wird, werden die erzielten Kennwerte des Versuchsplans als akzeptabel angesehen. Es sei angemerkt, dass ein *CCD* mit einem Verlängerungsfaktor von 1,668 keine Korrelationen sowie eine geringere durchschnittliche Varianz im Versuchsraum und damit einen leicht höheren Informationsgehalt pro durchgeführtem Versuch besitzt (u. a. höhere D-Effizienz). Allerdings sind Proben nur in einem bestimmten Prozessfenster zu fertigen, wodurch der Ver-

suchsplan mit dem größeren Verlängerungsfaktor einen kleineren Raum durch die – und + Stufen (vgl. Tabelle 4.6) abbilden kann. Dies wird als nachteilig für das Ziel der Untersuchung bewertet. Der gewählte Verlängerungsfaktor ist ein Kompromiss, um den größtmöglichen Informationsgehalt zu gewährleisten. Der Versuchsplan ist in vollständiger Form zusammen mit den erzielten Haltekräften und der Bewertung der Oberflächenqualität in Tabelle 4.10 im Abschnitt 4.6.6 abgebildet.

Versuchsplan für steile Winkel (VP 30°)

Der Versuchsplan für steile Winkel wird auf der gleichen Basis wie der für flache Winkel generiert und besitzt nahezu identische Eigenschaften. Tabelle 4.9 zeigt die Kennwerte und verwendeten Faktoren. Anstatt der *Gitterdichte* C, die als konstante Einstellung mit 75 % festgelegt wird, wird die Zustellung in xy-Richtung als Faktor (B) verwendet. Für steile Winkel werden so insgesamt die Faktoren A, B und D sowie deren quadratischen Effekte und Wechselwirkungen betrachtet.

Sym.	Koeffizient (Einfluss 8 N)	Testst. (RMSE 6,56 N)	Korrelation
K	Achsenabschnitt	93,4 %	0 %
A	Zustellung z	97,4 %	0 %
B	Zustellung xy	97,4 %	0 %
D	Extrusionsmenge	97,4 %	0 %
AA	(Zustellung z) ²	92,7 %	17,9 % (BB & DD)
BB	(Zustellung xy) ²	92,7 %	17,9 % (AA & DD)
DD	(Extrusionsmenge) ²	92,7 %	17,9 % (AA & BB)
AB	Zust. z · Zust. xy	89,0 %	0 %
AD	Zust. z · Extrusionsm.	89,0 %	0 %
BD	Zust. xy · Extrusionsm.	89,0 %	0 %

Tab. 4.9: Korrelationsmatrix und Teststärke für VP 30°

Mit der ermittelten Standardabweichung von 6,65 N und des kleinsten zu identifizierenden Effekteinflusses von 8 N ergibt sich für die Faktoren sowie die quadratischen Effekte eine Teststärke von über 90 %. Die Teststärke der Wechselwirkungen liegt bei 89 % und ist damit knapp unter der geforderten Grenze. Die 8 N sind allerdings nur eine Richtgröße, welche einen Eindruck von den Eigenschaften des Versuchsplans für die Versuchsbedingungen bietet. Aus diesem Grund wird die erreichte Teststärke als akzeptabel angesehen. Die Stärke der Korrelationen sowie deren Erklärung sind mit

denen des Versuchsplans für flache Proben identisch. Der vollständige Versuchsplan ist in Tabelle 4.11 in Abschnitt 4.6.6 zu finden.

4.6.5 Versuchsdurchführung

Zur praktischen Durchführung der Versuche wird zunächst der G-Code anhand des Versuchsplans generiert und unter Verwendung des *G-Code Manipulators* konvertiert. Anschließend werden die Proben mit dem *UM 3* gefertigt und beschriftet. Im nächsten Schritt erfolgt die Zugprüfung der Proben mit der Aufzeichnung der Messergebnisse. Bei der Handhabung der Proben zwischen den Prozessschritten ist besonders der Transport kritisch und wird belastungsfrei durchgeführt, da einige Faktorkombinationen zu einer sehr schwach ausgeprägten Haltekraft zwischen den zwei Probenhälften führen.

Die **Fertigung der insgesamt 46 relevanten Proben** verläuft problemlos. Durch zusätzliche Versuche im Vorfeld ist das stabile Prozessfenster bereits bekannt, sodass alle Proben sicher hergestellt werden können. Nach jeder Probe wird der *UM 3* von Polymerrückständen gereinigt, während nur ca. alle fünf Druckprozesse Haftvermittler an der Position der Probe aufgebracht wird. Kritisch ist zu bewerten, dass sich während der Druckprozesse Polymerrückstände an den Düsen sammeln, die in einigen Fällen in die Probe getragen werden. Grundsätzlich liegt dies nicht an der formschlüssigen Verbindungstechnik, sondern an den für reale Druckprozesse untypisch kurzen Wechselintervallen zwischen Bau- und Stützmaterial. *Cura* reduziert für inaktive Düsen die Temperatur, um das Nachlaufen von Schmelze zu reduzieren. Da die Intervalle allerdings deutlich kürzer sind als die Abkühl- und Aufheizzeiten der Heißkanaldüsen, wird die Temperatur durch *Cura* konstant gehalten. Problematische Verschmutzungen treten jedoch so selten auf, dass kritisch betroffene Proben entsorgt und neu gefertigt werden. Eine nicht im *UM 3* vorgesehene Bürstenleiste, wie sie beispielsweise bei verschiedenen additiven Fertigungssystemen von *Stratasys, Ltd.* eingesetzt wird, ist eine simple, aber nach eigener Erfahrung sehr effektive Vorrichtung zur Lösung dieser Problemstellung.

Die **Zugprüfung** verläuft ebenfalls wie geplant, allerdings wurde bei einer Probe eine unerwartet hohe Haltekraft von 580,3 N gemessen. Als Kraftaufnehmer wird eine Wägezelle des Typs *U2A* der *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)* eingesetzt, der für 500 N Nennkraft ausgelegt ist. Aus dem Datenblatt geht hervor, dass der Kraftsensor eine maximal zulässige Gebrauchskraft von 650 N besitzt (130 % der zul. Nennkraft). Es ist daher zu berücksichtigen, dass der ermittelte Wert u. U. nicht die für den Nennbereich gültige Messgenauigkeit aufweist. Eine Schädigung der

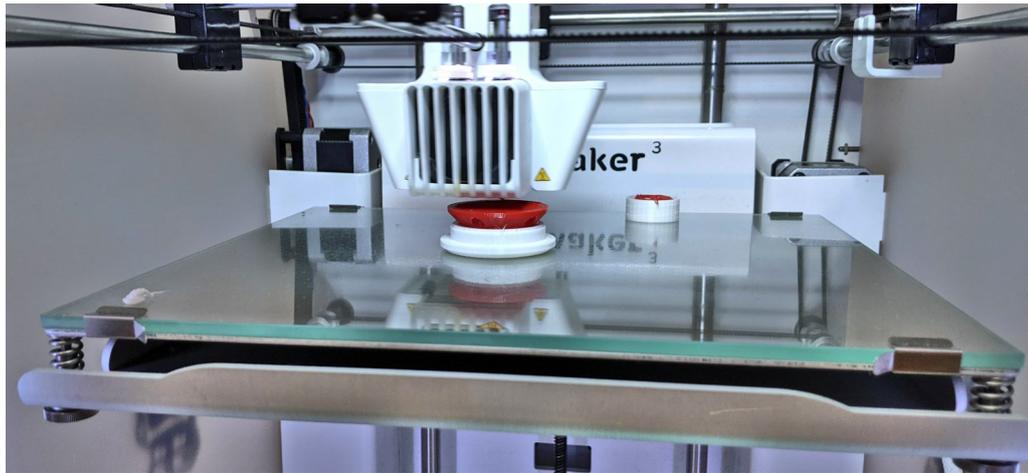


Abb. 4.41: Ultimaker 3 im Prozess der Probenfertigung

Messvorrichtung und eine damit einhergehende Beeinflussung nachfolgender Zugprüfungen werden ausgeschlossen. Bei der Durchführung der Zugprüfung werden keine weiteren Beobachtungen gemacht, die von der Planung abweichen.

4.6.6 Diskussion der Versuchsergebnisse

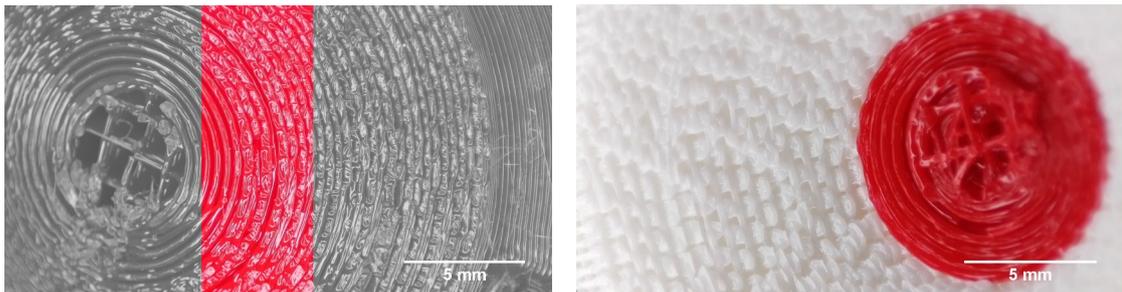
Vorgehen

Die vollständigen Versuchspläne sind in Tabelle 4.10 und 4.11 zusammen mit der gemessenen Haltekraft und der Bewertung der Oberflächenqualität zu finden. Nachfolgend werden zunächst die ermittelten Haltekraften diskutiert. Anschließend erfolgt die Erläuterung des gewählten Bewertungsschemas zur Einschätzung der Oberflächenqualität. Alle Proben sind im Anhang A.1 in Detailaufnahmen abgebildet.

Bewertung der Haltekraft

Beim Vergleich der beiden Versuchspläne wird unmittelbar deutlich, dass der für steile Winkel mit einer Spanne von 15,9 N bis 580,3 N einen größeren Zielbereich abdeckt (vgl. 2 N bis 158,3 N bei den flachen Proben). Die hohen erzielten Werte sind für den Einsatz als Stützstruktur zwar nicht sinnvoll, bieten aber einen interessanten Ausblick für die dauerhafte formschlüssige Verbindung von Thermoplasten. Beide Versuchspläne decken den Bereich der niedrigen Haltekraften umfangreich ab, sodass die Wahl des Faktorraums als gelungen bewertet wird. Eine erste qualitative Betrachtung bestätigt überdies die Modellvorstellung, die in Abschnitt 4.3.2 hergeleitet wird. Dabei führen Einstellungen, die ein tiefes Eindringen des Baumaterials in das Stützmaterial begünstigen, zu einem überproportionalen Anstieg der

Haltekraft. Diese Einschätzung gibt weiterhin einen ersten Hinweis darauf, dass quadratische Modelle oder Modelle höherer Ordnung zur Beschreibung der Zusammenhänge geeignet sein könnten. Alle Proben mit steilem Winkel weisen eine optische Unregelmäßigkeit im Bereich der Spitze auf, die durch den Prozess bedingt zu sein scheint und nicht auf einen grundlegenden Fehler des additiven Fertigungssystems oder der Zugprüfung zurückzuführen ist. Diese Fehlstellen betreffen nur jeweils die Spitze der Probenhälfte aus Baumaterial, während dieser Fehler in der Oberfläche der Stützkonstruktion nicht zu identifizieren ist.

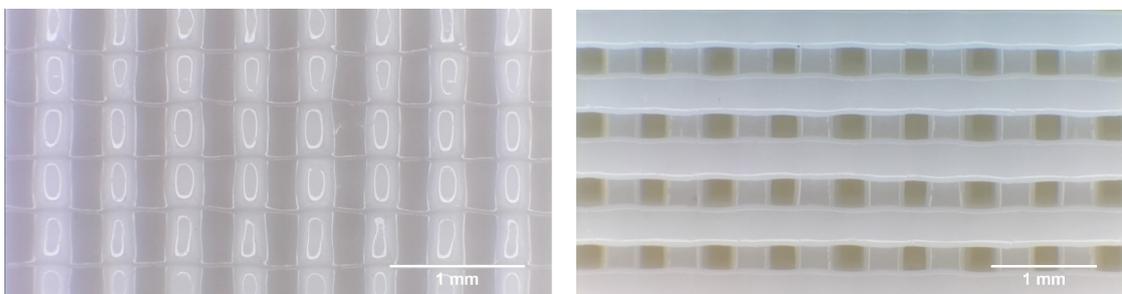


(a) Obere Hälfte mit Defekt

(b) Untere Hälfte mit abgerissemem Segment

Abb. 4.42: Abriss der Probenspitze bei hoher Haltekraft (Probe 10, VP 30°, 342,2 N)

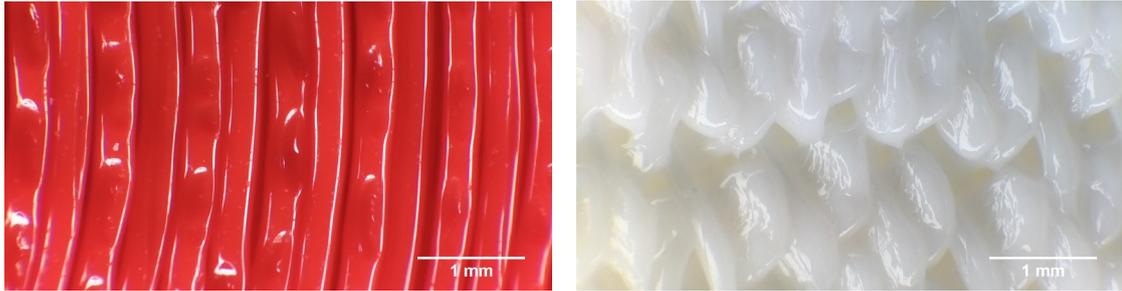
Da dieses Merkmal in Form einer ungleichmäßig ausgeprägten Lage in allen Proben mit steilem Winkel gleichermaßen vorhanden ist und sich nur auf einen kleinen Teil der Kontaktfläche bezieht, wird der Einfluss auf die Auswertung der erreichbaren Haltekraft als schädlich, aber akzeptabel gewertet. Einige der Proben mit sehr hoher Haltekraft reißen zudem an dieser Schwachstelle (vgl. Abb. 4.42). Da in diesem Belastungszustand allerdings schon der deutlich größere Kontaktbereich oberhalb der Fehlstelle versagt hat, wird die ermittelte Haltekraft in diesen Fällen als korrekt angenommen. Der Probenbruch erfolgt aufgrund der Materialeigenschaften in allen 46 Fällen schlagartig. Die nachfolgenden Abbildungen geben einen Eindruck von den Proben und den jeweils erreichten Haltekräften.



(a) Obere Hälfte mit Mikroverzahnung

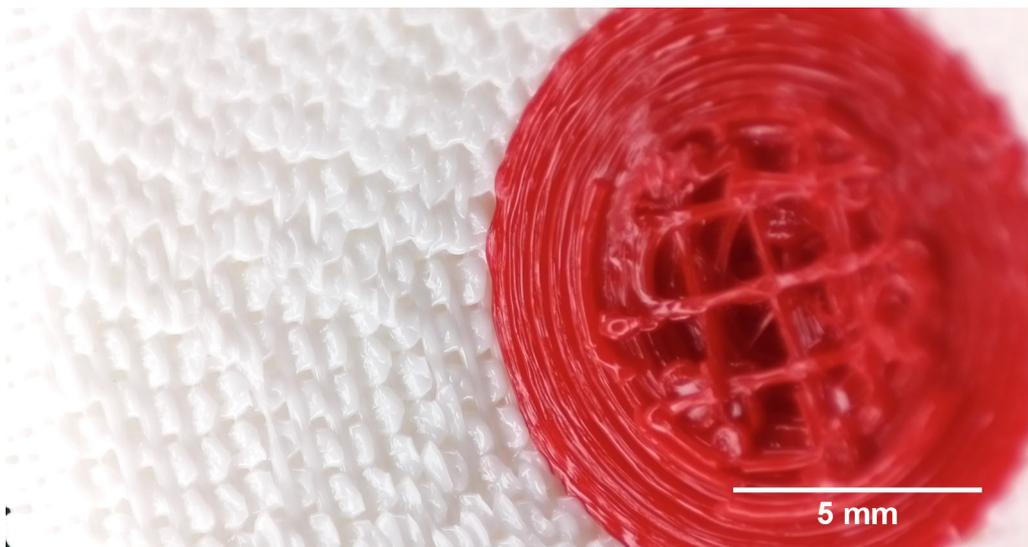
(b) Untere Hälfte mit Stützgitter

Abb. 4.43: Mikroverzahnung bei mäßiger Haltekraft (Probe 21, VP 0°, 56,5 N)



(a) Obere Hälfte mit Mikroverzahnung

(b) Untere Hälfte mit Stützgitter

Abb. 4.44: Mikroverzahnung bei mäßiger Haltekraft (Probe 16, VP 30°, 65,4 N)**Abb. 4.45:** Mikroverzahnung bei hoher Haltekraft (Probe 18 oben, VP 30°, 580,3 N)**Abb. 4.46:** Mikroverzahnung bei hoher Haltekraft (Probe 18 unten, VP 30°, 580,3 N)

Nr.	Muster	Zust. z [mm]	Gitterd. [%]	Extr. [%]	Haltekr. [N]	Qualität
1	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	17,1	+1
2	- - +	-0,15	65,0 %	125,0 %	116,9	+2
3	A00	-0,053	75,0 %	112,5 %	2,8	+1
4	- + -	-0,15	85,0 %	100,0 %	34,9	+1
5	- + +	-0,15	85,0 %	125,0 %	42,7	+1
6	+ - -	-0,07	65,0 %	100,0 %	7,4	-1
7	a00	-0,167	75,0 %	112,5 %	158,3	+2
8	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	24,1	+1
9	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	27,1	+1
10	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	24,1	+1
11	0a0	-0,11	60,86 %	112,5 %	29,2	+1
12	+ + +	-0,07	85,0 %	125,0 %	11,9	+1
13	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	21,1	+1
14	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	19,9	+1
15	+ - +	-0,07	65,0 %	125,0 %	14,8	+1
16	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	37,7	+1
17	00a	-0,11	75,0 %	94,8 %	14,4	+1
18	+ + -	-0,07	85,0 %	100,0 %	5,0	-1
19	0A0	-0,11	89,14 %	112,5 %	15,6	+1
20	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	34,8	+1
21	- - -	-0,15	65,0 %	100,0 %	56,5	+1
22	000	-0,11	75,0 %	112,5 %	21,9	+1
23	00A	-0,11	75,0 %	130,18 %	40,5	+1

Tab. 4.10: Auswertung der Proben unter einem Überhangwinkel von 0° (VP 0°)

Nr.	Muster	Zust. z [mm]	Zust. xy [mm]	Extr. [%]	Haltekr. [N]	Qualität
1	- - +	-0,15	0,2	125,0 %	472,2	+2
2	000	-0,11	0,4	112,5 %	47,4	-1
3	+ + +	-0,07	0,6	125,0 %	15,9	-2
4	- + +	-0,15	0,6	125,0 %	30,9	-1
5	- - -	-0,15	0,2	100,0 %	453,8	+2
6	a00	-0,167	0,4	112,5 %	115,4	0
7	0A0	-0,11	0,68	112,5 %	20,3	-2
8	+ - +	-0,07	0,2	125,0 %	347,5	+2
9	000	-0,11	0,4	112,5 %	58,8	-1
10	+ - -	-0,07	0,2	100,0 %	342,2	+2
11	000	-0,11	0,4	112,5 %	64,4	-1
12	000	-0,11	0,4	112,5 %	48,1	-1
13	000	-0,11	0,4	112,5 %	57,7	-1
14	A00	-0,053	0,4	112,5 %	39,5	-1
15	- + -	-0,15	0,6	100,0 %	19,1	-2
16	00A	-0,11	0,4	130,18 %	65,4	-1
17	00a	-0,11	0,4	95,8 %	49,2	-1
18	0a0	-0,11	0,12	112,5 %	580,3	+2
19	000	-0,11	0,4	112,5 %	47,0	-1
20	000	-0,11	0,4	112,5 %	65,5	-1
21	+ + -	-0,07	0,6	100,0 %	20,0	-1
22	000	-0,11	0,4	112,5 %	65,5	-1
23	000	-0,11	0,4	112,5 %	43,7	-1

Tab. 4.11: Auswertung der Proben unter einem Überhangwinkel von 30° (VP 30°)

Bewertung der Oberflächenqualität

Für die Oberflächenqualität werden nur die im Sinne der formschlüssigen Struktur offensichtlich einwandfrei gefertigten Bereiche bewertet. Die Proben 1, 2 und 17 des VP 30° besitzen kleine Einschlüsse im Bereich der Kontaktfläche, die unmittelbar der Verschmutzung der Düse während des Fertigungsprozesses oder ausgebrochenem Stützmaterial beim Auslösen zugeordnet werden können (vgl. Abb. 4.47). Da die Oberfläche dieser Defekte im Vergleich zur restlichen Schnittstelle gering ist, werden auch diese Proben für die Auswertung als geeignet angesehen.

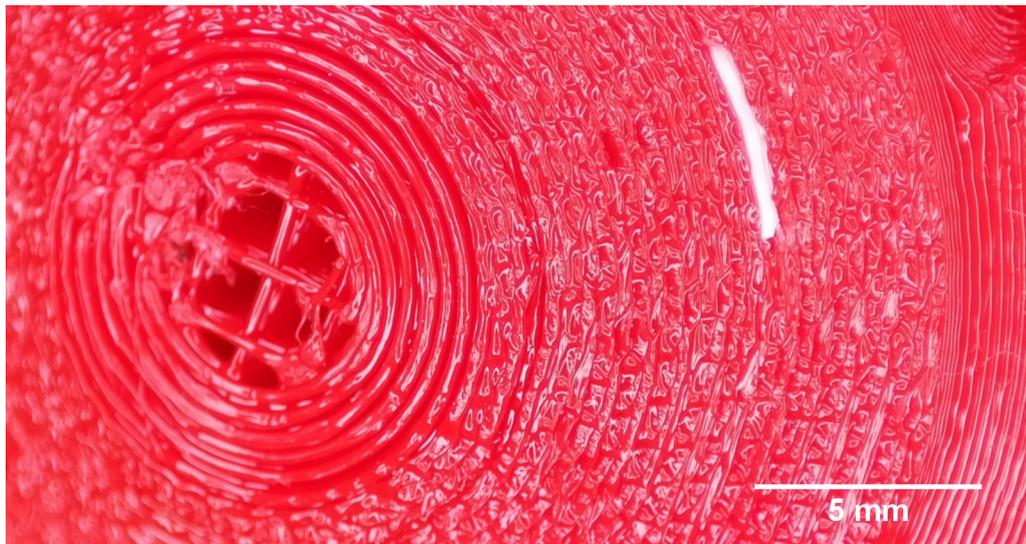


Abb. 4.47: Ausgebrochenes Stützmaterial (Probe 1 oben, VP 30°, 472,16 N)

Zur Bewertung der Oberflächenqualität wird zunächst eine ideal geschlossene Oberfläche definiert, die exakt der Bauteilgeometrie unter Berücksichtigung der erreichbaren Qualität des FLM-Verfahrens entspricht (Qualität 0). Eine Betrachtung der Proben ergibt, dass zwei Kategorien von systematischen Fehlstellen vorliegen. Bei Einstellungen, die eine geringe oder keine Eindringtiefe des Baumaterials in das Stützmaterial begünstigen, entstehen mit zunehmender Ausprägung Lücken zwischen den abgelegten Bahnen (Qualität -1 bis -2). Mit stärkerem Eindringen des Baumaterials in das Gitter der Stützkonstruktion nehmen die formschlüssigen Ausprägungen hingegen zu (Qualität +1 bis +2). Für die steilen Winkel lassen sich diese als schuppenartige Gebilde beschreiben, deren Größe unmittelbar für die erreichbare Haltekraft verantwortlich scheint. Bei den flachen Winkeln ist die Stärke des Formschlusses ebenfalls gut erkennbar. Auch diese Schnittstelle prägt bei sehr schwacher Haltekraft eine offene Unterseite an der oberen Probenhälfte aus, während eine starke Verbindung mit einer rippenförmigen Kontur einhergeht. Bei starkem Formschluss beginnen sich diese Rippen unter Belastung zu deformieren, während sie bei geringerer Größe nahezu unbeeinflusst aus der Stützstruktur gelöst werden können. Beide

Entwicklungsrichtungen sind Abweichungen vom Ideal und damit negativ zu bewerten. Tabelle 4.12 zeigt die gewählte Abstufung anhand der Proben des VP 30°. Zur Bewertung der Proben des VP 0° werden sinngemäß die gleichen Beschreibungen und Stufen verwendet, die in der Tabelle beschrieben sind.

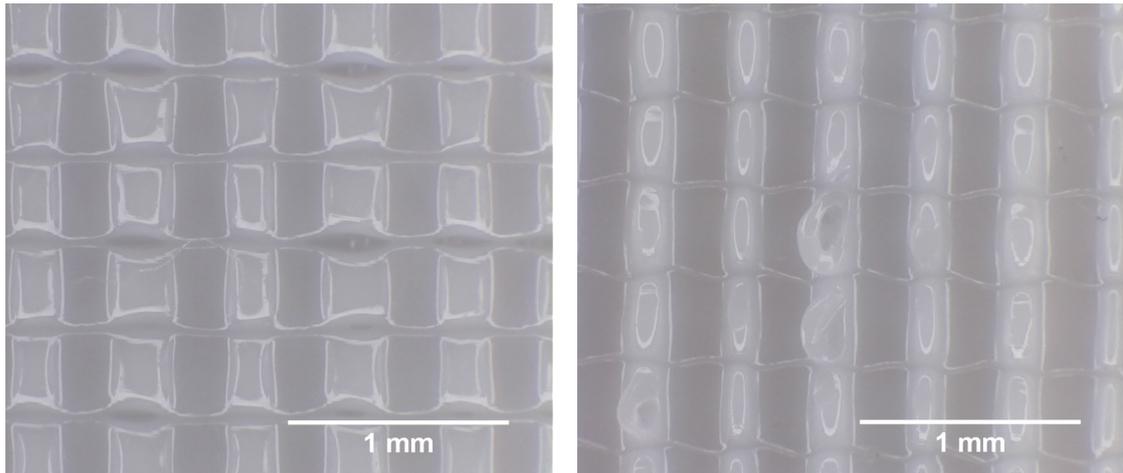
Relativ zur erreichbaren Oberflächenqualität bei der Verwendung einer konventionellen Stützkonstruktion ist die Qualität bei allen gefertigten und geprüften Proben hoch. Die Oberfläche lässt sich als geringfügig rauer als das Ideal beschreiben. Die gesteigerte Rauigkeit lässt sich unmittelbar durch die Ablage der Bahnen auf dem Gitter der Stützkonstruktion erklären. Aus Sicht der Oberflächenqualität wirken sich dichtere Gitter daher vorteilhaft aus. Zwischen den Faktoreinstellungen existieren innerhalb des hohen Qualitätsniveaus dennoch erhebliche Unterschiede, welche in der Makroaufnahme deutlich werden. Die Nahaufnahmen der extremen Oberflächenausprägungen -2 und +2, die in Tabelle 4.12 dargestellt sind, zeigen die Probe 3, die mit 15,9 N eine sehr geringe Haltekraft aufweist, und die Probe 1, welche mit 472,16 N die zweithöchste Haltekraft bei den Proben unter steilem Winkel besitzt.

In der Relation zwischen den abgebildeten Oberflächen und den Maßstäben wird deutlich, dass das Konzept der Mikroverzahnung nur eine minimale Veränderung der Oberfläche voraussetzt, um erhebliche Kräfte übertragen zu können. Eine Besonderheit bei Faktorkombinationen mit hoher Materialmenge und geringem Spalt unterhalb der Düse sind Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche, die auf ein unkontrolliertes Hochquellen des Materials hindeuten. Die Schmelze dringt in diesen Fällen nicht mehr vollständig in das Gitter ein, sondern drückt sich seitlich an der Düse vorbei nach oben. In der nächsten Lage wird dieses Material erneut von dieser aufgenommen und verbleibt entweder als Verschmutzung an der Außenkontur oder wird unkontrolliert in die Stützkonstruktion geschoben. Insbesondere bei den Proben unter steilem Winkel entstehen hierdurch stufenartige Auswürfe, die nicht der Ausprägung der übrigen Oberfläche entsprechen.

Abbildung 4.48 zeigt die extremen Ausprägungen der Oberfläche bei flachen Winkeln. Hier sind sinngemäß die gleichen Gesetzmäßigkeiten zu identifizieren wie bei den steilen Winkeln. Auch bei diesem Probensatz ist die Oberflächenqualität durchweg hoch und der Zusammenhang zwischen der Qualität und der erreichten Haltekraft eindeutig. Die Ergebnisse stehen damit insgesamt im Einklang mit dem hergeleiteten Konzept in Abschnitt 4.3.2.

Stufe	Beschreibung	Abbildung
-2	Die Schnittstelle besitzt auf der Bauteilseite eine unvollständig geschlossene Oberfläche mit deutlichen Lücken und ungleichmäßig abgelegten Bahnen.	
-1	Die Schnittstelle besitzt kleinere Lücken und überwiegend gleichmäßig abgelegte Bahnen.	
0	Die Schnittstelle besitzt weder ausgeprägte Lücken noch ein deutliches Muster durch die formschlüssige Verbindung.	
+1	Die Schnittstelle zeigt mäßige formschlüssige Elemente und besitzt keine Lücken.	
+2	Die Schnittstelle weist deutliche Formschlusselemente auf und besitzt keine Lücken.	

Tab. 4.12: Vergleichstabelle für die optische Oberflächenqualität



(a) Schwache Ausprägung und Lücken

(b) Starke Ausprägung und Deformation

Abb. 4.48: Extreme Ausprägungen der Oberflächenqualität bei flachen Winkeln

4.7 Modellanpassung

4.7.1 Beschreibungsmodell für flache Winkel

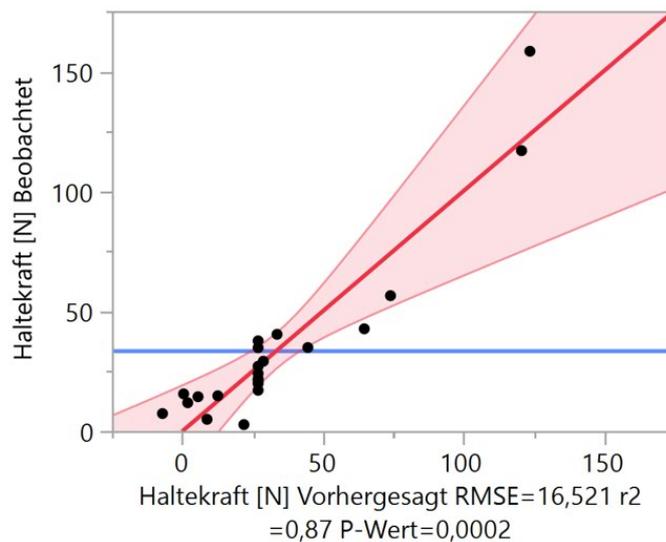


Abb. 4.49: Beobachtete Werte gegenüber Modellvorhersage des quadratischen Modells

Für die flachen Winkel wird zunächst eine Modellanpassung mit den in Abschnitt 4.6.4 genannten Termen durchgeführt. *JMP* berechnet hierzu ein Modell, bei dem nur die Zustellung in z-Richtung signifikant ist. Die Qualität der Vorhersage ist mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,87 relativ hoch und akzeptabel. Abbildung 4.49 zeigt die gemessene Haltekraft gegenüber der Vorhersage des einfachen quadratischen Modells. Allerdings ist das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} mit 0,79 gering und der Test *Lack of Fit* (deutsch *Fehlanspassung*) mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,01 % hoch signifikant (vgl. Abb. 4.50). Dieser Test ist ein Maß für die Anpassungsgüte

und deutet bei Signifikanz darauf hin, dass das generierte Modell die Versuchsdaten unzureichend beschreibt. Die Hypothese, dass eine ausreichende Modellanpassung vorliegt, wird damit verworfen.

Lack of Fit				
Quelle	Freiheitsgrade	Summe Quadrate	Mittlere Quadrate	F-Wert
Lack of Fit	5	3172,3449	634,469	13,5091
Reiner Fehler	8	375,7289	46,966	Wahrsch.
Gesamtfehler	13	3548,0738		> F
				0,0010*
				Max. r²
				0,9866

Abb. 4.50: Signifikante Fehlanpassung im Testverfahren *Lack of Fit*

Der Grund für die Fehlanpassung wird bei der Betrachtung der Residuen in Abbildung 4.51 deutlich, die eine offensichtliche Abhängigkeit zwischen der Abweichung der Modelldaten und der Höhe der Zielgröße darstellt. Die Residuen sind nicht zufällig um den Erwartungswert verteilt, sondern beschreiben einen Bogen, der für eine systematische Abweichung des Modells charakteristisch ist.

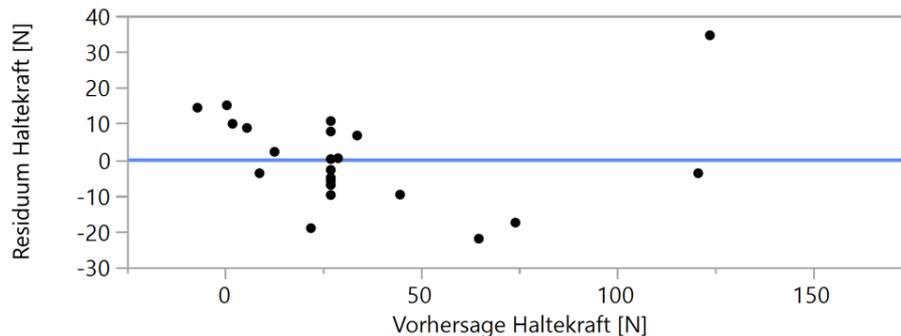


Abb. 4.51: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Höhe der Haltekraft sortiert

Dies lässt darauf schließen, dass sich der Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße nur unzureichend durch eine quadratische Funktion abbilden lässt. Eine effektive Möglichkeit zur Abhilfe schafft eine Transformation nach *George E. P. Box* und *David R. Cox* (*Box-Cox-Transformation*). Die grundlegende Transformation ermöglicht mehrere Funktionen wie den Logarithmus oder die Wurzelfunktion, durch

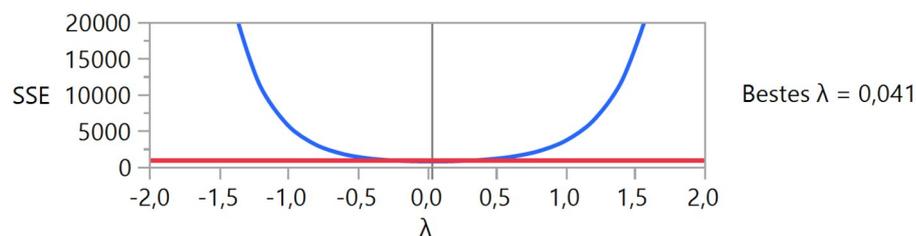


Abb. 4.52: Analyse der Modellabweichungen für alle relevanten Werte von λ

nur eine einzige Variable λ anzunähern. *JMP* besitzt die Funktion, den Lösungsraum für alle relevanten Werte von λ zu berechnen und die daraus resultierenden Modellabweichungen für jede Lösung graphisch darzustellen. Bei $\lambda = 1$ findet keine Transformation statt. Idealerweise sind die Abweichungen vom Modell, die über den Wert *SSE* (*Sum of Squared Errors*) bewertet werden, möglichst gering. Abbildung 4.52 zeigt die Auswertung der *Box-Cox-Transformation* für die vorliegende Situation. Dabei fällt ein ausgeprägtes absolutes Minimum des *SSE* für einen Wert von $\lambda = 0,041$ auf. Damit bestätigt sich die Annahme, dass sich die Versuchsdaten deutlich besser durch eine transformierte Funktion beschreiben lassen. Die Transformation wird im nächsten Schritt auf alle Werte der Zielgröße angewendet. Eine Umkehr der Transformation wird im Anschluss an die Modellgenerierung hergeleitet.

Schrittweise Anpassung für Haltekraft* [N]									
Schrittweise Regressionssteuerung									
Stoppregel:	Minimum BIC								
Richtung:	Vorwärts								
Regeln:	Kombinieren								
SSE	DFE	RMSE	r^2	r^2 korrigiert	Cp	p	AICc	BIC	
812,85759	19	6,5407934	0,9142	0,9006	0,122881	4	160,797	162,9451	
Aktuelle Schätzwerte									
Sperrn	Hinzugefügt	Parameter	Schätzer	nFG	SQ	„F-Wert“	„Wahrsch. > F“		
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Achsenabschnitt	68,2636305	1	0	0,000	1		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung z [mm](-0,15,-0,07)	-25,100815	1	7559,85	176,706	4,5e-11		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Gitterdichte [%](65,85)	-5,8292908	1	407,7265	9,530	0,00607		
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Extrusionsmenge [%](1,1,25)	7,58799989	1	690,8634	16,148	0,00073		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Gitterdichte [%]	0	1	63,50773	1,526	0,23267		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Extrusionsmenge [%]	0	1	18,01397	0,408	0,53106		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gitterdichte [%]*Extrusionsmenge [%]	0	1	11,07825	0,249	0,62403		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Zustellung z [mm]	0	1	4,700928	0,105	0,74999		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gitterdichte [%]*Gitterdichte [%]	0	1	19,42225	0,441	0,51524		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Extrusionsmenge [%]*Extrusionsmenge [%]	0	1	0,445721	0,010	0,92194		

Abb. 4.53: Schrittweise Anpassung des Beschreibungsmodells (Kriterien *AICc* und *BIC*)

Für die erneute Auswertung auf Basis der transformierten Werte wird eine schrittweise Bewertung der signifikanten Modellterme durchgeführt. Als Qualitätskriterien werden das *Akaike-Informationskriterium* (*AICc*) und das *Bayessche-Informationskriterium* (*BIC*) herangezogen, die beide die gleichen Modellterme vorschlagen. Die ermittelten signifikanten Modellterme sind in Abbildung 4.53 dargestellt. Die vorhergesagten Werte liefern nun eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten, was durch ein R^2 von 0,91 und ein adjustiertes R^2 von 0,89 bestätigt wird (siehe Abbildung 4.54).

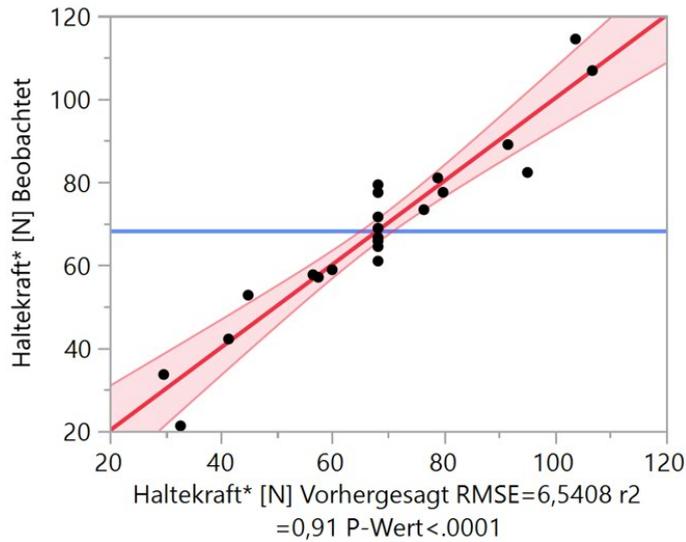


Abb. 4.54: Beobachtete Werte gegenüber Modellvorhersage des quadratischen Modells für die mit $\lambda = 0,041$ transformierte Zielgröße

Der Test auf eine Fehlanpassung ist nicht signifikant. Auch die in Abbildung 4.56 und 4.57 abgebildeten Residuen beschreiben kein erkennbares Muster gegenüber der Größe der Vorhersage oder der Versuchsreihenfolge. Eine Prüfung auf Normalverteilung nach *Samuel Shapiro* und *Martin Wilk* bestätigt überdies, dass die Residuen aus einer Normalverteilung stammen und damit keine systematische Abweichung durch das Modell vorliegt.

Lack of Fit				
Quelle	Freiheitsgrade	Summe Quadrate	Mittlere Quadrate	F-Wert
Lack of Fit	11	527,19291	47,9266	1,3422
Reiner Fehler	8	285,66468	35,7081	Wahrsch. > F
Gesamtfehler	19	812,85759		
				0,3457
				Max. r² 0,9698

Abb. 4.55: Keine signifikante Fehlanpassung im Testverfahren *Lack of Fit*

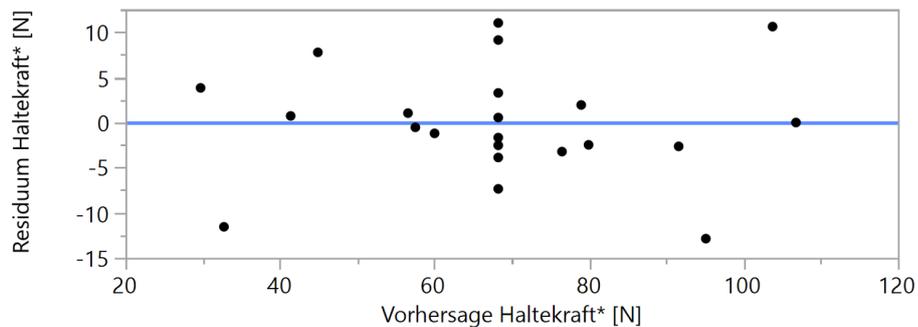


Abb. 4.56: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Höhe der Haltekraft sortiert

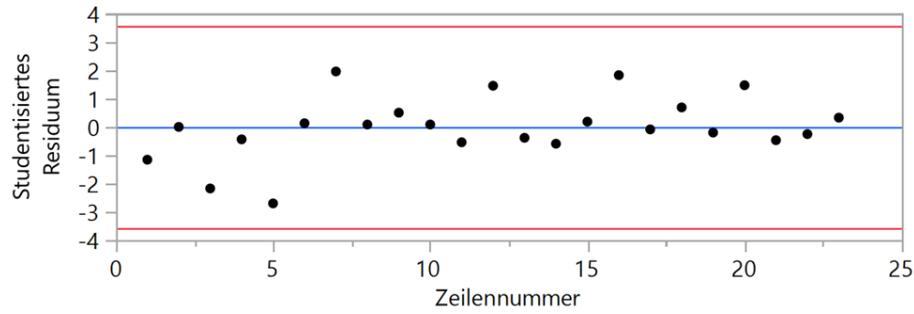


Abb. 4.57: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Versuchsreihenfolge sortiert

Als Vorhersagefunktion ergibt sich für die transformierte Zielgröße F_H^* die Gleichung 4.5. Die Funktion beschreibt den Zusammenhang zwischen der Zielgröße und den als signifikant identifizierten Modelltermen *Zustellung* z (A), *Gitterdichte* (C) und der *Extrusionsmenge* (D).

$$F_H^*[N] = \underbrace{68,26 - 25,1 \cdot \frac{A + 0,11}{0,04} - 5,83 \cdot \frac{C - 75}{10} + 7,59 \cdot \frac{D - 1,125}{0,125}}_{Y_0} \quad (4.5)$$

Um die Funktion in eine praktikablere Form zu überführen, wird die von *JMP* verwendete Transformationsgleichung (siehe Gleichung 4.6) zunächst allgemein nach der untransformierten Zielgröße y aufgelöst. Die Herleitung ist den nachfolgenden Gleichungsschritten zu entnehmen.

$$Y_\lambda = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda y^{\lambda-1}} \quad (4.6)$$

$$\Leftrightarrow Y_\lambda \cdot \lambda y^{\lambda-1} + 1 = y^\lambda \quad (4.7)$$

$$\Leftrightarrow (Y_\lambda \cdot \lambda y^{\lambda-1} + 1)^{\frac{1}{\lambda}} = y \quad (4.8)$$

Beim Speichern der besten Transformation schlägt *JMP* für λ einen leicht abweichenden Wert (ursprünglich 0,041) von 0,045 vor, der hier weiterverwendet wird. Mit dem geometrischen Mittelwert der Zielgröße \bar{y} berechnet sich der konstante Ausdruck $\lambda \bar{y}^{\lambda-1}$ mit einem Wert von 0,0002238. Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Haltekraft und der für flache Winkel spezifischen Transformation als:

$$F_H[N] = [1,15 - 1,4(A + 0,11) - 0,0013(C - 75) + 0,136(D - 1,125)]^{\frac{1}{0,045}} \quad (4.9)$$

Gleichung 4.9 beschreibt damit den Zusammenhang zwischen den gewählten Faktorstufen und der realen Haltekraft F_H in der Einheit *Newton*. Die Berechnungsvorschrift ist innerhalb des untersuchten Faktorraums gültig, sodass auch Faktoreinstellungen zulässig sind, die zwischen den ermittelten Stützpunkten des Modells liegen. Zu berücksichtigen ist, dass sich die Kraft auf eine Kontaktfläche der Probenhälften von 706,86 mm² bezieht. Aufgrund der hohen Übereinstimmung der Herleitung des Konzepts der Mikroverzahnung und des Beschreibungsmodells wird von weiteren Validierungsversuchen abgesehen, da hier kein weiterer Informationsgewinn erwartet wird.

4.7.2 Beschreibungsmodell für steile Winkel

Das grundlegende Vorgehen für steile Winkel ist mit dem für flache Winkel identisch. Abbildung 4.58 zeigt eine erste Anpassung eines quadratischen Modells zur Abschätzung der signifikanten Modellterme. Hierbei fällt das äußerst hohe Bestimmtheitsmaß von 0,997 ($R^2 \text{ adj.} = 0,995$) und die in Relation zum Wertebereich der Haltekraft geringe Modellabweichung mit einem *Residual Mean Square Error (RMSE)* von 11,758 N auf.

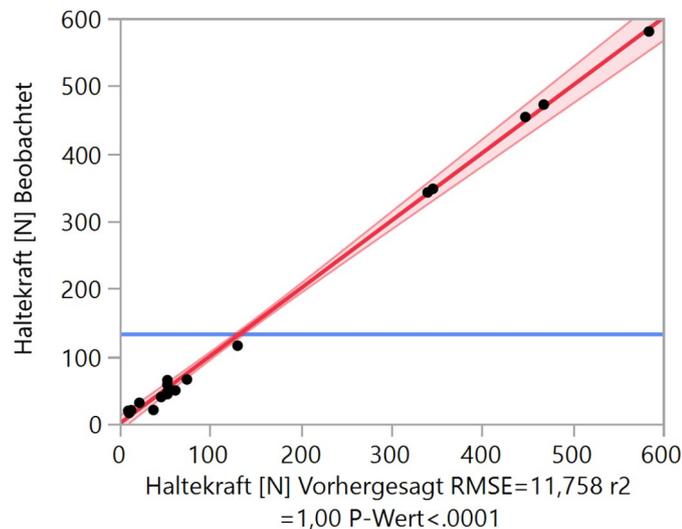


Abb. 4.58: Beobachtete Werte gegenüber Modellvorhersage des quadratischen Modells

Die Übersicht der Effekte (vgl. Abbildung 4.59) zeigt überdies, dass neben den Faktoren *Zustellung xy* und *Zustellung z* auch die quadratischen Modellterme mit einem Wahrscheinlichkeitswert von weniger als 0,05 ($P\text{-Wert} < 0,05$) sowie eine Wechselwirkung zwischen den beiden Faktoren signifikant sind. Der Faktor *Extrusionsmenge* liefert einen vergleichbaren Effekteinfluss wie bei den flachen Proben. Insgesamt ist die Effekstärke allerdings zu gering, sodass der Faktor in der ersten Abschätzung als nicht signifikant eingestuft wird.

Quelle	Log-Wertigkeit	P-Wert
Zustellung xy [mm](0,2,0,6)	16,260	0,00000
Zustellung xy [mm]*Zustellung xy [mm]	13,249	0,00000
Zustellung z [mm](-0,15,-0,07)	6,100	0,00000
Zustellung z [mm]*Zustellung xy [mm]	4,819	0,00002
Zustellung z [mm]*Zustellung z [mm]	3,269	0,00054
Extrusionsmenge [%]*Extrusionsmenge [%]	1,141	0,07227
Extrusionsmenge [%](1,1,25)	0,687	0,20560 ^
Zustellung z [mm]*Extrusionsmenge [%]	0,398	0,39964
Zustellung xy [mm]*Extrusionsmenge [%]	0,194	0,63926

Abb. 4.59: Einschätzung der Effekteinflüsse beim quadratischen Modell

Abbildung 4.60 stellt die Residuen gegenüber der Vorhersage des Modells dar. Sie fallen insgesamt gering und ohne deutliche Ausreißer aus. Ein eindeutiges Muster im Verlauf der Residuen kann ebenfalls nicht identifiziert werden.

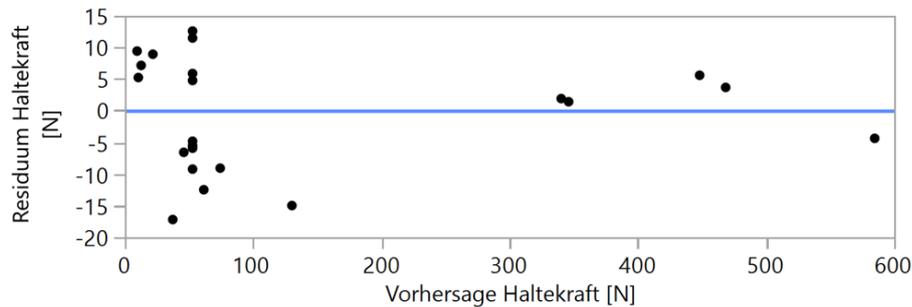


Abb. 4.60: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Höhe der Haltekraft sortiert

Überdies zeigt die Bewertung der Anpassungsgüte über die Testmethode *Lack of Fit*, dass das Modell den Zusammenhang ausreichend gut beschreibt (vgl. Abb. 4.61). Der Test ist mit einem *P-Wert* von 0,0818 nur schwach signifikant, wodurch die H_0 -Hypothese einer akzeptablen Modellanpassung als gültig angenommen wird.

Quelle	Freiheitsgrade	Summe Quadrate	Mittlere Quadrate	F-Wert
Lack of Fit	5	1170,5271	234,105	2,9890
Reiner Fehler	8	626,5822	78,323	Wahrsch.
Gesamtfehler	13	1797,1093		> F
				0,0818
				Max. r²
				0,9990

Abb. 4.61: Grenzwertige Fehlanpassung im Testverfahren *Lack of Fit*

Mit den betrachteten Kenngrößen ist zu erwarten, dass auch die restliche Auswertung auf ein passendes Modell hinausläuft. Grundsätzlich ist es jedoch nicht nachteilig, durch die *Box-Cox-Transformation* die Schwächen des quadratischen Modells zu reduzieren. Eine Berechnung des idealen Werts für λ zeigt, dass dieser mit 0,817 deutlich näher an der untransformierten Lösung liegt als bei dem Modell für flache Winkel. Der Verlauf ist in Abbildung 4.62 dargestellt. Auf dieser Basis werden

die transformierten Messergebnisse berechnet und als neuer Datensatz für die finale Modellanpassung verwendet.

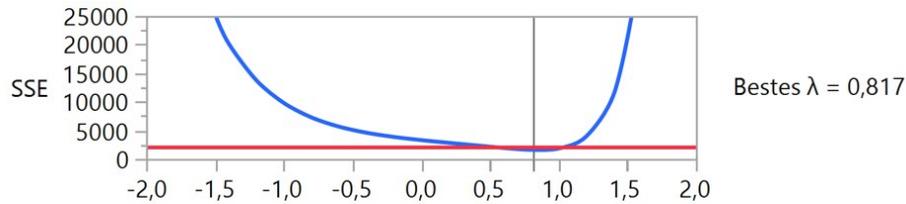


Abb. 4.62: Analyse der Modellabweichungen für alle relevanten Werte von λ

Um diese durchzuführen, wird erneut eine schrittweises Vorgehen angewandt, bei dem eine Vielzahl von Modellen generiert und bewertet wird (vgl. Abb. 4.63).

Als Bewertungskriterien werden ebenfalls das *AICc* und das *BIC* herangezogen. Im Fall der Proben mit steilem Winkel unterscheiden sich die vorgeschlagenen Modellterme bei der Extrusionsmenge. Das *BIC* schlägt die Aufnahme des Faktors vor, während das restriktivere *AICc* ein Modell ohne den Faktor annimmt. An dieser Stelle fällt die Entscheidung für die Aufnahme des quadratischen Terms der Extrusionsmenge aus, da sie bereits bei den flachen Proben schwach signifikant ist, einen vergleichbaren Effekt auf die Zielgröße besitzt und mit der Herleitung der Mikroverzahnung übereinstimmt. Der Haupteffekt *Extrusionsmenge* wird durch *JMP* automatisch aufgenommen, da der quadratische Term Teil des Modells ist. Insgesamt kann die Aufnahme der Terme, die von der Extrusionsmenge abhängig sind, kritisch diskutiert werden, da es sich hier um einen Grenzfall handelt. Der Wahr-

Schrittweise Anpassung für Haltekraft* [N]

Schrittweise Regressionssteuerung

Stoppregel:

Richtung:

Regeln:

SSE	DFE	RMSE	r ²	r ² korrigiert	Cp	p	AICc	BIC
1664,2976	15	10,533431	0,9962	0,9944	6,9238141	8	195,5956	191,9689

Aktuelle Schätzwerte

Sperrn	Hinzugefügt	Parameter	Schätzer	nFG	SQ	„F-Wert“	„Wahrsch. > F“
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Achsenabschnitt	65,9486094	1	0	0,000	1
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung z [mm](-0,15,-0,07)	-24,654601	3	12712,77	38,193	2,91e-7
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung xy [mm](0,2,0,6)	-162,099	3	408848,1	1228,290	3,7e-18
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Extrusionsmenge [%](1,1,25)	4,15513321	2	645,3948	2,908	0,08562
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Zustellung xy [mm]	19,3282527	1	2988,651	26,936	0,00011
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Extrusionsmenge [%]	0	1	102,5096	0,919	0,35403
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zustellung xy [mm]*Extrusionsmenge [%]	0	1	7,912831	0,067	0,7997
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung z [mm]*Zustellung z [mm]	16,2475143	1	2430,659	21,907	0,0003
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zustellung xy [mm]*Zustellung xy [mm]	99,182859	1	90578,15	816,364	1,7e-14
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Extrusionsmenge [%]*Extrusionsmenge [%]	6,89887006	1	438,2341	3,950	0,06545

Abb. 4.63: Schrittweise Anpassung des Beschreibungsmodells (Kriterien *AICc* und *BIC*)

scheinlichkeitswert liegt mit 0,065 leicht über der üblichen Grenze von 0,05. Aus den zuvor genannten Gründen verbleibt der Term allerdings im Modell.

Abbildung 4.64 zeigt das Vorhersagediagramm für die transformierte Zielgröße. Im Vergleich zum ursprünglichen Diagramm 4.58 fällt keine nennenswerte Veränderung auf. Die Abweichungen vom Modell sind mit einem $RMSE$ von 10,533 etwas geringer und das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt weiterhin nahe 1.

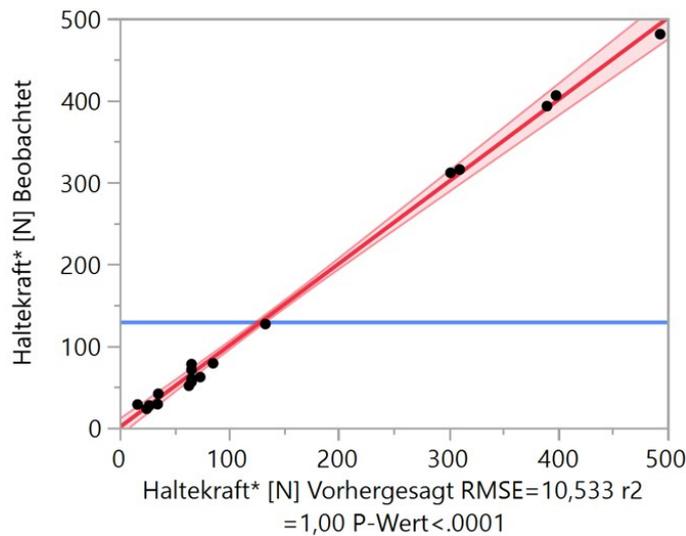


Abb. 4.64: Beobachtete Werte gegenüber Modellvorhersage des quadratischen Modells für die mit $\lambda = 0,817$ transformierte Zielgröße

Eine Betrachtung der Testmethode *Lack of Fit* zeigt weiterhin, dass das Modell den Zusammenhang gut beschreibt. Dabei hat sich durch die Transformation eine höhere Wahrscheinlichkeit für die H_0 -Hypothese eingestellt.

Quelle	Freiheitsgrade	Summe Quadrate	Mittlere Quadrate	F-Wert
Lack of Fit	7	976,2784	139,468	1,6217
Reiner Fehler	8	688,0192	86,002	Wahrsch.
Gesamtfehler	15	1664,2976		> F
				0,2560
			Max. r^2	
				0,9984

Abb. 4.65: Keine signifikante Fehlanpassung im Testverfahren *Lack of Fit*

Die Residuen (vgl. Abbildungen 4.66 und 4.67) werden als zufällig um den Erwartungswert verteilt und ohne erkennbares Muster bewertet. Ein Test auf Normalverteilung bestätigt überdies, dass die Residuen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus einer solchen Verteilung stammen und das Modell damit alle entscheidenden Faktoren berücksichtigt.

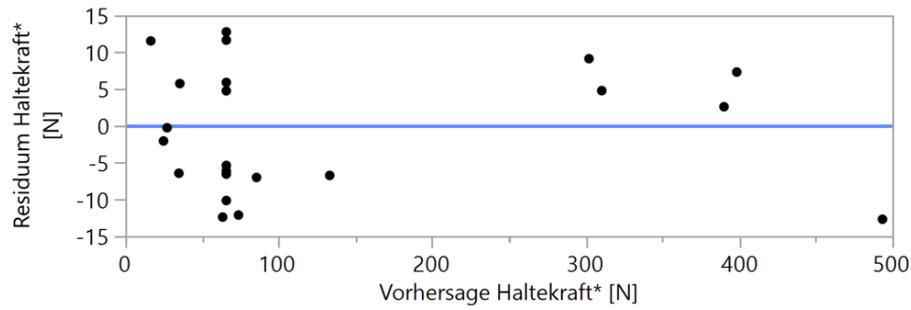


Abb. 4.66: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Höhe der Haltekraft sortiert

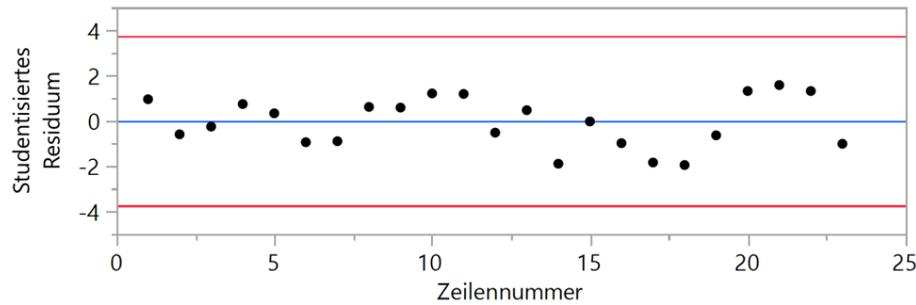


Abb. 4.67: Residuen des Beschreibungsmodells nach der Versuchsreihenfolge sortiert

Abbildung 4.68 zeigt zwei Analysediagramme mit einem mittleren Wert von 0,4 mm (mäßige Haltekraft) für die Zustellung in xy-Richtung und einem niedrigen Wert von 0,2 mm (hohe Haltekraft) für diese. Im Vergleich zu den Proben mit flachem Winkel ohne Wechselwirkungen hat die Variation der Zustellung in xy-Richtung einen steigernden Einfluss auf den Beitrag, den die Zustellung in z-Richtung zum Ergebnis leistet. Deutlich wird der Einfluss der Wechselwirkung im geringfügig steiler ansteigenden Verlauf der Zustellung in z-Richtung. Sie hat den gleichen Effekt in umgekehrter Richtung auf die Zustellung in xy-Richtung. Dabei ist der Beitrag der Extrusionsmenge nicht von den beiden Faktoren abhängig.

Zur Aufstellung einer praktikablen Vorhersagefunktion werden die gleichen Schritte wie bei dem Modell für flache Proben durchgeführt. Die resultierende Gleichung ist für ein λ von 0,817 und eine Konstante $\lambda y^{\lambda-1}$ von 0,374625 nachfolgend abgebildet. Die hiermit zu berechnende Haltekraft bezieht sich ebenfalls auf eine in z-Richtung projizierte Fläche von 706,86 mm².

$$\begin{aligned}
 F_H[N] = & [25,71 - 230,91(A + 0,11) - 303,63(B - 0,4) + 12,45(D - 1,125) \\
 & + 3804,2(A + 0,11)^2 + 928,91(B - 0,4)^2 + 165,41(D - 1,125)^2 \\
 & + 905,11(A + 0,11)(B - 0,4)]^{\frac{1}{0,817}} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

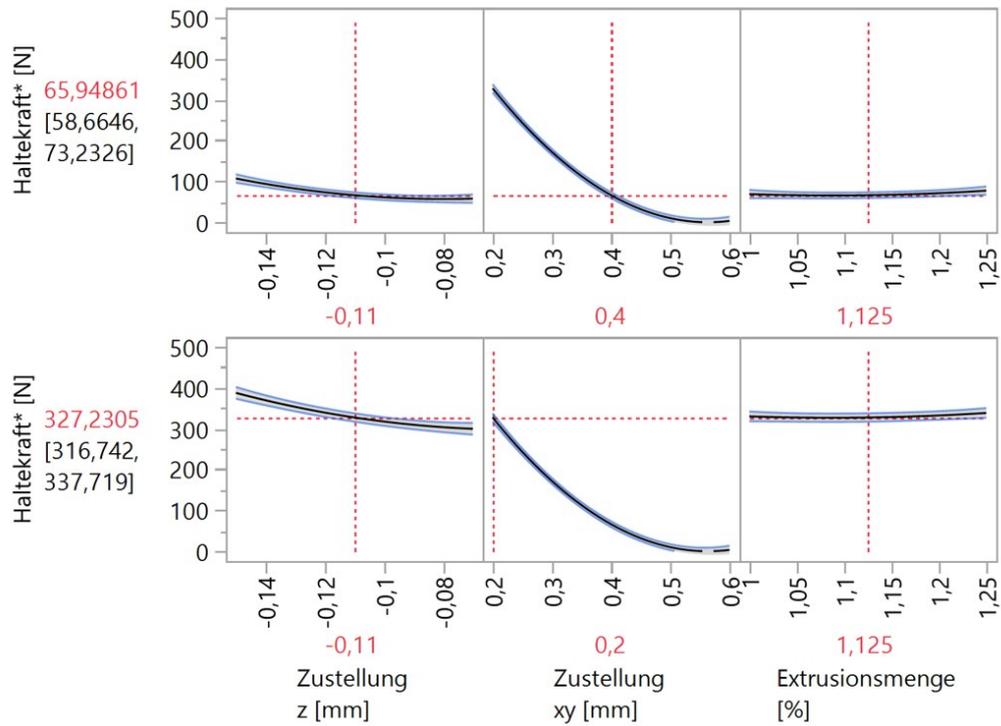


Abb. 4.68: Analysediagramm der Faktoreinflüsse für zwei verschiedene Haltekräfte

4.7.3 Praktischer Einsatz der Modelle

Für den praktischen Einsatz der Modelle werden an dieser Stelle einige Hilfen und Einschätzungen gegeben, die den Einsatz der Technologie vereinfachen sollen. Grundsätzlich existiert eine digital beigefügte Tabelle (vgl. Abbildung 4.69) in *Microsoft Excel*, welche die Berechnungsvorschrift der Modelle enthält und die präzise Bestimmung der Haltekraft unter den beschriebenen Randbedingungen ermöglicht. Hierbei werden mehr Nachkommastellen berücksichtigt, die die Lesbarkeit in der schriftlichen Darstellung unnötig erschweren würden. Aufgrund des Aufbaus der Gleichung führt eine übliche Rundung der Koeffizienten zu nennenswerten Abweichungen im Endergebnis.

Symbol	Faktor	Einheit	Eingabe
A	Zustellung z	mm	-0,15
B	Zustellung xy	mm	0,4
C	Gitterdichte	%	65
D	Extrusionsmenge	Faktor	1,13

Ergebnis	
Haltekraft flach	N 87,183196
Haltekraft steil	N 94,463903

Berechnung flache Winkel		
BC-Faktor	0,00223824	Lambda 0,045
K_A	-25,1008155	
K_C	-5,8292908	
K_D	7,587999886	
K	68,26363055	
K_A_t	-0,05618166	
K_C_t	-0,01304735	
K_D_t	0,016983767	
K_t	0,152790409	
K_A_f	-1,40454142	0,04

BC-Faktor	0,3
K_A	-24
K_B	-
K_D	4,1
K_AB	19
K_AA	16
K_BB	99
K_DD	6,8
K	65
K_A_t	-9,2
K_B_t	-6

Abb. 4.69: Tabelle in *Microsoft Excel* zur Berechnung der erwarteten Haltekraft

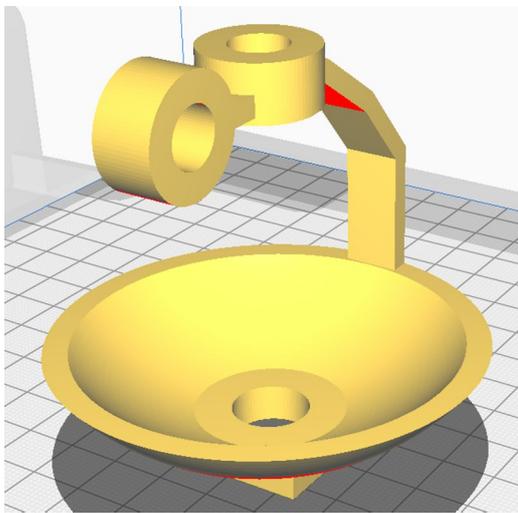
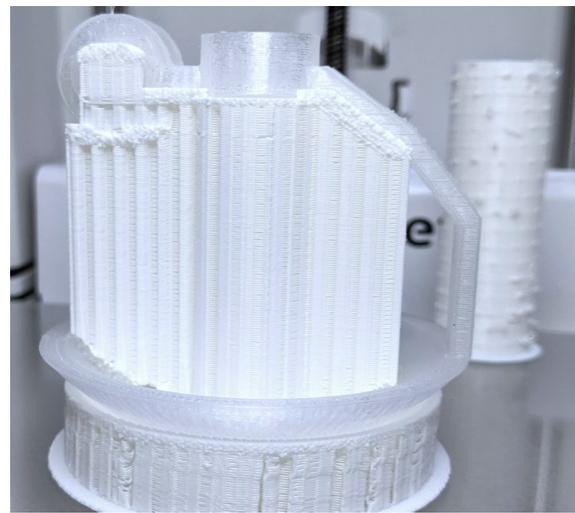
Weiterhin stellt sich die Frage nach der praktischen Anwendung der Zusammenhänge für die Auslegung einer Stützkonstruktion. Prinzipiell kann mit den Modellen eine Schätzung berechnet werden, welche die Haltekraft für eine gegebene, insgesamt abzustütze Fläche eines Bauteils annähert. Aus praktischer Sicht erscheint dies aus mehreren Gründen jedoch nicht sinnvoll. Zum einen lassen die Modelle nur eine Vorhersage für die beiden gewählten Überhangwinkel 0° und 30° zu. Es sind daher weitere Untersuchungen nötig, welche die entsprechenden Zusammenhänge idealerweise in einem einzigen Modell darstellen. Dabei werden die horizontalen und vertikalen Anteile an der Haltekraft für jeden Winkel eine unterschiedliche Gewichtung einnehmen. Abgesehen von der vollständigen Abbildung aller möglichen Faktorkombinationen sind in Bezug auf das Konzept der Mikroverzahnung jedoch keine neuen Erkenntnisse zu erwarten.

Weiterhin geben die ermittelten Haltekraften nur qualitativ vor, welcher Aufwand für die praktische Entfernung der Stützkonstruktion zu erwarten ist. Um mit den vorhandenen zwei Modellen eine Abschätzung treffen zu können, wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Zunächst sollte die Haltekraft immer so gering wie möglich eingestellt werden, um eine einfache Entfernung der Stützkonstruktion zu begünstigen. Die genaue Einstellung ist u. a. abhängig vom additiven Fertigungssystem und den eingesetzten Thermoplasten. Dabei benötigen die üblicherweise verwendeten amorphen Kunststoffe in der Regel weniger Fixierung als die teilkristallinen, welche teilweise eine erhebliche Schrumpfung aufweisen. Außerdem erscheint es sinnvoll, eine möglichst hohe Gitterdichte zu wählen, um die Unterseite des Modells bestmöglich abzustützen. Ein grobes Gitter wird bei gleichen Randbedingungen tendenziell immer zu einer größeren Formabweichung der Bauteilunterseite führen. Insgesamt sollte ein Parametersatz entsprechend der vorherigen Hinweise gewählt werden, bei dem durch beide Modelle eine ähnliche Haltekraft vorhergesagt wird. Es ist überdies zweckmäßig und mit überschaubarem Aufwand verbunden, bei der Einrichtung eines neuen Baumaterials zunächst zwei Testproben mit einem Stützwinkel von 0° und 30° zu fertigen und manuell zu lösen. Auf diese Weise lässt sich die Anwendbarkeit der gewählten Einstellungen kurzfristig abschätzen.

4.8 Fertigung von Demonstratoren

Um die entwickelte Technologie nicht nur in Form von Proben zu testen, sondern auch den praktischen Einsatz nachzuweisen, werden Demonstratoren gefertigt, die verschiedene Funktionsflächen aufweisen und auch die Sonderfälle abbilden. Darstellung 4.70 zeigt das digitale Modell des Demonstrators und das gefertigte Druckob-

jekt. Es besitzt eine abgerundete und eine quaderförmige Unterseite sowie eine auf Bauplatte und Bauteil beginnende Stützkonstruktion mit unterschiedlichen Überhangwinkeln. Die filigrane Verbindung zu den zwei ringförmigen Ausprägungen an der Spitze des Modells erschwert die zerstörungsfreie Entfernung der Stützkonstruktion. Das Loch im Bodenbereich ist absichtlich so platziert, damit die ersten Lagen im Fall der auf der Bauteiloberseite beginnenden Stützkonstruktion mehr Halt haben. Der *G-Code Manipulator* verfügt in der aktuellen Version nicht über die Funktion, die Füllung der Stützkonstruktion in deren untere Schnittstelle gezielt einzupressen. Diese Erweiterung stellt eine rein softwaretechnische Aufgabenstellung dar. Die nötige Prozesstechnik ist bereits hergeleitet und die Funktion nachgewiesen.

(a) Digitales Modell im *Slicer*

(b) Fertiges Druckobjekt aus PP und PLA

Abb. 4.70: Demonstrator für den praktischen Einsatz der formschl. Stützkonstruktion

Es werden drei verschiedene Demonstratoren aus den Baumaterialien eines für die additive Fertigung optimierten Polypropylens (*Verbatim GmbH*) und eines in dieser Hinsicht nicht optimierten Polypropylens des Typs *Moplen EP549U* (*Lyondellbasell Industries*) gefertigt. Der optimierte Thermoplast ist verhältnismäßig transparent und von geringer Härte, was auf die Beimischung von Zusatzstoffen schließen lässt. Während des Druckversuchs baut das Material deutlich geringere Spannungen als das unoptimierte PP auf und ist für einen vom Grundtyp teilkristallinen Thermoplast insgesamt gut zu verarbeiten. Der Demonstrator mit diesem PP als Bau- und PLA als Stützmaterial ist in Abbildung 4.70b dargestellt. Das nicht optimierte PP ist nur geringfügig transparent, deutlich härter sowie unflexibler und baut erhebliche Spannungen und resultierende Verformungen beim Druckprozess auf. Die Wahl fällt hier auf eine starke Fixierung durch die Stützkonstruktion.

Als Stützmaterial kommen das bereits für die Proben eingesetzte PLA der *Verbatim GmbH* und ein wasserlösliches PVA von *Ultimaker B.v.* zum Einsatz. Abbildung 4.71

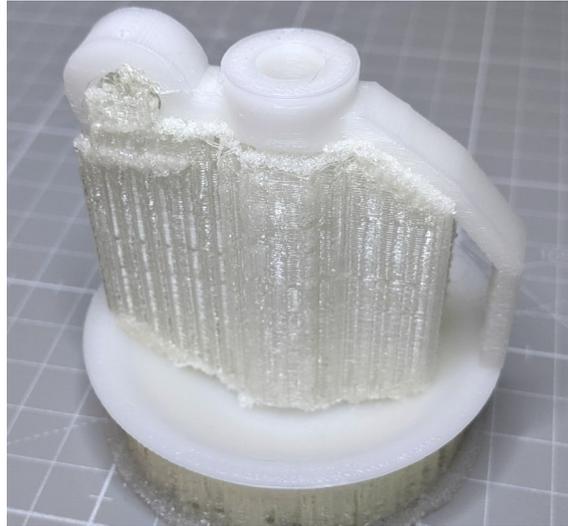


Abb. 4.71: Demonstrator aus nicht optimiertem PP und einer Stützkonstr. aus PVA

zeigt einen Demonstrator aus dem nicht optimierten PP und dem PVA. Eine nicht dargestellte Variante aus dem Baumaterial und PLA als Stützmaterial wird ebenfalls erfolgreich gefertigt. Durch die relative Unabhängigkeit von Bau- und Stützmaterial stellt die Fertigung mit allen drei Materialpaarungen kein Problem dar. Nach der grundsätzlichen Einstellung des Materials kann ein qualitativ hochwertiges Bauteil mit Stützkonstruktion unmittelbar gefertigt werden.

4.9 Ausformen der Stützstruktur

4.9.1 Allgemeines Vorgehen

Für amorphe Kunststoffe, die häufig nur eine leichte Fixierung benötigen, ist keine besondere Vorgehensweise zum Lösen der Stützkonstruktion erforderlich. Der Struktur kommt in diesem Fall primär die Aufgabe der Abstützung und bestmöglichen Formgebung der Bauteilunterseite zu. Hier kann eine schwache Haltekraft zur Fixierung eingesetzt werden, sodass das Auslösen häufig auch ohne Hilfsmittel möglich ist.

Für teilkristalline Werkstoffe wie Polypropylen oder Polyamid wird abhängig von der geometrischen Ausprägung eine starke Fixierung benötigt. Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Demonstratoren besitzen beispielsweise eine starke bis sehr starke Verbindung zwischen Bau- und Stützmaterial. Ein einfaches Lösen von Hand ist in diesem Fall nur mit hohem Kraftaufwand möglich, sodass üblicherweise verfügbare Hilfsmittel verwendet werden sollten. Durch den Einsatz von Zangen, Hebeln

und Trennwerkzeugen unterschiedlicher Ausprägung können so punktuelle Kräfte und Momente aufgebracht werden, um das Trennen zu vereinfachen.

Nach eigener Erfahrung ist es in keinem Fall sinnvoll, das gesamte Bauteil in nur einem Schritt in z-Richtung aus der Stützkonstruktion zu entfernen. Bei dieser Variante sind der mit Abstand größte Kraftaufwand und die größte Wahrscheinlichkeit für die Beschädigung des Bauteils zu erwarten. Zusammenhängende Stützstrukturbereiche müssen nicht unter Aufbringung der gesamten theoretischen Haltekraft entfernt werden. Unterhalb der oberen Schnittstelle besitzt die Stützkonstruktion ein Muster mit geringer Dichte und Stabilität, um weniger Stützmaterial und Druckzeit zu beanspruchen. Es ist daher sinnvoll, zunächst einen kleineren Teilbereich zu lösen, während der Rest des Bereichs noch fest mit dem Bauteil verbunden bleibt. Die Stützkonstruktion wird dabei sukzessive vom Bauteil gelöst, sodass in jedem Schritt nur ein Bruchteil der gesamten Haltekraft überwunden werden muss. Die vergleichsweise geringe Steifigkeit der meisten Polymere vereinfacht dieses Vorgehen zusätzlich.

Prinzipiell kann das Lösen der formschlüssigen Mikroverzahnung auf die drei Wirkmechanismen *elastische Deformation*, *plastische Deformation* oder *Auflösen* zurückgeführt werden.

4.9.2 Plastische Deformation

Um den Formschluss aufzuheben, kann eine plastische Deformation der formschlüssigen Elemente stattfinden. Dies geschieht beispielsweise, wenn diese beim Endformen abreißen oder abknicken. Eine andere Ausprägung der plastischen Deformation ist das Aufbrechen der Stützkonstruktion, um sich gegenseitig blockierende Bereiche zu entfernen. Insbesondere bei sehr steifen oder spröden Thermoplasten wie PLA als Stütz- oder Baumaterial tritt dieser Fall ein. Die Stützkonstruktion bricht dabei üblicherweise an mehreren scharfkantigen Bruchstellen vom Bauteil ab. Abbildung 4.72 zeigt das Vorgehen beim Demonstrator aus optimiertem PP und PLA. Durch die Nachgiebigkeit des Baumaterials liegt neben der plastischen Deformation auch stets eine elastische vor.

4.9.3 Elastische Deformation

Eine überwiegend elastische Deformation tritt dagegen tendenziell bei flexibleren Werkstoffen wie den im FLM-Verfahren häufig verwendeten thermoplastischen Po-

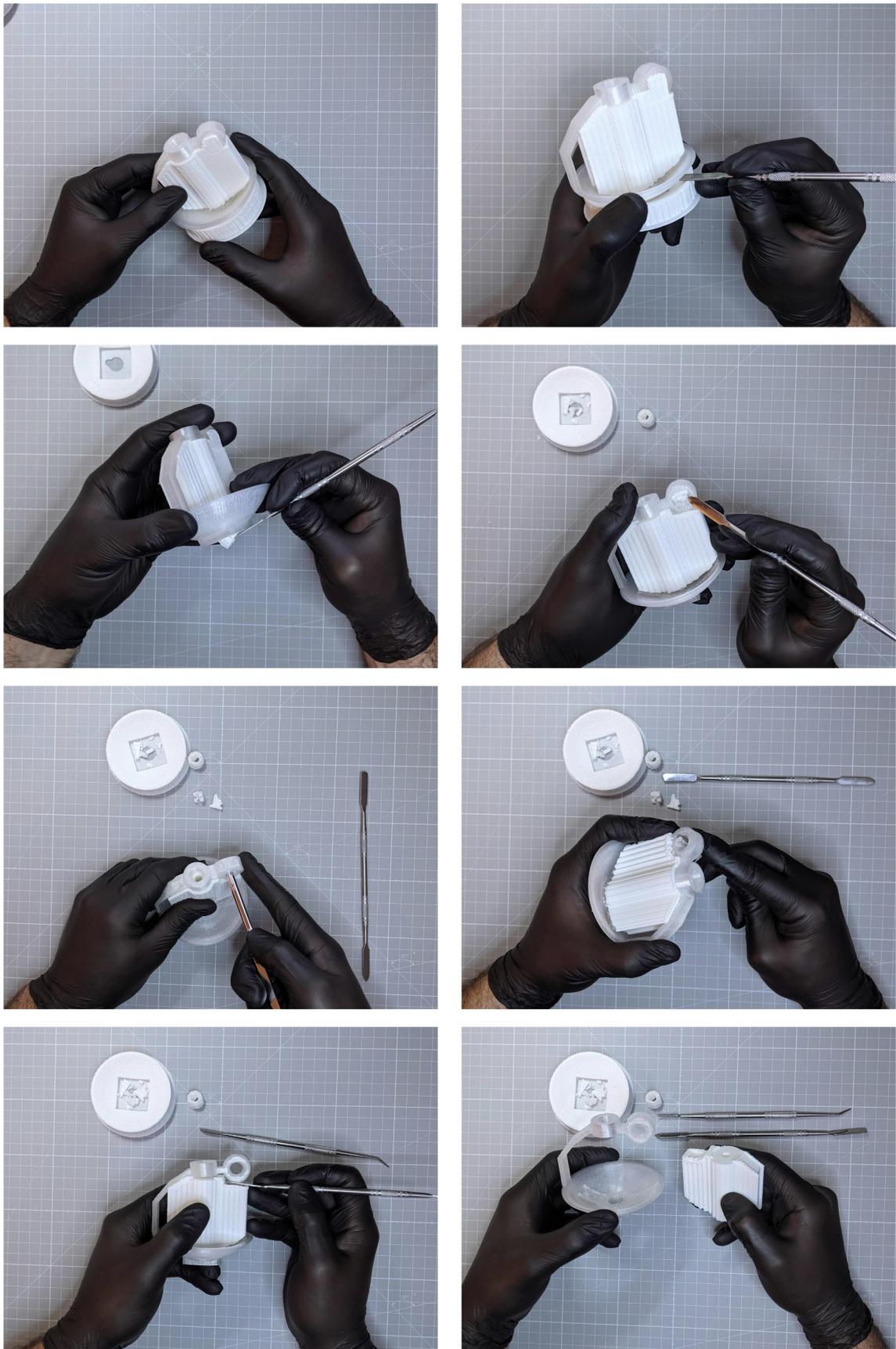


Abb. 4.72: Manuelle Entfernung von Stützstruktur (PLA) bei einem Demonstrator (PP)

lyurethanen auf. Beim Ablösen bleiben zusammenhängende Bereiche in der Regel bis zur vollständigen Entfernung miteinander verbunden. Durch die üblicherweise höhere Nachgiebigkeit dieser Materialien muss die Haltekraft nur lokal überwunden werden, da die umliegende Stützstruktur keinen nennenswerten Widerstand leistet. Beim vollständigen Lösen der Stützkonstruktion durch elastische Deformation kann diese häufig in einem Stück durch eine schälende Bewegung vom Bauteil abgezogen werden.

4.9.4 Auflösen

Auch das Auflösen der formschlüssigen Stützkonstruktion ist grundsätzlich möglich, sofern ein gegenüber Flüssigkeiten möglichst dichtes Bauteil gefertigt wird. Andernfalls können größere Mengen des Lösemittels in das Bauteil eindringen und eine zeitintensive Trocknung erforderlich machen. In Abstimmung mit den thermischen Eigenschaften des Baumaterials und dem Lösemittel kann beispielsweise PVA, BVOH oder HIPS als Stützmaterial eingesetzt werden. Tendenziell scheint ein Auflösen nur in Sonderfällen wie schlecht zugänglichen Hohlräumen sinnvoll zu sein, da der Prozess im Auswaschbecken üblicherweise deutlich mehr Zeit und Energie in Anspruch nimmt als die manuelle Entfernung. Abbildung 4.73 zeigt die Prozessschritte beim Auflösen von PVA als wasserlöslicher Thermoplast im Magnetrührer bei ca. 60 °C Wassertemperatur. Die Füllstruktur der Stützkonstruktion löst sich innerhalb von 30 Minuten größtenteils auf, während die dichtere Schnittstelle aus Stützmaterial weitere 6 Stunden Verweildauer und einen Wechsel des Wassers erforderlich macht.



(a) Druckobjekt (PP) mit Stützmaterial (PVA)

(b) Auflösung im Magnetrührer

(c) Fertiges Bauteil aus PP

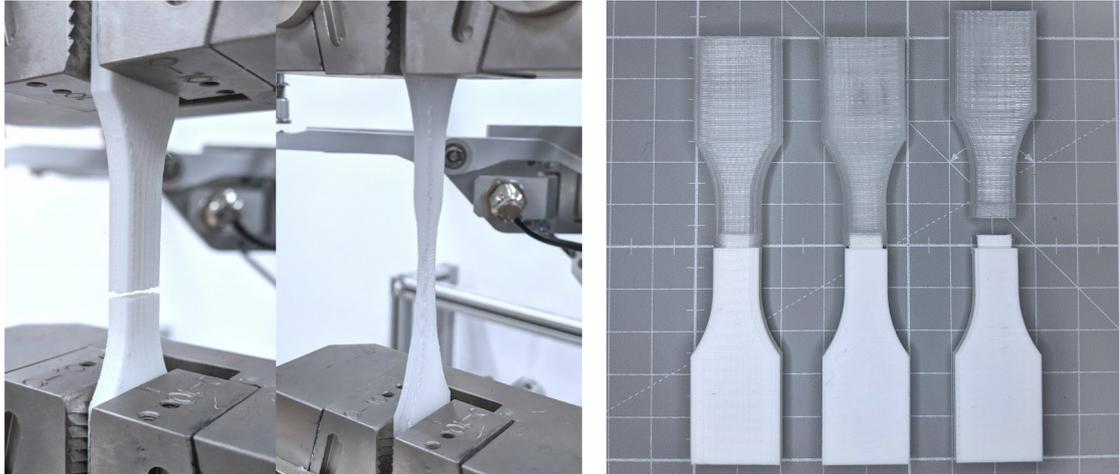
Abb. 4.73: Prozessschritte beim Auflösen von Stützmaterial (PVA) in Wasser

4.10 Dauerhafte formschlüssige Verbindungen

Die Auswertung der statistischen Versuchsplanung zeigt, dass die entwickelte Mikroverzahnung hohe Kräfte übertragen kann. Es liegt daher nahe, auf Basis des Konzepts eine dauerhafte formschlüssige Verbindung zu entwickeln, um das Anwendungsspektrum zu erweitern. Gelingt dies, so weist die Verbindung die gleichen Vorteile auf, welche für den Einsatz als Stützstruktur gelten. Insbesondere müssen den Modellen keine größeren Formschlusselemente im Konstruktionsprozess aufwändig hinzugefügt werden. Überdies fällt die Verbindung über die gesamte Kontaktzone gleichmäßig aus, sodass beispielsweise auch dünne flexible Schichten als Bauteilaußenhaut effektiv verbunden werden können. Ebenfalls scheint es möglich und vorteilhaft, die Mikroverzahnung für die Verbindung von beispielsweise einem thermoplastischen Grundwerkstoff mit einem Duroplast oder Elastomer einzusetzen. Sowohl die in Abschnitt 4.2.4 vorgestellte druckgeprägte als auch die modellgeprägte Verzahnung sind hierzu potenziell geeignet. In der nachfolgenden Aufzählung sind die Vorteile zusammengefasst.

- Das Verfahren bedingt keinen zusätzlichen konstruktiven Aufwand, da die Verzahnung im Druckprozess automatisch entsteht.
- Durch die Vielzahl von kleinen Verbindungspunkten bietet die formschlüssige Verbindung einen flächig wirkenden Halt.
- Das Verfahren ist auch für geringe Schichtdicken geeignet, da die Formschlusselemente nur eine geringe räumliche Ausdehnung besitzen.
- Die Mikroverzahnung ist voraussichtlich auch für die Verbindung von Elastomeren, Duroplasten und Thermoplasten untereinander in additiven Fertigungsverfahren geeignet.

Zur Überprüfung der grundlegenden Eignung werden jeweils fünf Proben aus PLA, dem optimiertem PP und einer formschlüssig verbundenen Variante aus beiden Materialien gefertigt und einer Zugprüfung unterzogen. Das unterschiedliche Versagen der Proben aus einem Material ist in Abbildung 4.13a dargestellt. Abbildung 4.13b zeigt hingegen die kombinierten und formschlüssig verbundenen Testkörper. Die beiden Thermoplaste gehen keinen nennenswerten Stoffschluss ein, sodass die erzielte Zugfestigkeit der verbundenen Proben einzig auf die Mikroverzahnung zurückgeführt werden kann. Die verkürzten Probenkörper und Einstellungen der Zugprüfung sind an die *ISO 527* angelehnt. Sie besitzen eine Breite von 10 mm und Dicke von 4 mm. Der Querschnitt von 40 mm² teilt sich im überlappenden Bereich auf die beiden Materialien gleich auf. Für die Schnittstelle wird eine modellgeprägte Mikroverzahnung



(a) Versagen PLA (links) und PP (rechts) (b) Ausziehen der Verbindung

Abb. 4.74: Zugprüfung von Probekörpern aus PLA und PP

mit 0,2 mm radialer Überschneidung und einer Länge der Überlappung zwischen den Probenhälften von 3 mm gewählt.

Probe	Zugf. PLA [N/mm ²]	Zugf. PP [N/mm ²]	Zugf. PLA/PP [N/mm ²]
1	39,56	12,48	5,60
2	40,41	11,65	5,34
3	38,27	11,33	5,58
4	37,77	11,55	5,16
5	39,43	12,38	5,18
Mittelw.	39,10	11,88	5,37

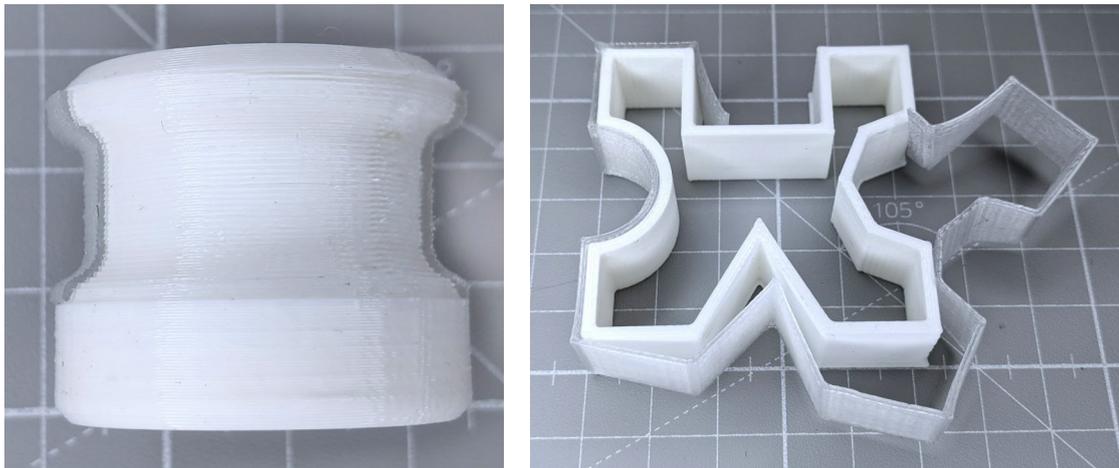
Tab. 4.13: Zugfestigkeiten von PLA-, PP- und formschlüssig verbundenen Proben

Bei den Proben aus PLA ergibt sich eine mittlere Zugfestigkeit von 39,1 N/mm² mit Gewaltbruch der Probe, während jene aus PP bereits bei 11,88 N/mm² anfangen plastisch zu fließen (siehe Tabelle 4.13). Da sich die Querschnitte der beiden Materialien im Bereich der Schnittstelle gleich aufteilen, liegt die maximal zu erreichende Zugfestigkeit für die kombinierten Proben bei der Hälfte derer des schwächeren Materials und damit bei 5,94 N/mm². Im Mittel werden bei der Prüfung 5,37 N/mm² erreicht, wobei das Versagen in allen fünf Fällen durch ein Auseinanderziehen der Verbindung stattfindet. Da die Differenz zum Ideal gering ist, scheint die Mikroverzahnung die Festigkeit des Werkstoffs gut auszunutzen. Damit zeigt sich eine grundlegende Tendenz für die Eignung als dauerhafte Verbindung.



Abb. 4.75: Nahaufnahme der Verzahnung der Probenhälfte aus PLA nach Versagen

Ebenfalls von Interesse können dauerhafte Verbindungen mit einer vom Grundmaterial abweichenden Schicht auf der Außenhaut eines Bauteils sein. Derartige Beschichtungen dienen zum Beispiel der Verbesserung tribologischer und haptischer Eigenschaften, der Steigerung der Chemikalienbeständigkeit oder der Beeinflussung der Anmutung. Die Abbildung 4.76 zeigt zwei Demonstratoren aus PLA und PP, die ebenfalls mit einer modellgeprägten Verzahnung mit radialer Überschneidung von 0,2 mm hergestellt sind.



(a) Zylinder m. Beschichtung

(b) Div. Konturen (Schicht manuell gelöst)

Abb. 4.76: Zwei Demonstratoren für Oberflächenbeschichtungen aus PP

In Abbildung 4.77 sind die modellgeprägten Formschlüsselemente im Detail dargestellt. Im Vergleich zur druckgeprägten Verzahnung fällt die gleichmäßige Ausprägung des Gitters auf, die sich für den Anwendungsfall gut eignet. Da die Aufbringung der Materialmenge und der Aufbau der Verzahnung durch den *Slicer* exakt vorbestimmt sind, ergibt sich auch für dünne Schichten eine gleichmäßige Außenhaut.



Abb. 4.77: Struktur der formschlüssigen Elemente bei der modellgeprägten Verzahnung

4.11 Grundlegende Gestaltungsregeln

In diesem Abschnitt werden drei Aspekte beschrieben, die bei der reinen Modellbetrachtung in den Hintergrund treten, aber für den praktischen Einsatz relevant sind.

Zunächst sollte insbesondere bei horizontalen Flächen stets ein um 90° rotiertes Muster gegenüber der ersten Bauteillage für die Schnittstelle der Stützkonstruktion gewählt werden. Das Eindringen des Baumaterials in das Gitter wird dadurch deutlich verbessert, da im schlechtesten Fall sonst Bahnen von Stütz- und Baumaterial deckungsgleich aufeinanderliegen. Dies kann zu einer direkten Ablösung der ersten Bahnen führen, da keine Gitterplätze zur Fixierung genutzt werden. Ebenfalls Abhilfe schafft die Verwendung eines konzentrischen Ablegemusters für die Bauteilunterseite.

Weiterhin kann es in ungünstigen Situationen bei stark schrumpfenden Thermoplasten zu einer Wölbung der Bauteilaußenseite kommen. Das Muster der Stützkonstruktion verläuft in einigen Fällen tangential zur Bauteilkontur und bildet lokal ungünstige Gitterplätze aus, welche die abgelegte Lage nicht ausreichend fixieren (Erläuterung mit Abbildungen in Abschnitt 4.3.2). Mit den Möglichkeiten, die aktuelle *Slicer* bieten, kann dieses Problem nicht vollständig gelöst werden. Es scheint daher sinnvoll, ein Stützgitter zu entwickeln, das der Orientierung der Bauteilaußenseite folgt und stets gleichbleibende Gitterplätze ausbildet (siehe Ausblick in Kapitel 6.2). Solange ein solches Gitter nicht verfügbar ist, bleibt als einzige Option, die Fixierung des Bauteils insgesamt zu verstärken.

Abhängig von der Viskosität des aufgeschmolzenen Baumaterials, dem Volumenstrom der Schmelze und den gewählten Parametern für die Stützkonstruktion kann der Antrieb des Filamentvorschubs unbemerkt durchrutschen und durch den Schlupf

eine geringere Menge fördern als berechnet. Falls sich die Mikroverzahnung nicht wie erwartet ausprägt, kann es daher hilfreich sein, sowohl die Düsentemperatur zu steigern als auch die Vorschubgeschwindigkeit im Bereich der Stützkonstruktion insgesamt zu senken. So können u. a. der Druckabfall in der Düse reduziert und dem Schlupf des Filamentantriebs entgegengewirkt werden. Diese Problemstellung ist allerdings stark vom Drucksystem und dessen Kalibrierungs- sowie Wartungszustand abhängig.

4.12 Vergleich von Anforderungen und Ergebnissen

Am Anfang des Kapitels werden Anforderungen und Wünsche an die Mikroverzahnung gestellt, die am Ende des Lösungsweges bewertet werden (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die nachfolgende Tabelle greift die Punkte zu diesem Zweck auf und gibt jeweils eine Einschätzung zur Erfüllung. Insgesamt zeigt die Bewertung, dass die Anforderungen zu großen Teilen umgesetzt werden. Stützkonstruktionen, die auf einer Bauteiloberfläche beginnen, bleiben allerdings ein Sonderfall, der eine separate Lösung voraussetzt. Mit den bereits vorhandenen Funktionen einiger *Slicer* wie beispielsweise *Cura* kann die vorgeschlagene Lösung mit einem Gitter aus Baumatériau als untere Schnittstelle der Stützkonstruktion automatisch generieren. Für die korrekte Einstellung der *z*-Zustellung ist allerdings eine Erweiterung des *G-Code Manipulators* erforderlich.

Krit.	Forderung / Wunsch	Erfüllung
(a)	Kleinstmögliche Oberflächenbeeinflussung	Für die Mikroverzahnung muss nur die Lage bzw. Bahn modifiziert werden, welche unmittelbar in Kontakt mit der Stützstruktur steht. Dies ist beim FLM-Verfahren die kleinstmögliche Wirkeinheit, um eine formschlüssige Schnittstelle aufzubauen.
(b)	Sicherer Halt	Die entwickelte Stützstruktur kann in Abhängigkeit von den gewählten Parameter alle Haltekräfte von nahezu null bis hin zur dauerhaften Verbindung abbilden. Ein sicherer Halt kann in jedem Fall gewährleistet werden, wobei der zunehmende Aufwand beim Lösen der Verbindung und die zunehmende Rauigkeit der Kontaktfläche berücksichtigt werden müssen.

Tab. 4.14: Bewertung der Kriterien (a) bis (b)

Krit.	Forderung / Wunsch	Erfüllung
(c)	Universelles Konzept	Die Mikroverzahnung kann auf die Bedürfnisse des Druckprozesses eingestellt werden. Dabei ist das Konzept unabhängig von der Geometrie des Bauteils, sodass ein einheitliches Beschreibungsmodell verwendet werden kann. Ein Sonderfall sind Stützkonstruktionen, die auf einer Bauteiloberseite beginnen. Hier sind abweichend von der idealen Erfüllung Verbindungsschichten aus Baumaterial und eine Erweiterung des <i>G-Code Manipulators</i> erforderlich.
(d)	Einfache Trennung	Der Aufwand zum Lösen der Stützkonstruktion vom Bauteil ist abhängig von der eingestellten Haltekraft. Für die üblicherweise verwendeten amorphen Thermoplaste ist der Aufwand minimal und das Entfernen ohne Hilfsmittel möglich. Um teilkristalline Thermoplaste aus der benötigten starken Fixierung zu lösen, sind übliche Hilfsmittel wie Zangen und Hebel sinnvoll. Der Aufwand ist hier grundsätzlich höher, aber akzeptabel.
(e)	Unmodifiziertes Drucksystem	Am Fertigungssystem müssen keine Modifikationen vorgenommen werden. Prinzipiell sollte jeder Drucker, der zwei Materialien verarbeiten kann, in der Lage sein, das Verfahren anzuwenden. Die Vorschubgeschwindigkeit des Baumaterials sollte allerdings im Hinblick auf das Extrusionssystem angepasst und im Falle von Schlupf reduziert werden.
(f)	Robust gegenüber Störgrößen	Anhand der Modelle und praktischen Erfahrung lässt sich einschätzen, dass das Verfahren relativ robust gegenüber Störeinflüssen wie Düsenverschmutzung oder nicht ideal kalibrierter Materialdosierung ist. Kritisch sind hingegen alle Störgrößen, welche zu einer Abweichung der Zustellung in xy- sowie z-Richtung und der Materialdosierung führen. So können z. B. ein Antriebssystem mit Umkehrspiel oder dynamische Effekte der Materialdosierung zu unerwartet hohen oder unzureichenden Haltekraften führen. Gleiches gilt für die Kalibrierung bei Mehrdüsenystemen.

Tab. 4.15: Bewertung der Kriterien (c) bis (f)

Krit.	Forderung / Wunsch	Erfüllung
(g)	Intaktes Bauteil	Die Mikroverzahnung kann so eingestellt werden, dass bereits die erste Lage Baumaterial, die auf der Stützstruktur aufliegt, vollständig geschlossen ist. Die formschlüssig wirksamen Elemente stellen eine zusätzliche Kontur dar, welche nachträglich entfernt oder aufgrund der geringen Größe am Bauteil verbleiben kann. Die Verwendung der Zustellung in z-Richtung bedingt allerdings eine leichte Abweichung von der idealen Kontur, die negativ gewertet wird, aber in der Größenordnung der im FLM-Verfahren üblichen Toleranzen liegt.

Tab. 4.16: Bewertung des Kriteriums (g)

5 Wirtschaftliche Bedeutung

5.1 Erschließung neuer Anwendungsfelder

Die potenzielle Erweiterung des Materialspektrums erlaubt die Erschließung neuer Anwendungsfelder für die FLM-Technologie. Insbesondere Polypropylen und Polyethylen sind aufgrund ihres verbreiteten Einsatzes beispielsweise in der Medizin- und Orthopädietechnik von Relevanz. Weiterhin sind in der Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste verschiedene Polymere vorhanden, die ihre eigenen bevorzugten Einsatzgebiete besitzen. Bisher konnten diese durch das FLM-Verfahren nicht bedient werden. Ein Beispiel hierfür ist POM, welches aufgrund seiner hohen Steifigkeit und dem niedrigen Reibbeiwert üblicherweise für Präzisionsteile wie Laufrollen oder Führungselemente eingesetzt wird. Damit öffnen sich Märkte für das Verfahren, welche durch etwaige Konkurrenzverfahren noch nicht besetzt wurden.

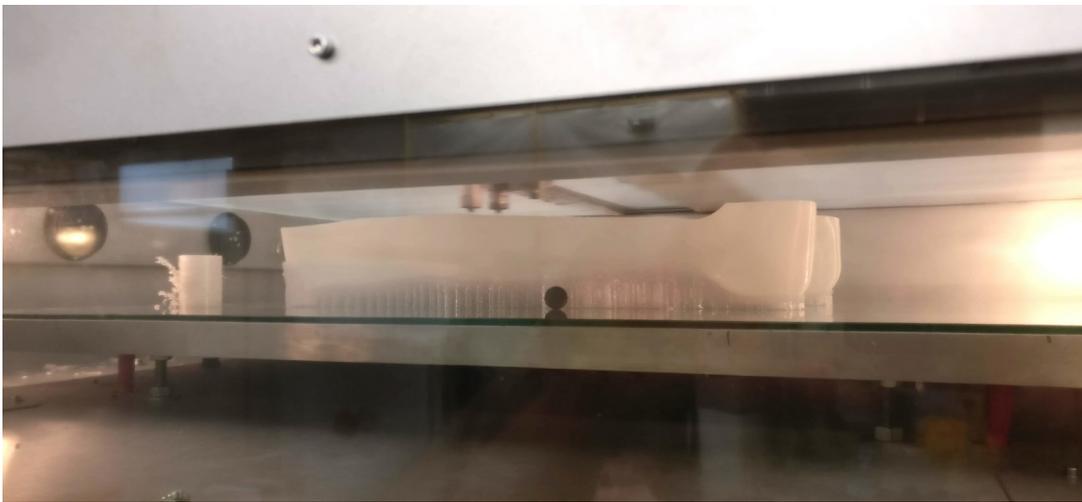


Abb. 5.1: Großvolumiges Bauteil aus Polyamid mit formschlüssiger Stützkonstruktion

Abbildung 5.2 zeigt einen solchen problematischen Anwendungsfall, der auf einer großvolumigen Versuchsanlage erfolgreich gefertigt wurde. Das eingesetzte Polyamid benötigt eine starke Fixierung, um der Verformung im Prozess entgegenzuwirken. Bei diesem Anwendungsfall wird die formschlüssige Stützkonstruktion bei Düsendurchmessern von mehr als einem Millimeter eingesetzt. Die Funktionsweise unter

diesen skalierten Bedingungen konnte mit angepassten Druckparametern ebenfalls nachgewiesen werden.

Ein grundlegender Betrachtungswinkel ist die reale Situation, in der sich ein Unternehmen befindet, welches per FLM gefertigte Kunststoffteile anbietet. In vielen Fällen wird ein potenzieller Kunde dieses Unternehmens eine konkret zu lösende Problemstellung oder ein Bauteil mit bestimmten technischen Anforderungen definieren. Die additive Fertigung ist dabei eher Mittel zum Zweck, die Erfüllung der Aufgabe steht im Vordergrund. Entscheidend ist in dieser Situation, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit der ideale oder ein zumindest akzeptabler Thermoplast nicht in Filamentform kurzfristig verfügbar ist. Die Anzahl der möglichen Polymere ist selbst innerhalb einer Gruppe wie ABS enorm. Zulassungen für medizinische Zwecke, Modifikationen für höhere Schlagzähigkeit, Oberflächenglanz oder die Wunschfarbe des Materials sind reale Anforderungen an Kunststoffteile, denen sich auch das FLM-Verfahren stellen muss. Eine formschlüssige Stützstruktur kann die Auswahl eines geeigneten Materials zwar nicht vereinfachen, bietet aber eine vereinheitlichte Lösung für die Bauplatte und das Stützmaterial. Auf diese Weise können die Entwicklungskosten gesenkt und der Zeitraum von der Anfrage bis zur Fertigstellung des Produkts verkürzt werden. Weiterhin bietet sich Potenzial, auf kleinere Serien mit komplexeren Anforderungen an das zu fertigende Bauteil flexibler zu reagieren. Somit können zuvor unwirtschaftliche Aufträge gewinnbringend durchgeführt werden.

Das Verfahren ist grundsätzlich mit jedem Drucksystem mit zwei Düsen durchführbar, wobei Einschränkungen durch die effektive Vorschubkraft der Materialförderung und die Geometrie der Düsen gegeben sind. Für einen potenziellen Anwender muss lediglich die entwickelte Software auf den *Slicer* und das einzusetzende Fertigungssystem angepasst werden. Die Kosten für den Einsatz der formschlüssigen Stützstrukturen sind daher gering und belaufen sich überwiegend auf das Erlernen im Umgang damit.

5.2 Reduzierung von Betriebsmitteln

Durch die Wahl einer einheitlichen Bauplatte beispielsweise aus Glas wird die Wirtschaftlichkeit des FLM-Verfahrens in zweierlei Hinsicht gesteigert. Einerseits sind solche Platten günstig und müssen aufgrund ihrer Robustheit nur selten getauscht werden. Die Reinigung ist auch mit stärkeren Lösungsmitteln wie Aceton oder einer Klinge zur mechanischen Ablösung stark anhaftender Rückstände möglich. Andererseits kann der Einsatz zusätzlicher Haftvermittler oder aufgeklebter Folien entfallen,

die als Verbrauchsmaterial ebenfalls einen Beitrag zur Verringerung der Verfahrenskosten leisten. Die Lagerung etwaiger Bauplatten kann überdies vereinheitlicht werden, wodurch der nötige Lagerbestand reduziert wird. Abbildung 5.2 zeigt einen Demonstrator aus Polyamid 6, der auf einem großvolumigen additiven Fertigungssystem eines Industriepartners hergestellt wurde. Dabei wird die Mikroverzahnung als einfache Koppelschicht zur Fixierung des Bauteils ohne Haftvermittler auf einer Glasplatte eingesetzt. Nach Fertigstellung des Druckprozesses kann die Anlage ohne Umrüstung direkt für den nächsten Druckauftrag eingesetzt werden.

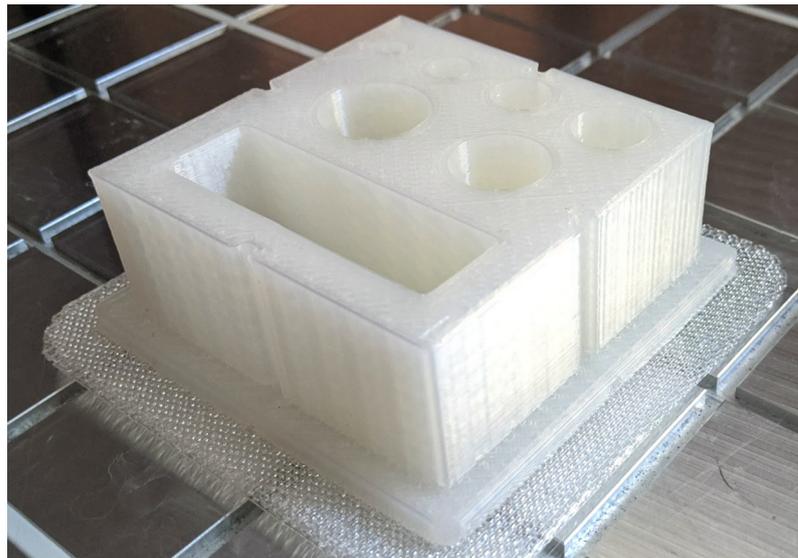


Abb. 5.2: Demonstrator aus Polyamid auf einer Stützstruktur aus PETG

Durch die mechanische Entfernung der Stützstruktur kann die Vorrichtung zum Auswaschen eines Stützmaterials entfallen, die bei anderen Systemen erforderlich ist. Die Investitionskosten sind daher geringer. In der professionellen Verarbeitung von Thermoplasten im FLM-Verfahren ist überdies der Einsatz gut konditionierter Filamente Grundvoraussetzung für wiederholbare Druckergebnisse. Dies betrifft insbesondere die Trocknung, welche unter materialspezifischen Temperaturen und Zeitintervallen durchgeführt werden sollte. Werden Öfen, Klimaschränke oder Vakuumsysteme für die Materialtrocknung eingesetzt, so kann die Planung ihrer Belegung vereinfacht werden. Abhängig vom Auftragspektrum ist eine Reduzierung der Anzahl an Trocknungseinheiten möglich und bietet potenzielle Einsparungen von Investitions- und Energiekosten, da der dauerhafte Betrieb beispielsweise von Öfen energieintensiv ist.

In der additiven Fertigung ist Recycling aufgrund der geringen absolut eingesetzten Materialmengen und der hohen Varianz an verschiedenen Thermoplasten keine übliche Maßnahme. Wird bei den formschlüssigen Stützstrukturen allerdings immer das gleiche beispielsweise Copolyester eingesetzt, kann dies zur Kosteneinsparung

genutzt werden. Hierzu wird das Material nach der Entfernung sortenrein aufbewahrt und zyklusweise zerkleinert und erneut extrudiert. Eine Mischung mit neuem Material scheint sinnvoll, um eine zu große Abweichung zwischen den Eigenschaften der produzierten Filamente zu verhindern.

5.3 Vereinfachung von Entfernung und Postprozess

Die Entfernung der formschlüssigen Stützkonstruktion ist vergleichsweise einfach. Sobald ein Teilbereich abgelöst ist, sinkt die Stärke der Verbindung zwischen der Struktur und dem Druckobjekt deutlich ab. Damit ist der zeitliche Aufwand für die Nachbearbeitung geringer als bei einer Stützkonstruktion aus Modellmaterial. Bei Entfernung durch ein Auswaschsystem ist dieser Aufwand zwar noch geringer, falls keinerlei Material im Vorfeld manuell entfernt wird, dafür ist die Zeit im Becken mit mehreren Stunden deutlich länger. Dazu kommt der Vor- und Nachbereitungsaufwand in Form der Reinigung der Schutzausrüstung sowie des Abspülens und Trocknens der Bauteile. Beim Umgang mit den häufig sauren oder basischen Flüssigkeiten z. B. beim Anmischen ist der Schutzaspekt besonders ausgeprägt.



Abb. 5.3: Koppelschicht aus *HT5300* zwischen Bauplatte (Glas) und PA

Abbildung 5.3 zeigt das Ablösen eines Bauteils von der als Koppelschicht eingesetzten Mikroverzahnung. Hier wird das Konzept genutzt, obwohl weiterhin eine klassische stoffschlüssige Stützkonstruktion am Bauteil verwendet wird. Die sehr stark eingestellte Fixierung des Polyamids im Gitter der Struktur ist erforderlich, um ein vorzeitiges Ablösen zu verhindern. Als Stützmaterial wird der für die additive Fertigung optimierte Thermoplast *HT5300* der *Eastman Chemical Company* eingesetzt.

Nach Abkühlung des Bauraums und der Bauplattform lässt sich das Druckobjekt mit geringem Kraftaufwand entnehmen und nachbearbeiten.

5.4 Einsparungen im Druckprozess

Eine mit dem Fertigungsvolumen skalierende Einsparung ist der Einsatz eines günstigen Stützmaterials. Da die entwickelte Stützkonstruktion keine spezifische Materialpaarung, sondern lediglich eine Kompatibilität der Wärmeformbeständigkeit und thermischen Schrumpfung mit dem Modellmaterial voraussetzen, sind hier nur vergleichsweise wenige technische Einschränkungen gegeben. Durch die Vereinheitlichung auf nur ein Stützmaterial ist überdies ein positiver Mengeneffekt im Einkauf des Ausgangsmaterials in Filament- oder Granulatform zu erwarten. Die Abnahmemenge beispielsweise bei Granulaten spielt üblicherweise eine maßgebliche Rolle für den verhandelbaren Preis.

Neben einem günstigeren Einkauf sind auch technische Vorteile erkennbar, welche die Wirtschaftlichkeit steigern. Es kann ein Material gewählt werden, das eine gute Druckbarkeit hinsichtlich Geschwindigkeit und Dosierfähigkeit besitzt. Eine Steigerung der effektiven Druckgeschwindigkeit wird beispielsweise durch niedrigviskoses bzw. schnellfließendes Material begünstigt, welches in einem breiten Temperaturspektrum extrudiert werden kann. Mit der Dosierfähigkeit sind negative Effekte wie die Zersetzung und Expansion in der Düse oder übermäßiger Druckaufbau durch eine hohe Schmelzeviskosität gemeint. Solche Kunststoffe benötigen eine aufwändigere Kompensation dieser Effekte durch Vorschubsteuerung und Temperaturregelung. Eine Kalibrierung der entsprechenden Parameter ist üblicherweise erforderlich und zeitintensiv. Weiterhin können solche Materialien gewählt werden, die weniger hygroskopisch als beispielsweise PVA oder das von *Stratasys* eingesetzte *SR-20* sind. Diese setzen eine besondere Handhabung und üblicherweise Trocknung voraus, da das Material sonst bei der Extrusion stark expandiert oder im Extremfall schäumt.

Ein weiterer Aspekt ist die Verfügbarkeit verschiedener Stützmaterialien für das jeweilige Modellmaterial. Hier werden in vielen Fällen eine umfangreichere Recherche sowie Testläufe mit Materialmustern erforderlich, die durch die mangelhafte Informationslage über die Zusammensetzung des jeweiligen Thermoplasts sowie das Verhalten im Gesamtprozess erschwert werden. Wenn der Hersteller das letztlich erfolgreich erprobte Produkt nicht mehr anbietet, kann sich die Recherche einer Alternative als problematisch erweisen.

Überdies kann die Dauer des Einrichtbetriebs für neue Modellmaterialien verringert werden. Bei der hierzu erforderlichen Anpassung der Prozessparameter aus einer Standardeinstellung heraus kann der Fokus auf den neuen Thermoplast gelegt werden. Diese ohnehin schon zeitintensive Aufgabe wird dann nicht zusätzlich durch die komplexen Anforderungen an Stützmaterial und Bauplatte erschwert. Während die resultierende Reduzierung von Personalkosten und aufgewendeten Maschinenstunden offensichtlich wünschenswert ist, können beispielsweise bei Hochleistungsthermoplasten wie Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI), Polysulfon (PSU) oder Polyvinylidenfluorid (PVDF) auch erhebliche Materialkosten eingespart werden. Filamente aus den genannten Materialien kosten üblicherweise über 200 € pro Kilogramm. Bei geringen Stückzahlen ist daher die schnelle und materialsparende Erreichung einer akzeptablen Bauteilqualität für eine wirtschaftliche Fertigung entscheidend. Auch hierbei kann der Einsatz der formschlüssigen Stützkonstruktion helfen (vgl. Abbildung 5.4).



Abb. 5.4: Demonstratoren aus den Hochleistungsthermoplasten PEI, PSU und PVDF

6 Abschließende Betrachtung

6.1 Rückblick und Realisierung der Zielsetzung

Im Rahmen der Ausarbeitung werden formschlüssige Stützkonstruktionen entwickelt und in anwendungsnahen Versuchsreihen erprobt. Aus der Recherche und Zusammenfassung des Standes der Technik wird die Notwendigkeit einer Vereinheitlichung der Stützkonstruktion deutlich. Dabei können sowohl wirtschaftliche Potenziale wie der Einsatz eines günstigen Stützmaterials und geringere Rüstkosten als auch technische Vorteile aufgezeigt werden. Unter letztgenannte fällt u. a. die zuverlässige Fertigung von Bauteilen aus teilkristallinen Thermoplasten wie Polypropylen und Polyamid. Die maßgeblichen Entwicklungsziele sind in Kapitel 3 ausgearbeitet. Im Rahmen der Untersuchung werden diese mit einem hohen Erfüllungsgrad umgesetzt.

Bei der Verfahrensentwicklung sind zwei Gruppen formschlüssiger Stützstrukturen entstanden, die für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet sind. Die einfachste Variante stellt die wenige Lagen dicke Koppelschicht dar, welche als erstes auf das Druckbett aufgebracht wird. Diese gitterartige, flache Struktur erlaubt den Druck eines beliebigen Thermoplasts unter Verwendung einer Bauplatte vorzugsweise aus Glas. Sie stellt damit ein praktisches Werkzeug dar und macht einen Wechsel der Platte für unterschiedliche Modellmaterialien überflüssig. Die eigentliche Stützstruktur besteht weiterhin aus Modellmaterial. Bei der zweiten Variante besteht die vollständige Stützstruktur aus dem Stützmaterial, sodass ihre einfache Entfernung möglich ist. Beide Varianten werden in der praktischen Anwendung erprobt und erfolgreich eingesetzt. Die Entfernung der Stützkonstruktion ist in den meisten Fällen deutlich einfacher als bei der konventionellen stoffschlüssigen Variante, bei der die Struktur aus Objektmaterial gefertigt wird. Grundsätzlich ist das Tragen von Schutzhandschuhen und -brille erforderlich, um vor Schnitt- und Augenverletzungen zu schützen. Überdies reichen einfache Hilfsmittel wie Hebel und Zangen, um die Stützstruktur vom Bauteil abzulösen. Sobald dies an einer Ecke des Bauteils geschehen ist, löst sich i. d. R. auch der verbundene Rest der Struktur in großen Teilen ab. Dabei hat sich PETG als geeignetes Stützmaterial für die getesteten Mo-

dellmaterialien PP und PA, die eine geringere Bett- und Bauraumtemperatur benötigen, erwiesen. Für höherschmelzende Modellmaterialien konnte das Copolyester *Amphora HT5300* des Herstellers *Eastman Chemical Company* sowie Polycarbonat allgemein identifiziert werden. Für Hochleistungsthermoplaste, die üblicherweise bei einer Bauraumtemperatur von über 135 °C verarbeitet werden, liegen keine Erfahrungen für besonders wirtschaftliche Stützmaterialien vor. Polycarbonat mit einem Anteil an Glasfasern erscheint als wirtschaftlicher Kompromiss, da es auch noch bei den gesteigerten Temperaturen eine akzeptable Festigkeit besitzt.

Ein nicht vollständig gelöster Aspekt der formschlüssigen Stützstrukturen ist der Einsatz an Stützpositionen, die den Kontakt der Struktur mit einer Bauteiloberseite erforderlich machen. In diesen Fällen wird empfohlen, die untere Schnittstelle des betreffenden Stützbereichs aus dem Modellmaterial zu fertigen. Diese Situationen sind allerdings vergleichsweise selten und lassen sich häufig durch eine Umorientierung des Bauteils oder eine Erweiterung der Stützkonstruktion lösen, sodass diese zumindest teilweise Kontakt zur Bauplattform erhält.

Für die Umsetzung der gewünschten Extrusionsmenge wird eine nachgeschaltete Software für den *Slicer Cura* in der Programmiersprache *Python 3.7* entwickelt. Die Software erlaubt die gezielte Steigerung der Extrusionsmenge an den Kontaktstellen des Bauteils mit der Stützstruktur sowie die Einstellung des Abstands zwischen Düse und Stützkonstruktion. Eine weitere Funktion ist die Visualisierung dieser Anpassung, um die Auswirkungen auf die gedruckten Proben nachvollziehen zu können.

6.2 Ausblick und weitere Forschungsfelder

Der größte Erweiterungsbedarf der formschlüssigen Stützstruktur liegt in der Lösung von Problemstellen, bei denen die Struktur auf einer Bauteiloberfläche beginnen muss. Eine solche Situation, bei der nur schlecht anderweitig Abhilfe geschaffen werden kann, ist bei konkaven Flächen bzw. in der Kontur des Bauteils gegeben, die nach oben geöffnet sind. Auf diesen Oberflächen beginnt die Stützstruktur, ohne Kontakt zur Bauplatte oder zu einer anderen bereits vorhandenen Struktur. Gleiches gilt sinngemäß für Hohlräume und Kammern, die eine ungünstig orientierte Zugänglichkeit besitzen. Hier ist Forschungsbedarf gegeben, um eine einheitliche Lösung für alle möglichen Situationen zu entwickeln. Ein Lösungsansatz kann ein hybrides Stützmaterial sein, welches eine begrenzte allgemeine Haftung besitzt und so eine sichere Ablage der unteren Schnittstelle des Stützmaterials auf dem Bauteil erlaubt. Sobald eine horizontale Verbindung mit einer fest verankerten Stützstruktur möglich ist, können Materialbahnen zwischen diesen Inseln zur Stabilisierung

der Konstruktion positioniert werden. Für diese Entwicklung scheint eine tiefgreifende Modifikation des *Slicers* erforderlich zu sein, um diese Fälle erkennen und eine entsprechende Bahnplanung durchführen zu können.

Weiterhin erscheint die Suche nach einem besser geeigneten Thermoplast hinsichtlich der Eignung als Stützmaterial sinnvoll. Während Druckmaterialien, die eine geringe Temperatur der Bauplatte bzw. des Bauraums voraussetzen, mit beispielsweise PETG als Stützmaterial bereits über einen geeigneten Partner verfügen, ist dies bei Hochleistungsthermoplasten nicht der Fall. Da bei der formschlüssigen Stützstruktur weniger Anforderungen an das Material gestellt werden, steht ein größeres Spektrum zur Verfügung. Eine umfangreichere Prüfung des Verfahrens in Kombination mit Hochleistungsthermoplasten sollte angestrebt werden.

Die Abstützung der Oberfläche und die formschlüssige Verbindung von Stütz- und Druckmaterial erfolgt bei dem aktuellen Entwicklungsstand vollflächig. Die Notwendigkeit des vollständigen Formschlusses an der gesamten Kontaktfläche ist fraglich. Es erscheint sinnvoll, die Option einer vollflächig abstützenden, aber nur segmentweise formschlüssigen Struktur zur Verbesserung der Oberflächenqualität zu untersuchen. Ein weiterer potenzieller Vorteil ist das vereinfachte Ablösen der Stützkonstruktion durch weniger verbundene Kontaktstellen.

Weiterer Optimierungsbedarf besteht in der Entwicklung einer Stützkonstruktion in Gitterform, die der Außenkontur des Bauteils in Abhängigkeit des Normalenvektors in der xy -Ebene folgt und so stets gleichmäßige Gitterplätze ausprägt (vgl. Abbildung 4.13). Aktuelle *Slicer* verfügen über keine solche Funktionalität, sondern nutzen eine statische Struktur ohne Berücksichtigung der Bauteilkontur. Die Erfahrung zeigt, dass Positionen, an denen Außenbahn und Stützkonstruktion tangential zueinander verlaufen, unter bestimmten Bedingungen einen unzureichenden Formschluss eingehen.

Ein anderer Aspekt ist die grobe Unterscheidung von biologischen und technischen Bauteilen. Hier existiert keine allgemeine Definition, allerdings besitzen technisch anmutende Bauteile aus eigener Erfahrung häufig eine glatte Unterseite und einen kantigen Aufbau, während biologisch inspirierte sich eher durch vollständig freigeformte Flächen mit fließenden Übergängen charakterisieren lassen. Der Umgang mit den formschlüssigen Stützstrukturen hat gezeigt, dass für beide Gruppen ein voneinander abweichender optimaler Parametersatz existiert. Eine weiterführende Untersuchung verspricht Optimierungspotenzial und eine bessere Anpassung an den jeweiligen Anwendungsfall.

Die vollständige Integration des Verfahrens in einem *Slicer* ermöglicht eine feinere Abstimmung der umfangreichen Einstellmöglichkeiten. Beispielsweise kann die Druckgeschwindigkeit an Kontaktstellen von Modell- und Stützmaterial gezielt reduziert und die Extrusionstemperatur lokal gesteigert werden. Diese Manipulation kann genutzt werden, um das Eindringen des Baumaterials in die gitterartige Stützkonstruktion zu begünstigen. Grundsätzlich wäre ein höherer Grad der Automatisierung der softwaretechnischen Generierung wünschenswert. Mit der in dieser Arbeit entwickelten Software kann die Manipulation des G-Codes effektiv umgesetzt werden. Werden diese Modifikationen allerdings in zukünftigen Untersuchungen umfangreicher, so erscheint eine Integration in den *Slicer* vorteilhaft. Die nachträgliche Extraktion bestimmter Merkmale und Parameter ist grundsätzlich unnötig, da alle benötigten Informationen während der ersten Generierung des G-Code im *Slicer* bereits vorliegen.

Auch Mischformen von druckgeprägter und modellgeprägter Mikroverzahnung sind denkbar und bieten eine potenzielle Kombination der Stärken beider Varianten. So kann die druckgeprägte Verzahnung sinnvollerweise für flache Überhangwinkel und die modellgeprägte für steile eingesetzt werden. Eine Gegenüberstellung der jeweiligen Vor- und Nachteile ist in Abschnitt 4.2.5 zu finden. Ebenfalls sollte die Eignung und Parametrisierung der Mikroverzahnung für dauerhafte formschlüssige Verbindungen umfangreicher untersucht werden. Die in Abschnitt 4.10 beschriebenen Zugversuche und Demonstratoren mit Beschichtung zeigen großes Potenzial für diese Entwicklungsrichtung.

Um ein tieferes Verständnis über die wirksamen Zusammenhänge beim Eindringen des Baumaterials in die Stützkonstruktion zu erlangen, ist eine umfängliche Simulation des Vorgangs erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird ein empirischer Ansatz unter Einbeziehung des Fließverhaltens der Polymere gewählt, welcher ein direkt einsetzbares Ergebnis und einen Lösungsraum für das Verfahren bietet. Für die Fortsetzung dieser Untersuchung sind andere Hilfsmittel angebracht, die mehr Informationen über die Vorgänge auf detaillierter Ebene bieten.

6.3 Fazit

Insgesamt wird die Entwicklung der formschlüssigen Stützkonstruktionen unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte als erfolgreich angesehen. Im eigenen praktischen Einsatz haben sich diese Strukturen bewährt und als verlässliches Werkzeug etabliert. Besonders in Anwendungsfällen mit großvolumigen Bauteilen, die aus teilkristallinen Thermoplasten hergestellt werden müssen,

stellen formschlüssige Stützkonstruktionen nach eigener Erfahrung häufig die einzige Option dar, um einen erfolgreichen Fertigungsprozess durchzuführen. Sie sind ursprünglich als notwendiges Hilfsmittel zur Fertigung eines großvolumigen realen Produkts aus Polyamid entwickelt worden. Im Forschungsbetrieb bieten die neuartigen Stützkonstruktionen ein unkompliziertes Hilfsmittel, um den Umrüstaufwand der additiven Versuchsanlagen gering zu halten. Neue Werkstoffe können kurzfristig getestet werden, ohne Stützmaterial sowie Bauplatte recherchieren und Filament produzieren zu müssen.

Für die Verwendung von teilkristallinen Baumaterialien bestehen trotz des erfolgreichen Lösungsansatzes Grenzen, die bei der Auslegung des Prozesses berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich kann eine extreme Niederhaltekraft erreicht werden, die sogar die Stärke der Verbindung zwischen den Lagen des Bauteils übersteigt. Abhängig von der Geometrie und den Materialeigenschaften kann es das Bauteil durch die entstehenden Spannungen zerreißen. Die Stützstruktur sollte daher Raum für eine kontrollierte thermische Verformung bieten. Teilkristalline Thermoplaste besitzen aufgrund ihrer Eigenschaften großes Potenzial. Eine genauere Betrachtung des Schrumpfungsprozesses und der daraus resultierenden verfahrenstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung der entstehenden Spannungen sind ein weiteres aussichtsreiches Forschungsfeld. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Stützstruktur leistet einen Beitrag, diese Weiterentwicklungen des FLM-Verfahrens für nachfolgende Untersuchungen einfacher zu gestalten.

Die entwickelte Technik kann sowohl auf kleinen Desktop-Geräten als auch auf großvolumigen professionellen Anlagen ohne deren Modifikation eingesetzt werden. Besonders komfortabel ist die Verwendung von zwei Druckköpfen oder einem vergleichbaren System, das automatisiert zwischen zwei Materialien wechseln kann. Überdies ist der Einsatz einer einfachen Koppelschicht auch bei Systemen mit nur einem Extrusionsstrang möglich, indem der Druckprozess nach Fertigstellung dieser Schicht pausiert und das Material manuell gewechselt wird. Aktuelle *Slicer* bieten hierfür bereits fertige Erweiterungen, die eine unkomplizierte Auswahl der zu pausierenden Schicht inklusive des Anfahrens einer Warteposition erlauben. Dem Einsatz formschlüssiger Stützkonstruktionen stellt sich daher nahezu keine Hürde entgegen. Sie steht einem breiten Anwenderkreis unmittelbar zur Verfügung.

Literatur

- [Ama20] Amazon Europe Core S.à r.l. *Bestseller Filament-3D-Druckmaterialien*. 2020. URL: <https://www.amazon.de/gp/bestsellers/computers/6589299031> (besucht am 20.01.2020).
- [APS19] Jean-François Agassant, Franck Pigeonneau, Lucas Sardo et al. “Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing”. In: *Additive Manufacturing* 29 (2019), Artikel 100794. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100794.
- [Aut20] Autodesk. *Netfabb - Vernetzte Software für die additive Fertigung, Konstruktion und Simulation*. 2020. URL: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/products/netfabb/fy21/overview/images/netfabb-premium-large-1080x1080.jpg> (besucht am 01.06.2020).
- [BBH10] Jeppe Byskov-Nielsen, Jens V. Boll, Allan H. Holm et al. “Ultra-high-strength micro-mechanical interlocking by injection molding into laser-structured surfaces”. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 30.6 (2010), S. 485–488. ISSN: 01437496. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2010.03.008.
- [Bel02] Anna Bellini. “Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design”. Ph.D., Materials Engineering. Universität Drexel, 2002. URL: <http://hdl.handle.net/1860/22> (besucht am 20.01.2021).
- [BFG04] H. A. Bruck, G. Fowler, S. K. Gupta et al. “Using geometric complexity to enhance the interfacial strength of heterogeneous structures fabricated in a multi-stage, multi-piece molding process”. In: *Experimental Mechanics* 44.3 (2004), S. 261–271. ISSN: 0014-4851. DOI: 10.1007/BF02427892.
- [CCR17] Simone Cacace, Emiliano Cristiani und Leonardo Rocchi. “A level set based method for fixing overhangs in 3D printing”. In: *Applied Ma-*

- thematical Modelling* 44 (2017), S. 446–455. ISSN: 0307904X. DOI: 10.1016/j.apm.2017.02.004.
- [DHL14] Jérémie Dumas, Jean Hergel und Sylvain Lefebvre. “Bridging the gap”. In: *ACM Transactions on Graphics* 33.4 (2014), S. 1–10. ISSN: 07300301. DOI: 10.1145/2601097.2601153.
- [DIM20] DIMA 3D. *DimaFIX Technical Documentation*. 2020. URL: http://www.dima3d.com/wp-content/uploads/2015/01/Dimafix_doc_tecnico_EN.pdf (besucht am 17.01.2020).
- [DIN52900] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO /ASTM 52900: Grundlagen – Terminologie*. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- [DIN8580] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriff, Einteilung*. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- [DMC17] Paramita Das, Kunal Mhapsekar, Sushmit Chowdhury et al. “Selection of build orientation for optimal support structures and minimum part errors in additive manufacturing”. In: *Computer-Aided Design and Applications* 14 (2017), S. 1–13. DOI: 10.1080/16864360.2017.1308074.
- [E3D20] E3D. *SpoolWorks -Scaffold Snap*. 2020. URL: https://e3d-online.dozuki.com/Item/Scaffold_Snap (besucht am 31.01.2021).
- [Fil20a] Filafarm GmbH & Co. KG. *Beigelegte Anleitung für die Bauplatte FilaPrint*. 2020.
- [Fil20b] Filamentworld. *Produktübersicht Filamente*. 2020. URL: <https://www.filamentworld.de/shop/> (besucht am 07.06.2020).
- [FWH19] Raphael Freund, Hagen Watschke, Julius Heubach et al. “Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion”. In: *Applied Sciences* 9.9 (2019), S. 1782. DOI: 10.3390/app9091782.
- [FWR18] Emily R. Fitzharris, Narumi Watanabe, David W. Rosen et al. “Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95.5-8 (2018), S. 2059–2070. DOI: 10.1007/s00170-017-1340-8.
- [Geb16] Andreas Gebhardt. *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. 81631 München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN: 9783446445390.

- [GED15] A. Guerrero-de-Mier, M. M. Espinosa und M. Domínguez. “Bricking: A New Slicing Method to Reduce Warping”. In: *Procedia Engineering* 132 (2015), S. 126–131. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.488.
- [GG16] Andrew T. Gaynor und James K. Guest. “Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design”. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 54.5 (2016), S. 1157–1172. ISSN: 1615-147X. DOI: 10.1007/s00158-016-1551-x.
- [GGB06] Regina M. Gouker, Satyandra K. Gupta, Hugh A. Bruck et al. “Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material molding”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30.11-12 (2006), S. 1049–1075. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-005-0152-4.
- [Hag15] Richard Hagl. *Das 3D-Druck-Kompendium*. 65189 Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015. ISBN: 978-3-658-07046-5. DOI: 10.1007/978-3-658-07047-2.
- [HJW15] Kailun Hu, Shuo Jin und Charlie C.L. Wang. “Support slimming for single material based additive manufacturing”. In: *Computer-Aided Design* 65 (2015), S. 1–10. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2015.03.001.
- [HK17] Md Ahasan Habib und Bashir Khoda. “Grain-based Support Architecture Design for Additive Manufacturing”. In: *Procedia Manufacturing* 10 (2017), S. 876–886. ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.075.
- [Hor14] Florian Horsch. *3D-Druck für alle: Der Do-it-yourself-Guide*. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. 81631 München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. ISBN: 978-3-446-44261-0. DOI: 10.3139/9783446442825. URL: <http://dx.doi.org/10.3139/9783446442825>.
- [HXJ18] Shen Hongyao, Ye Xiaoxiang und Fu Jianzhong. “Research on the flexible support platform for fused deposition modeling”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97.9-12 (2018), S. 3205–3221. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-018-2046-2.
- [HYW09] Xiaomao Huang, Chunsheng Ye, Siyu Wu et al. “Sloping wall structure support generation for fused deposition modeling”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42.11-12 (2009), S. 1074–1081. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-008-1675-2.

- [JHF15] Yu-an Jin, Yong He und Jian-zhong Fu. “Support generation for additive manufacturing based on sliced data”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80.9-12 (2015), S. 2041–2052. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-015-7190-3.
- [JHS14] Xin Jin, Lars Heepe, Jan Strueben et al. “Challenges and solutions for joining polymer materials”. In: *Macromolecular rapid communications* 35.18 (2014), S. 1551–1570. DOI: 10.1002/marc.201400200.
- [Jia16] Jiahui Wu. *The Chemistry Behind Soluble Support Removal in Fused Deposition Modeling*. 2016. URL: https://www.padtinc.com/blog/chemistry_soluble_support_removal_fdm_3d_printing/ (besucht am 25.10.2020).
- [JM14] Friedrich Johannaber und Walter Michaeli. *Handbuch Spritzgießen*. 2. Auflage. 81631 München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. ISBN: 3-446-22966-3. DOI: 10.3139/9783446440982.
- [JSX18] Jingchao Jiang, Jonathan Stringer, Xun Xu et al. “Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste”. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31.10 (2018), S. 961–969. ISSN: 0951-192X. DOI: 10.1080/0951192X.2018.1466398.
- [KAS18] Mohammad Abu Hasan Khondoker, Asad Asad und Dan Sameoto. “Printing with mechanically interlocked extrudates using a custom bi-extruder for fused deposition modelling”. In: *Rapid Prototyping Journal* 24.6 (2018), S. 921–934. ISSN: 1355-2546. DOI: 10.1108/RPJ-03-2017-0046.
- [KCL18] Yu-Hsin Kuo, Chih-Chun Cheng, Yang-Shan Lin et al. “Support structure design in additive manufacturing based on topology optimization”. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 57.1 (2018), S. 183–195. ISSN: 1615-147X. DOI: 10.1007/s00158-017-1743-z.
- [KFW19] E. Karasik, R. Fattal und M. Werman. “Object Partitioning for Support-Free 3D-Printing”. In: *Computer Graphics Forum* 38.2 (2019), S. 305–316. ISSN: 01677055. DOI: 10.1111/cgf.13639.
- [Kle16] Wilhelm Kleppmann. *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 9. überarbeitete Auflage. Praxisreihe Qualitätswissen. 81631 München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN: 3446447164.

- [Lan16] Matthijs Langelaar. “Topology optimization for additive manufacturing with controllable support structure costs”. In: *Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering: ECCOMAS Congress 2016*. 2016, S. 3689–3699. DOI: 10.7712/100016.2065.5873.
- [LBR12] Linjie Luo, Ilya Baran, Szymon Rusinkiewicz et al. “Chopper: partitioning models into 3D-printable parts”. In: *ACM Transactions on Graphics* 31.6 (2012), S. 1. ISSN: 07300301. DOI: 10.1145/2366145.2366148.
- [LFM16] Mario Lušić, Frank Feuerstein, Driton Morina et al. “Fluid-based Removal of Inner Support Structures Manufactured by Fused Deposition Modeling: An Investigation on Factors of Influence”. In: *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 1033–1038. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.002.
- [LL17] Jusung Lee und Kunwoo Lee. “Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.5-8 (2017), S. 2151–2163. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-016-9239-3.
- [Mak20] L. L.C. MakerBot Industries. *User Manual for the MakerBot® Method™ Series 3D Printers*. 2020. URL: https://support.makerbot.com/learn/method-x/user-manual/user-manual_13760 (besucht am 26.06.2020).
- [Mei18] David Meintrup. *Angewandte Statistik: Eine Einführung mit JMP*. 1. Auflage. CreateSpace Open Publishing Platform, 2018. ISBN: 9781981669899.
- [Mos21] Mosaic Manufacturing Ltd. *Palette 2S and Palette 2S Pro: The most reliable Palette yet*. 2021. URL: <https://www.mosaicmfg.com/blogs/news/palette-2s-and-palette-2s-pro-the-most-reliable-palette-yet-1> (besucht am 31.01.2021).
- [MPM18] Sherri L. Messimer, Albert E. Patterson, Nasiha Muna et al. “Characterization and Processing Behavior of Heated Aluminum-Polycarbonate Composite Build Plates for the FDM Additive Manufacturing Process”. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2.1 (2018), S. 12. DOI: 10.3390/jmmp2010012.

- [MS16] Amir M. Mirzendehtdel und Krishnan Suresh. “Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing”. In: *Computer-Aided Design* 81 (2016), S. 1–13. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2016.08.006. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448516300951>.
- [MSI09] Nikzad Mostafa, Hasan Masood Syed, Sbarski Igor et al. “A study of melt flow analysis of an ABS-Iron composite in fused deposition modelling process”. In: *Tsinghua Science and Technology* 14.S1 (2009), S. 29–37. DOI: 10.1016/S1007-0214(09)70063-X.
- [nic20] niceshops GmbH. *Produktübersicht Filamente*. 2020. URL: <https://www.3djake.de/filament> (besucht am 07.06.2020).
- [NOG19] Ethan Nyberg, Aine O’Sullivan und Warren Grayson. “scafSLICR: A MATLAB-based slicing algorithm to enable 3D-printing of tissue engineering scaffolds with heterogeneous porous microarchitecture”. In: *PloS one* 14.11 (2019), Artikel 0225007. DOI: 10.1371/journal.pone.0225007.
- [NRA17] M. A. Nazan, F. R. Ramli, M. R. Alkahari et al. “An exploration of polymer adhesion on 3D printer bed”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 210 (2017), Artikel 012062. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/210/1/012062.
- [Nut21] Nutzer Minihaa. *Highperformance thermoplastics*. 2021. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Highperformance_thermoplastics.svg (besucht am 19.02.2021).
- [NWZ17] Fei Ni, Guangchun Wang und Haibin Zhao. “Fabrication of water-soluble poly(vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application”. In: *Journal of Applied Polymer Science* 134.24 (2017), S. 69. ISSN: 00218995. DOI: 10.1002/app.44966.
- [PA15] Ratnadeep Paul und Sam Anand. “Optimization of layered manufacturing process for reducing form errors with minimal support structures”. In: *Journal of Manufacturing Systems* 36 (2015), S. 231–243. ISSN: 02786125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.06.014.
- [Pol20] Polymaker. *PolySupport*. 2020. URL: <https://eu.polymaker.com/product/polysupport/> (besucht am 31.01.2021).

- [Pru20a] Prusa Research. *Flexible steel sheets*. 2020. URL: https://help.prusa3d.com/article/WPL74Wx4aU-steel-sheets#_ga=2.221539867.2049099177.1580911601-635785036.1580046241 (besucht am 01.04.2020).
- [Pru20b] Prusa Research. *Multi Material Upgrade Kit 2.0*. 2020. URL: <https://www.prusa3d.de/original-prusa-i3-multi-material-2-0/> (besucht am 11.09.2020).
- [PSM18] David D. Phan, Zachary R. Swain und Michael E. Mackay. “Rheological and heat transfer effects in fused filament fabrication”. In: *Journal of Rheology* 62.5 (2018), S. 1097–1107. ISSN: 0148-6055. DOI: 10.1122/1.5022982.
- [RCL08] H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong et al. “Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modelling”. In: *Journal of materials science. Materials in medicine* 19.7 (2008), S. 2541–2550. DOI: 10.1007/s10856-007-3203-6.
- [RSC20] Lars Rossing, Rob B.N. Scharff, Bryan Chömpff et al. “Bonding between silicones and thermoplastics using 3D printed mechanical interlocking”. In: *Materials & Design* 186 (2020), Artikel 108254. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108254.
- [RSF19] Micaela Ribeiro, Olga Sousa Carneiro und Alexandre Ferreira da Silva. “Interface geometries in 3D multi-material prints by fused filament fabrication”. In: *Rapid Prototyping Journal* 25.1 (2019), S. 38–46. ISSN: 1355-2546. DOI: 10.1108/RPJ-05-2017-0107.
- [SAB16] Nor Aiman Sukindar, M. K. A. Ariffin, B. T. Hang Tuah Baharudin et al. “Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3D printing”. In: *Jurnal Teknologi* 78.10 (2016). ISSN: 0127-9696. DOI: 10.11113/jt.v78.6265.
- [Sch20] Schmitt Ultraschalltechnik GmbH. *Metall- und Kunststoffreinigung*. 2020. URL: http://schmitt-ultraschall.de/wp-content/uploads/2019/07/SUT_Reinigungssysteme_Kunststoff_Metall.pdf (besucht am 31.01.2021).
- [SDL16] Zhen-Hong Shen, Ning Dai, Da-Wei Li et al. “Bridge support structure generation for 3D printing”. In: *Proceedings for the 2015 International Workshop on Materials, manufacturing technology, electronics and information science*. Hrsg. von Xiaolong Li. Singapore: WORLD

- SCIENTIFIC, 2016, S. 141–149. ISBN: 978-981-310-937-7. DOI: 10.1142/9789813109384_0016.
- [SGL18] Martin Spoerk, Joamin Gonzalez-Gutierrez, Christof Lichal et al. “Optimisation of the Adhesion of Polypropylene-Based Materials during Extrusion-Based Additive Manufacturing”. In: *Polymers* 10.5 (2018), S. 490. DOI: 10.3390/polym10050490.
- [Sim20] Simplify3D. *Adding and Modifying Support Structures*. 2020. URL: <https://www.simplify3d.com/support/articles/adding-and-modifying-support-structures/> (besucht am 31.01.2021).
- [Sin18] Kunal Singh. “Experimental study to prevent the warping of 3D models in fused deposition modeling”. In: *International Journal of Plastics Technology* 22.1 (2018), S. 177–184. ISSN: 0972-656X. DOI: 10.1007/s12588-018-9206-y.
- [SLZ17] Tingqiang Song, YaLin Liu, Min Zhang et al. “Design and implementation of FDM support automatic generation algorithm based on Matlab”. In: *IEEE ICSPAC 2017*. 2017, S. 520–525. ISBN: 978-1-5386-3016-7. DOI: 10.1109/SPAC.2017.8304333.
- [SSE17] Christopher Scott Shafer, Derek Holden Siddel und Amy McDow Elliott. “Cleated Print Surface for Fused Deposition Modeling”. In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 7.1 (2017). ISSN: 21595275. DOI: 10.17265/2159-5275/2017.01.005.
- [SSW17] Martin Spoerk, Janak Sapkota, Georg Weingrill et al. “Shrinkage and Warpage Optimization of Expanded-Perlite-Filled Polypropylene Composites in Extrusion-Based Additive Manufacturing”. In: *Macromolecular Materials and Engineering* 302.10 (2017), Artikel 1700143. ISSN: 14387492. DOI: 10.1002/mame.201700143.
- [Str15] Ltd. Stratasys. *MSDS: Waterworks Soluble Concentrate P400SC*. 2015. URL: http://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2016/12/400625_0002_REV_A_EN.pdf (besucht am 31.01.2021).
- [Str20a] Ltd. Stratasys. *F900 3D Production System User Guide*. 2020. URL: <https://support.stratasys.com/products/fdm-platforms/Fortus-900mc---F900> (besucht am 07.06.2020).
- [Str20b] Ltd. Stratasys. *FDM Best Practice - Support Removal*. 2020. URL: <https://support.stratasys.com/sitecore/api/downloadazurefile?id=f975cc4e-d52f-429a-aa41-3062776ca655> (besucht am 10.01.2021).

- [SU14] Ryan Schmidt und Nobuyuki Umetani. “Branching support structures for 3D printing”. In: *ACM SIGGRAPH 2014 Studio*. Hrsg. von ACM-SIGGRAPH. 2014. DOI: 10.1145/2619195.2656293.
- [SvH10] Karl Siebertz, David van Bebbler und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 69121, Heidelberg: Springer Verlag GmbH, 2010. ISBN: 1282830414. DOI: 10.1007/978-3-642-05493-8.
- [TPV04] K. Thrimurthulu, Pulak M. Pandey und N. Venkata Reddy. “Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling”. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44.6 (2004), S. 585–594. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004.
- [Ult20a] Ultimaker BV. *Stützstrukturmuster*. 2020. URL: <https://ultimaker.com/photo/image/1300x0/5b338fcc21a41/SupportPatterns.png> (besucht am 31.01.2021).
- [Ult20b] Ultimaker BV. *Technisches Datenblatt Breakaway*. 2020. URL: <https://ultimaker.com/download/73402/TDS%20Breakaway%20v1.001%20DE.pdf> (besucht am 31.01.2021).
- [Ult20c] Ultimaker BV. *Ultimaker PVA (Polyvinylalkohol)*. 2020. URL: <https://ultimaker.com/de/materials/pva> (besucht am 10.06.2020).
- [VA16] Rohan Vaidya und Sam Anand. “Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint”. In: *Procedia Manufacturing* 5 (2016), S. 1043–1059. ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.072. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916300841>.
- [VDI3405] Verband Deutscher Ingenieure. *VDI-Richtlinie 3405*.
- [Ver17] VerbatimEurope. *Verbatim BVOH 3D Printing Support Material*. 2017. URL: https://www.youtube.com/watch?time_continue=254&v=2QNvkr9iTec&feature=emb_title.
- [Ver21] Verbatim GmbH. *Filament-Vergleichstabelle*. 2021. URL: <https://www.verbatim.de/de/3D/filament-comparison-chart/> (besucht am 05.01.2021).
- [VGB14] J. Vanek, J. A. G. Galicia und B. Benes. “Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication”. In: *Computer Graphics Forum* 33.5 (2014), S. 117–125. ISSN: 01677055. DOI: 10.1111/cgf.12437.

- [WH11] C. F. Jeff Wu und Michael S. Hamada. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. ISBN: 9780471699460. URL: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=819144>.
- [Woh12] Terry T. Wohlers. *Wohlers report 2012: Additive manufacturing and 3D printing state of the industry*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, 2012. ISBN: 0-9754429-8-8.
- [Woh19] Terry T. Wohlers. *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, 2019. ISBN: 099133325X.
- [WWS18] Hagen Watschke, Lennart Waalkes, Christian Schumacher et al. “Development of Novel Test Specimens for Characterization of Multi-Material Parts Manufactured by Material Extrusion”. In: *Applied Sciences* 8.8 (2018), S. 1220. DOI: 10.3390/app8081220.
- [WXJ07] Tian-Ming Wang, Jun-Tong Xi und Ye Jin. “A model research for prototype warp deformation in the FDM process”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33.11-12 (2007), S. 1087–1096. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9.
- [ZC08] Y. Zhang und K. Chou. “A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 222.8 (2008), S. 959–968. ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1243/09544054JEM990.
- [ZHF18] Hai-ming Zhao, Yong He, Jian-zhong Fu et al. “Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure”. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 51 (2018), S. 1–13. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.11.011.
- [ZLR19] Yong Zhou, Han Lu, Qingrong Ren et al. “Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree”. In: *Graphical Models* 101 (2019), S. 8–16. ISSN: 15240703. DOI: 10.1016/j.gmod.2018.12.003.
- [ZWS17] Wei Zhang, Amanda S. Wu, Jessica Sun et al. “Characterization of residual stress and deformation in additively manufactured ABS polymer and composite specimens”. In: *Composites Science and Technology* 150.6 (2017), S. 102–110. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.07.017.

- [ZXW15] Xiaolong Zhang, Yang Xia, Jiaye Wang et al. “Medial axis tree - an internal supporting structure for 3D printing”. In: *Computer Aided Geometric Design* 35-36 (2015), S. 149–162. ISSN: 01678396. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.012.

A Anhang

A.1 Detailaufnahmen der Proben des VP 30°

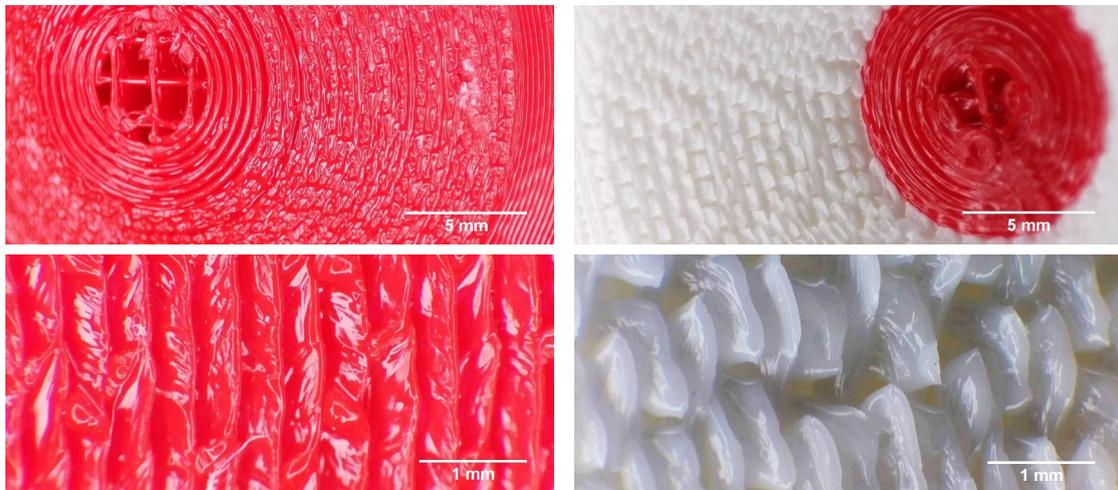


Abb. A.1: Probe Nr. 1: Haltekraft 472,2 N, Oberflächenqualität +2

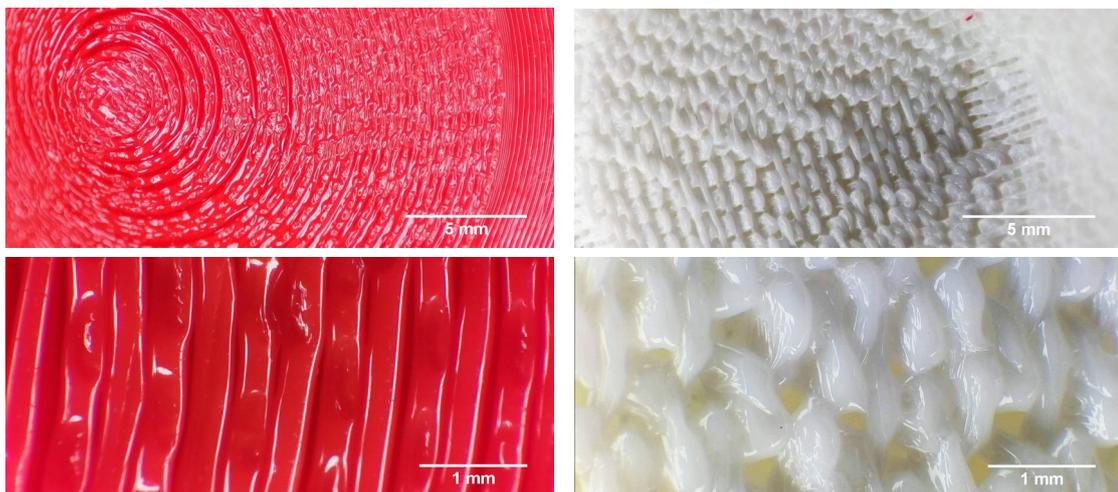


Abb. A.2: Probe Nr. 2: Haltekraft 47,4 N, Oberflächenqualität -1

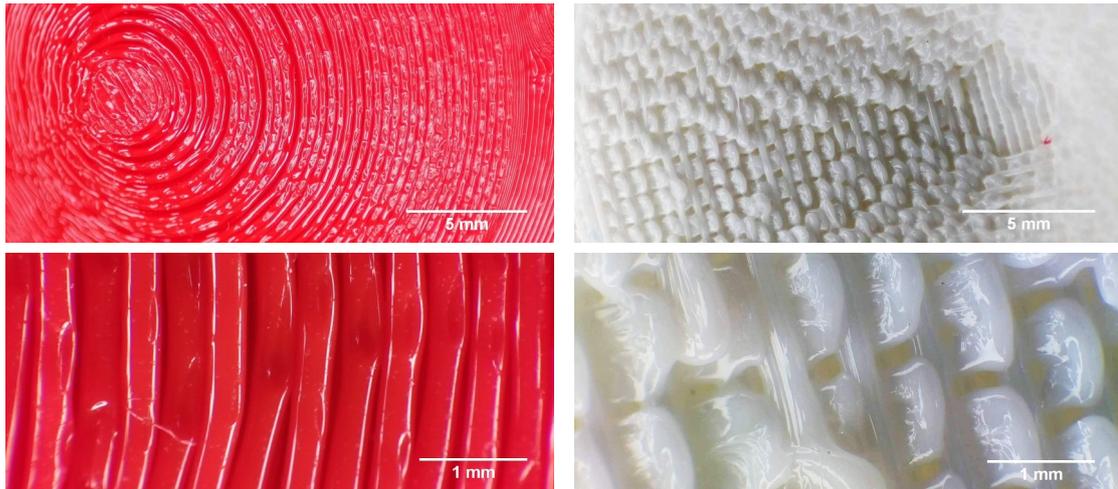


Abb. A.3: Probe Nr. 3: Haltekraft **15,9 N**, Oberflächenqualität **-2**

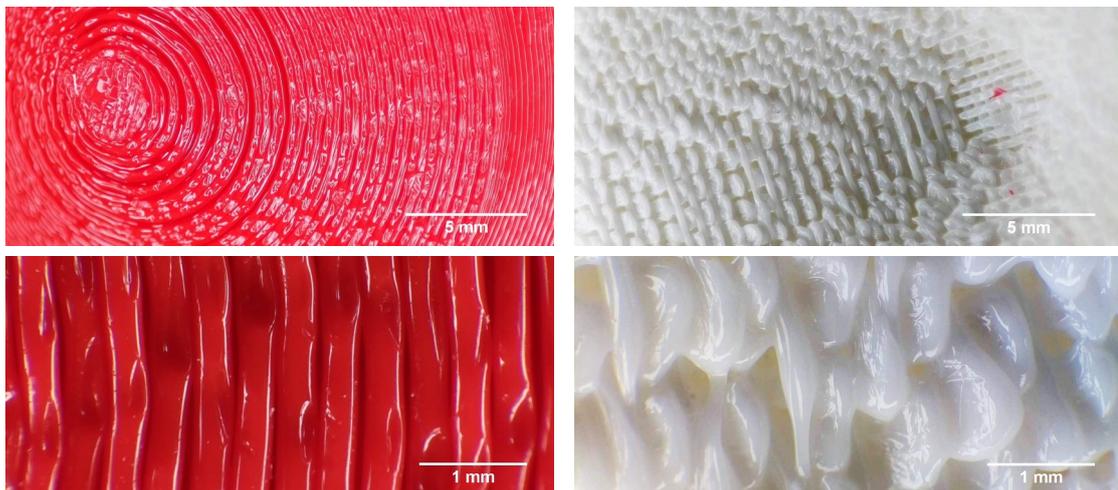


Abb. A.4: Probe Nr. 4: Haltekraft **30,9 N**, Oberflächenqualität **-1**

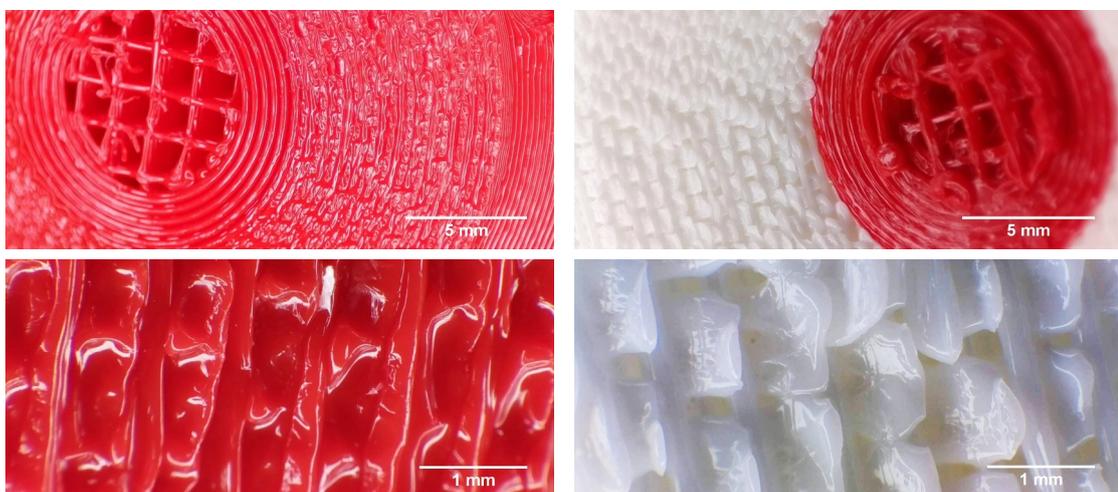


Abb. A.5: Probe Nr. 5: Haltekraft **453,8 N**, Oberflächenqualität **+2**

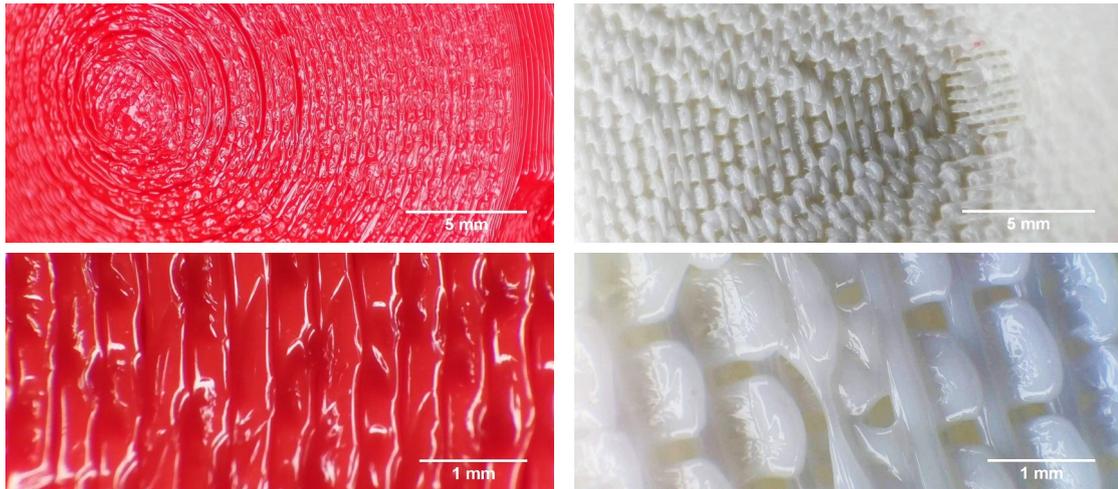


Abb. A.6: Probe Nr. 6: Haltekraft 115,4 N, Oberflächenqualität 0

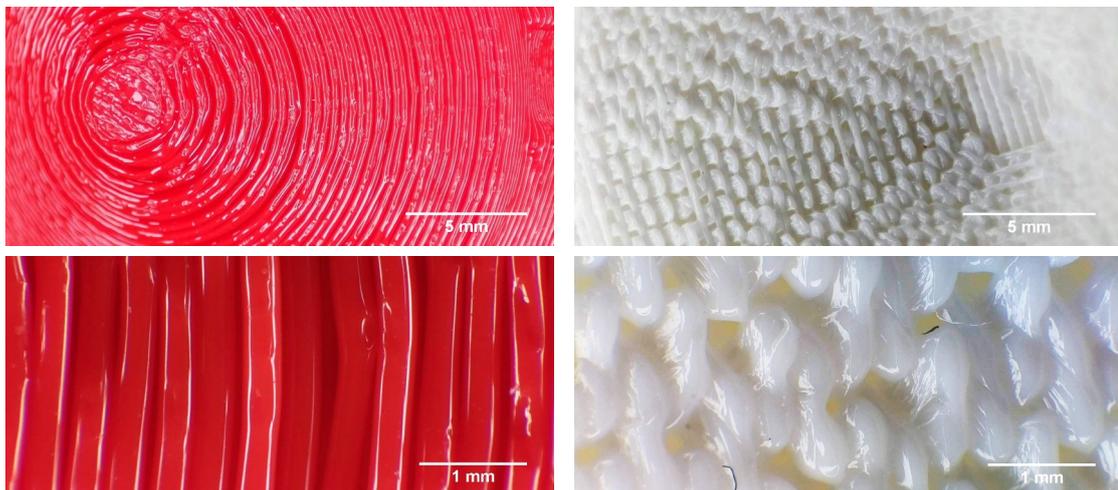


Abb. A.7: Probe Nr. 7: Haltekraft 20,3 N, Oberflächenqualität -2



Abb. A.8: Probe Nr. 8: Haltekraft 347,5 N, Oberflächenqualität +2

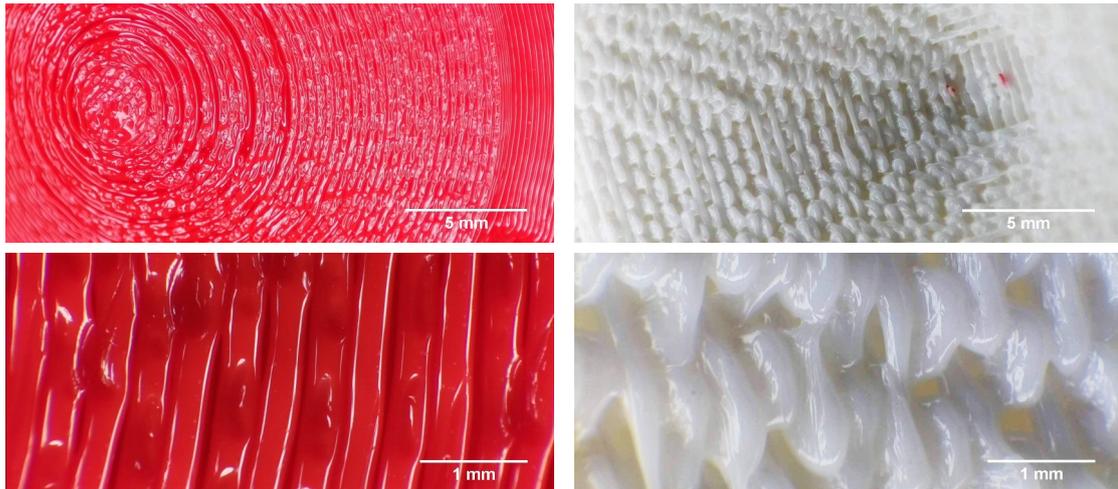


Abb. A.9: Probe Nr. 9: Haltekraft 58,8 N, Oberflächenqualität -1

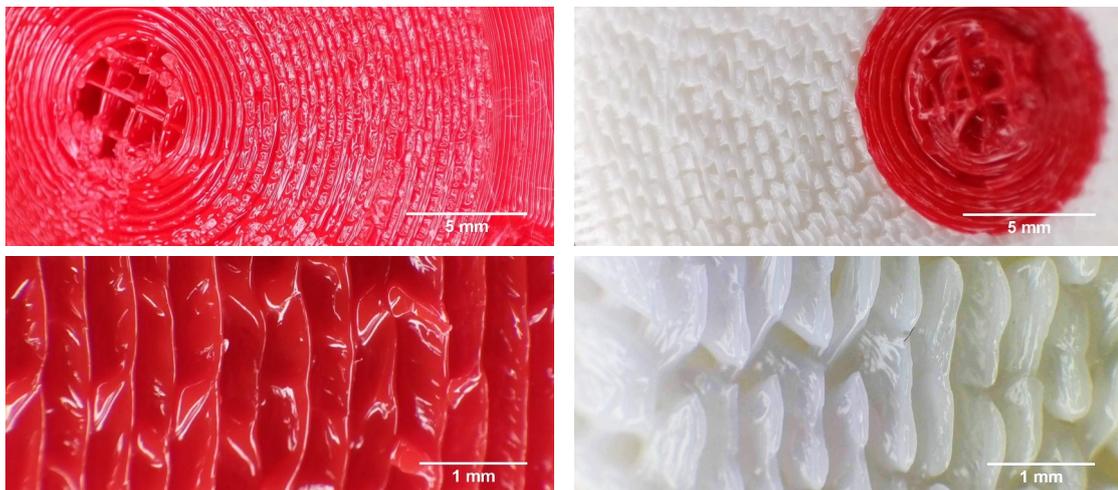


Abb. A.10: Probe Nr. 10: Haltekraft 342,2 N, Oberflächenqualität +2

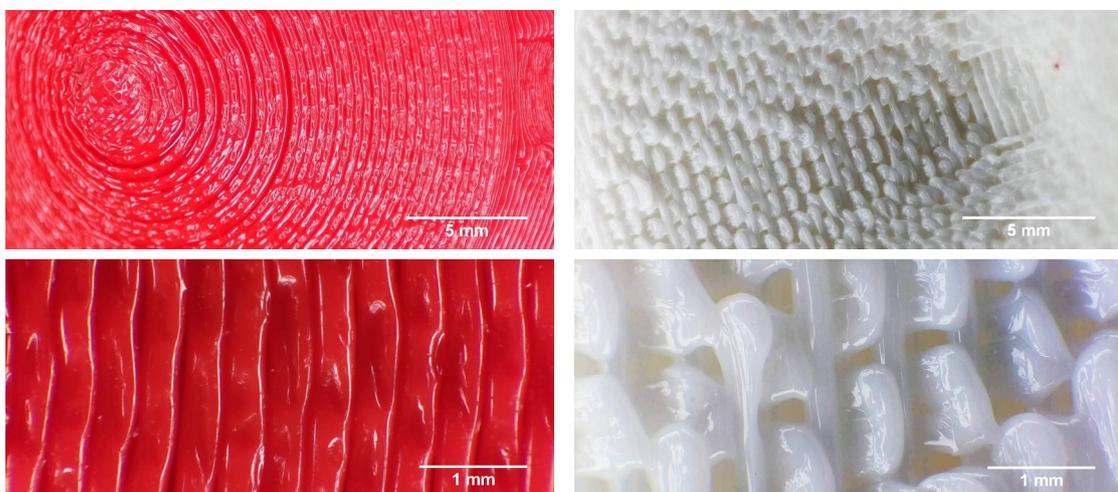


Abb. A.11: Probe Nr. 11: Haltekraft 64,4 N, Oberflächenqualität -1

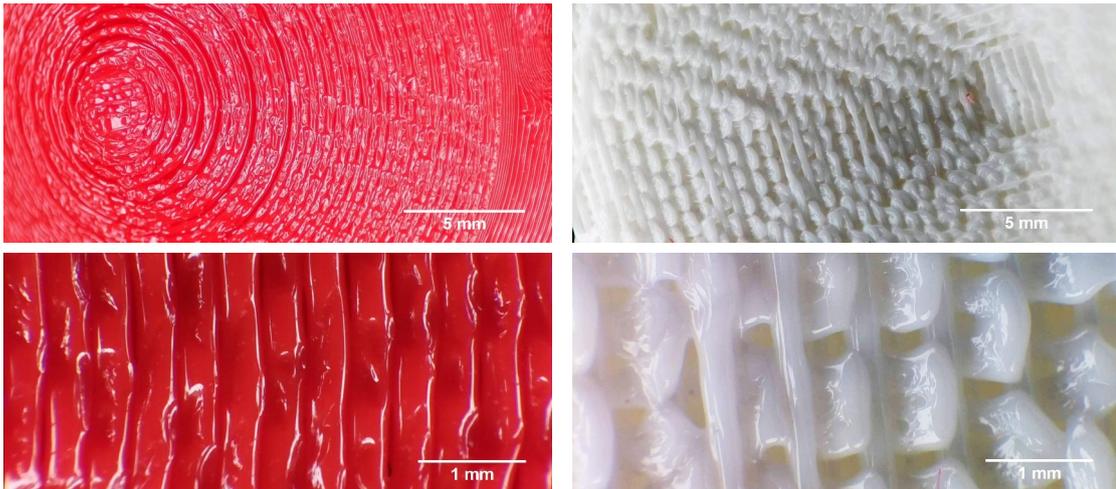


Abb. A.12: Probe Nr. 12: Haltekraft 48,1 N, Oberflächenqualität -1

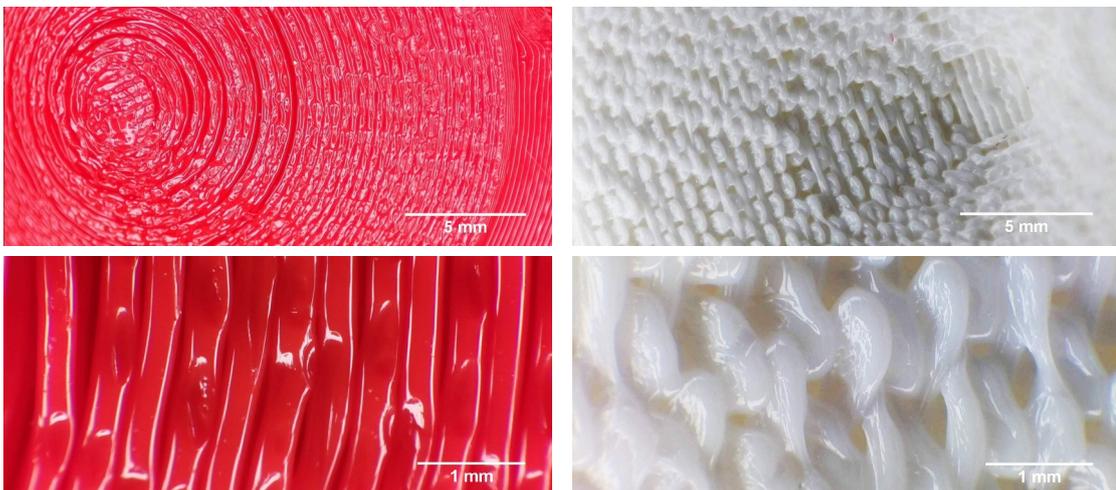


Abb. A.13: Probe Nr. 13: Haltekraft 57,7 N, Oberflächenqualität -1

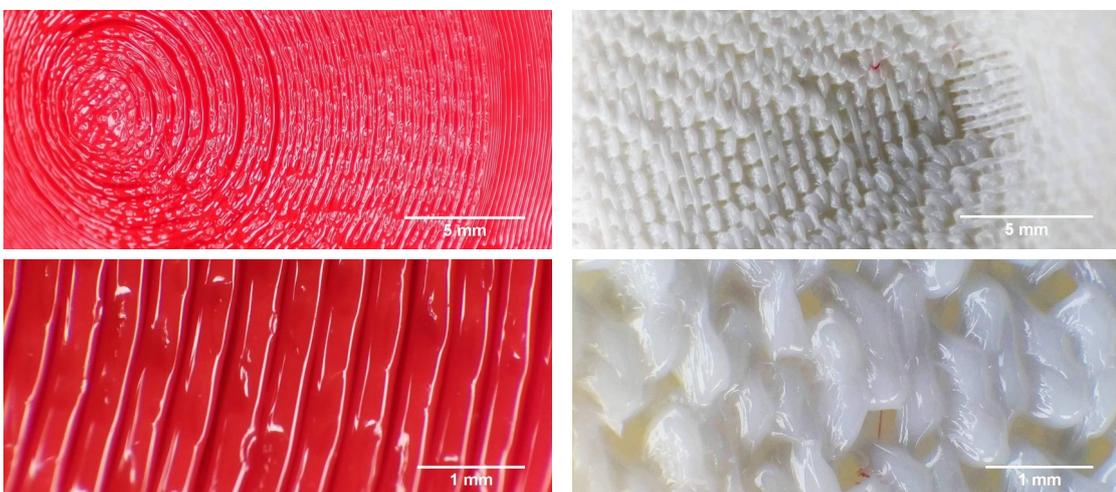


Abb. A.14: Probe Nr. 14: Haltekraft 39,5 N, Oberflächenqualität -1

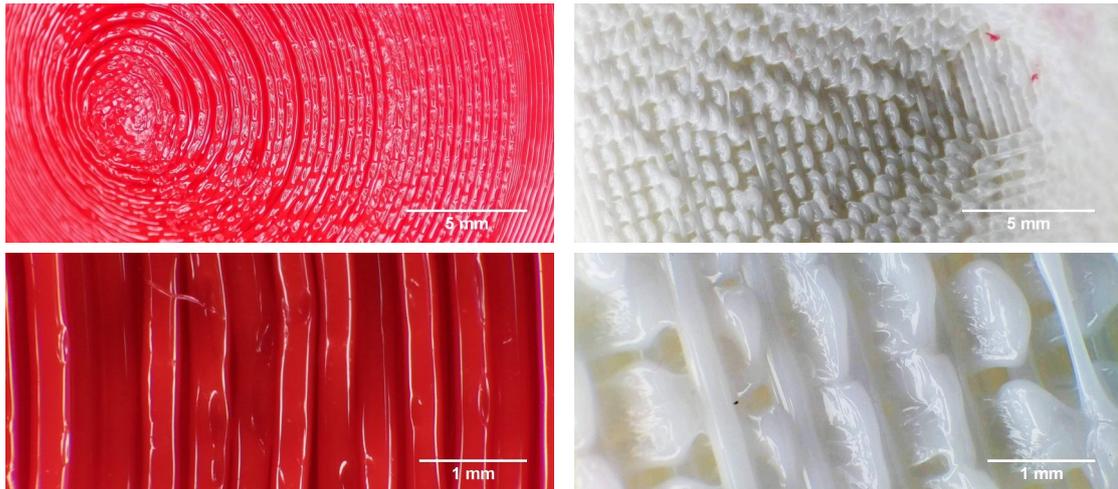


Abb. A.15: Probe Nr. 15: Haltekraft 19,1 N, Oberflächenqualität -2

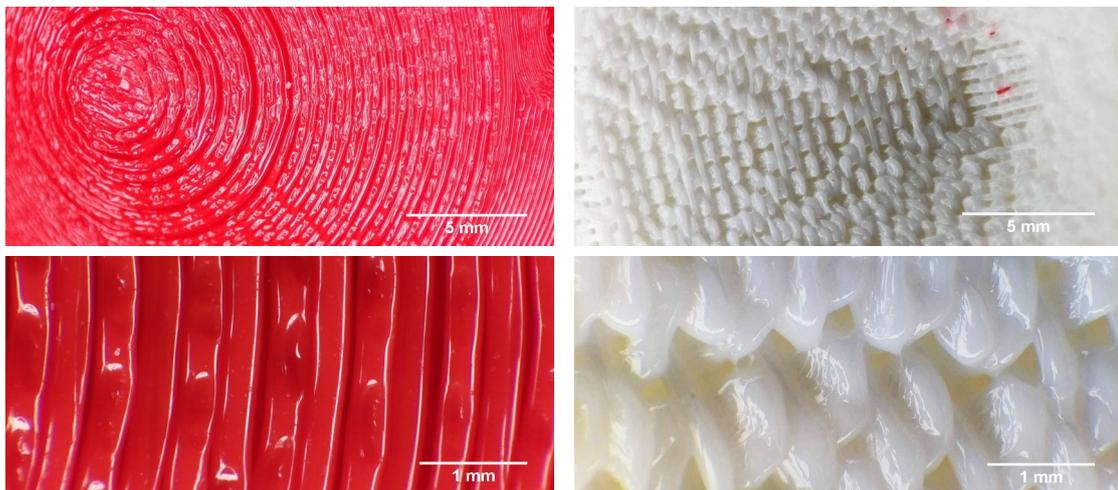


Abb. A.16: Probe Nr. 16: Haltekraft 65,4 N, Oberflächenqualität -1

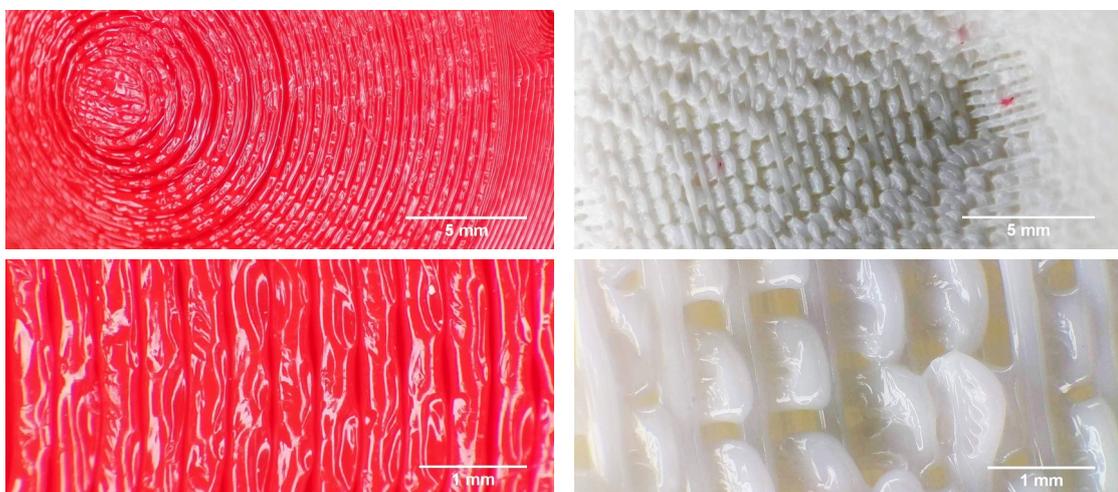


Abb. A.17: Probe Nr. 17: Haltekraft 49,2 N, Oberflächenqualität -1

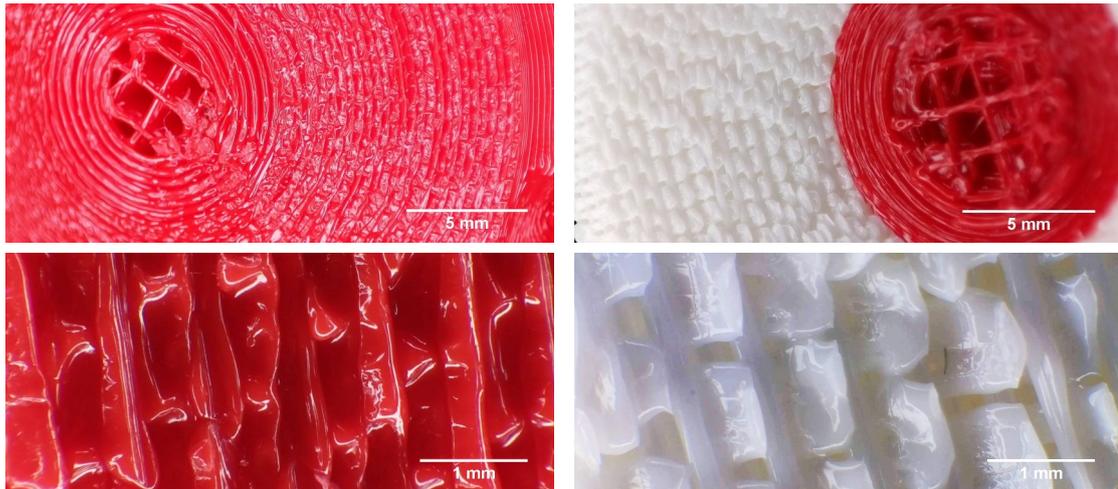


Abb. A.18: Probe Nr. 18: Haltekraft 580,3, Oberflächenqualität +2

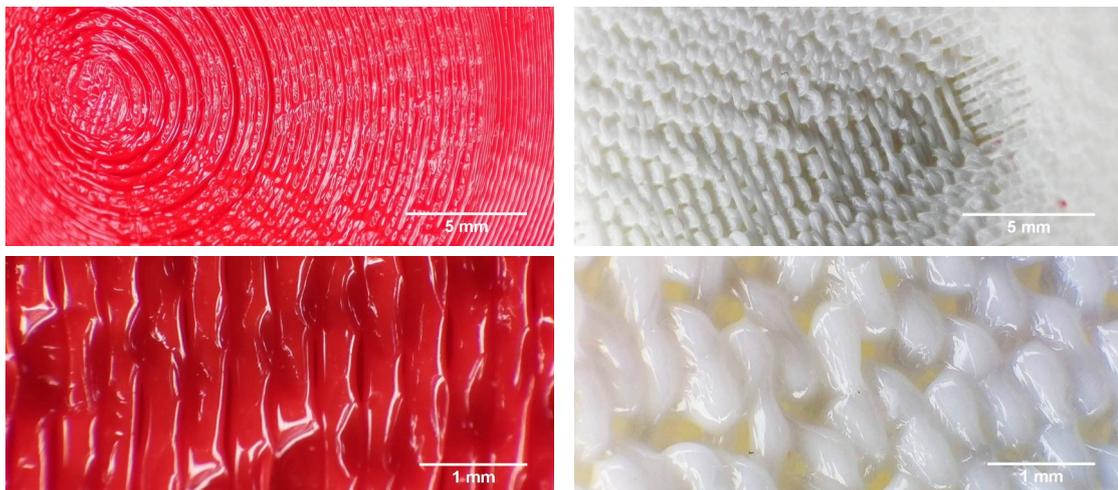


Abb. A.19: Probe Nr. 19: Haltekraft 47,0 N, Oberflächenqualität -1

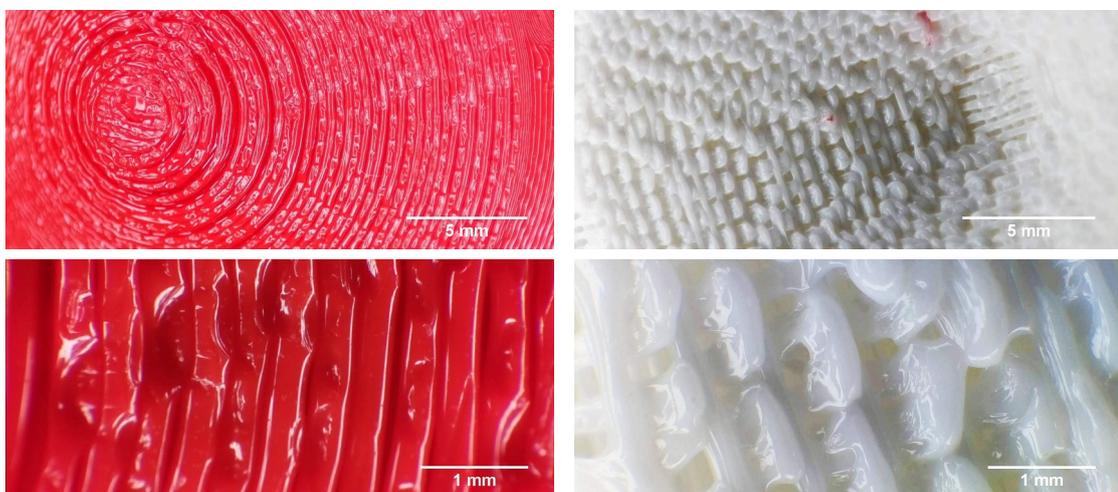


Abb. A.20: Probe Nr. 20: Haltekraft 65,5 N, Oberflächenqualität -1

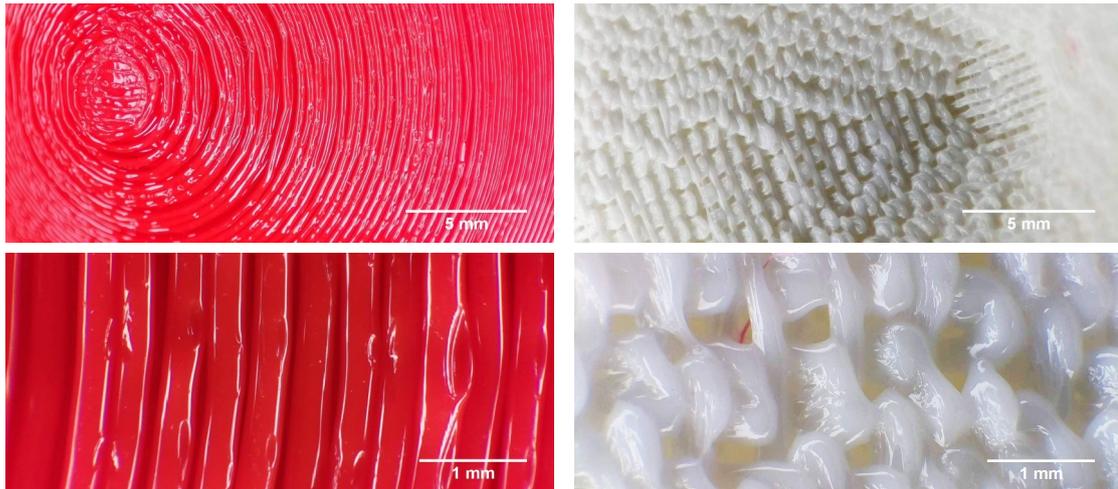


Abb. A.21: Probe Nr. 21: Haltekraft 20,0 N, Oberflächenqualität -1

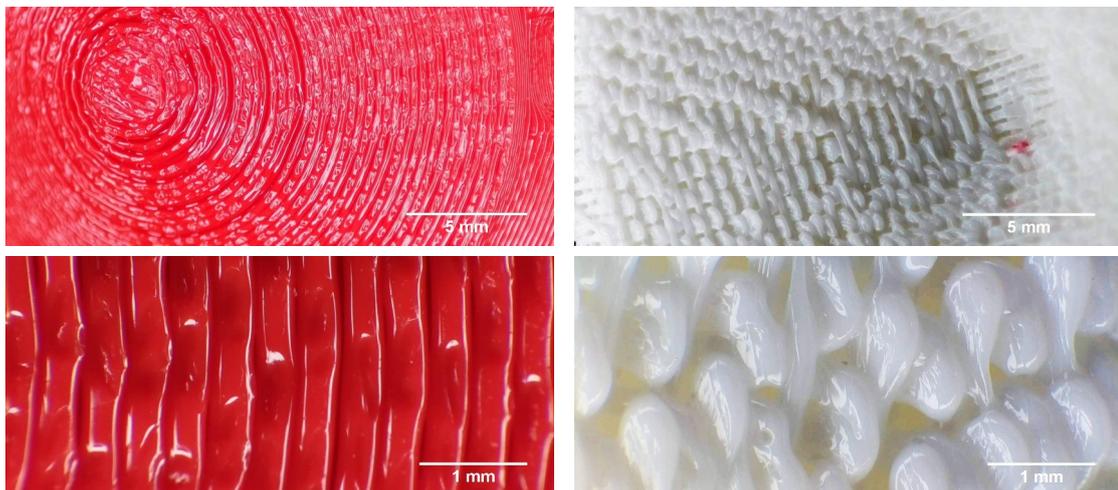


Abb. A.22: Probe Nr. 22: Haltekraft 65,6 N, Oberflächenqualität -1

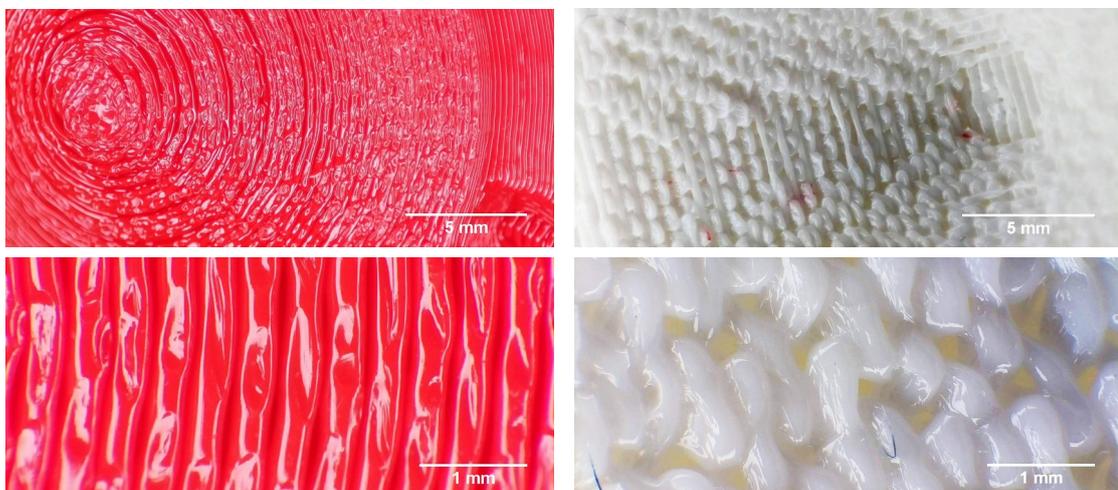


Abb. A.23: Probe Nr. 23: Haltekraft 43,7 N, Oberflächenqualität -1

A.2 Detailaufnahmen der Proben des VP 0°

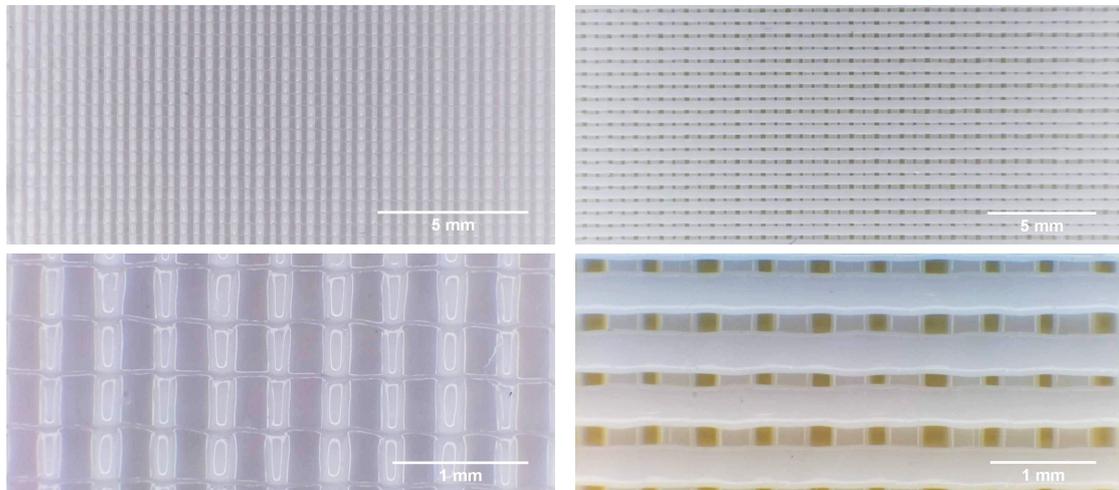


Abb. A.24: Probe Nr. 1: Haltekraft 17,1 N, Oberflächenqualität +1

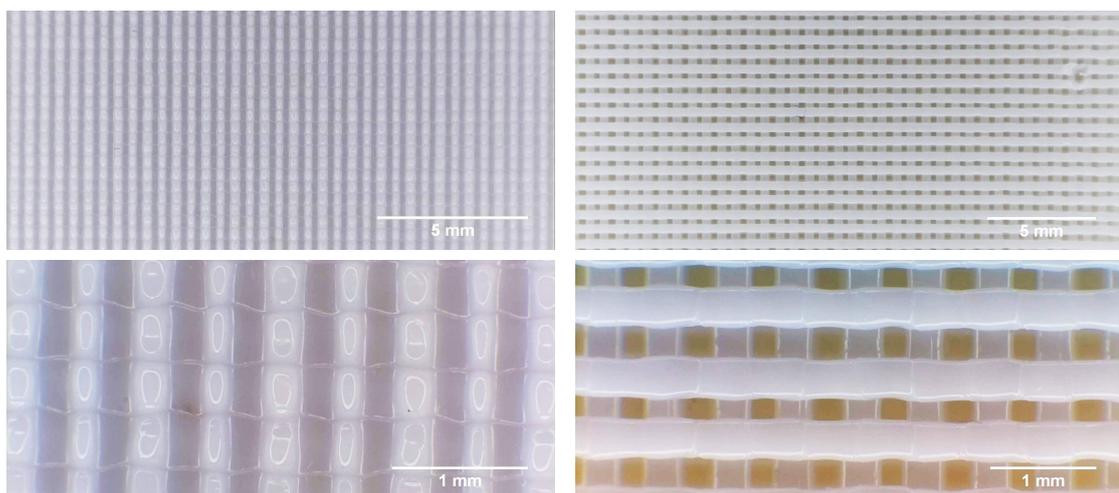


Abb. A.25: Probe Nr. 2: Haltekraft 116,9 N, Oberflächenqualität +2

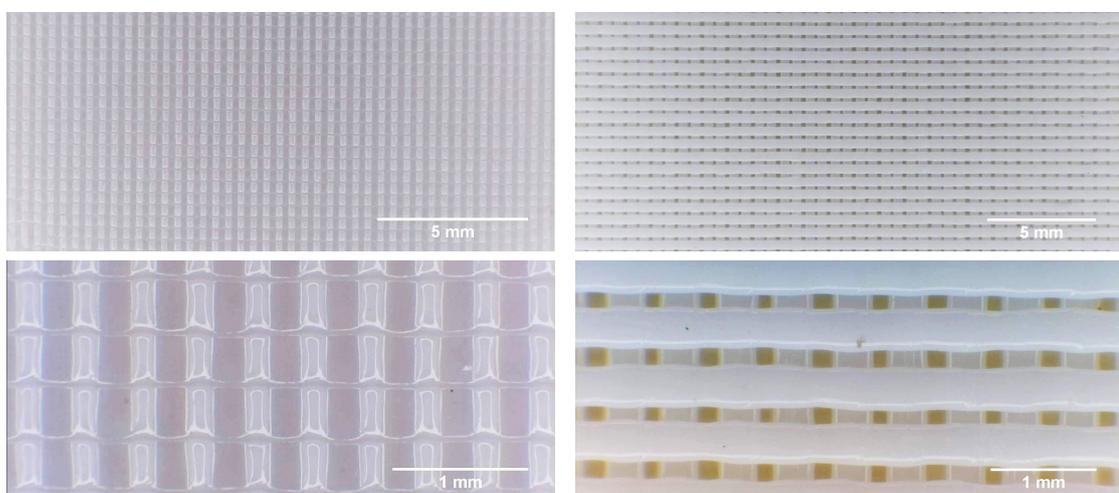


Abb. A.26: Probe Nr. 3: Haltekraft 2,8 N, Oberflächenqualität +1

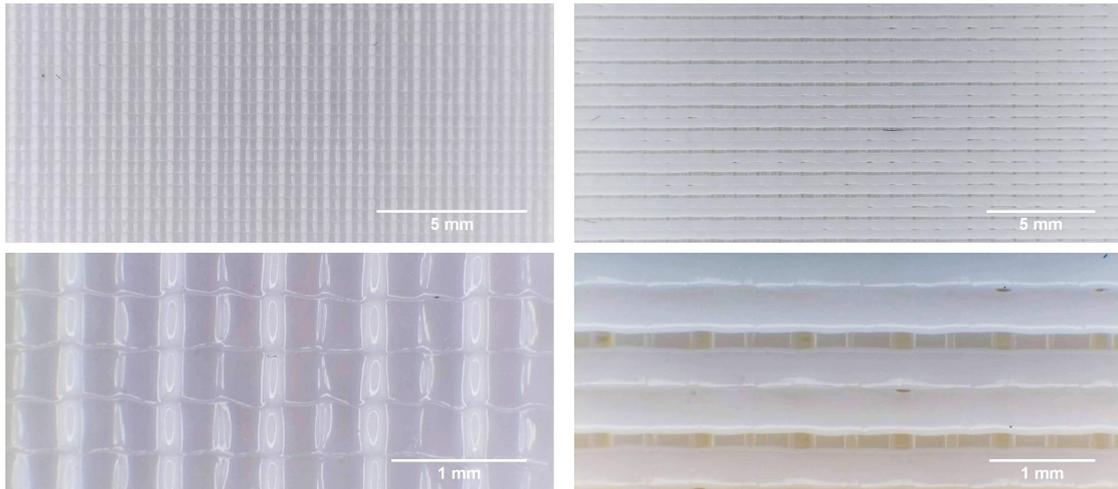


Abb. A.27: Probe Nr. 4: Haltekraft **34,9 N**, Oberflächenqualität **+1**

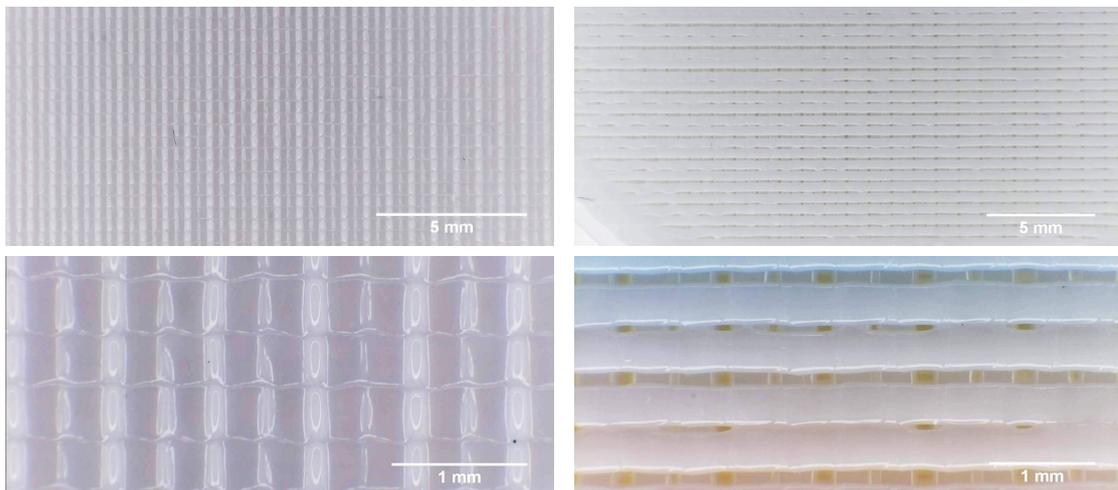


Abb. A.28: Probe Nr. 5: Haltekraft **42,7 N**, Oberflächenqualität **+1**

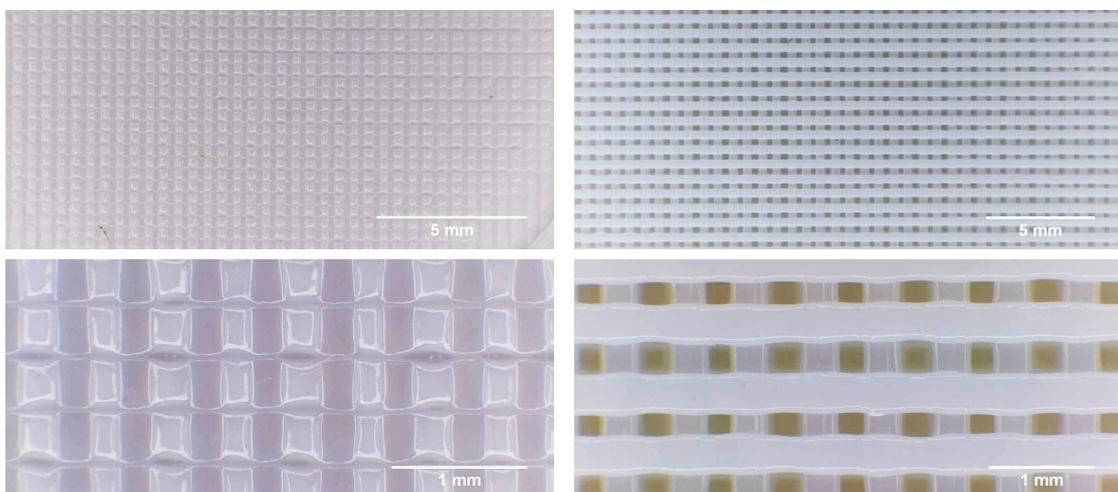


Abb. A.29: Probe Nr. 6: Haltekraft **7,4 N**, Oberflächenqualität **-1**

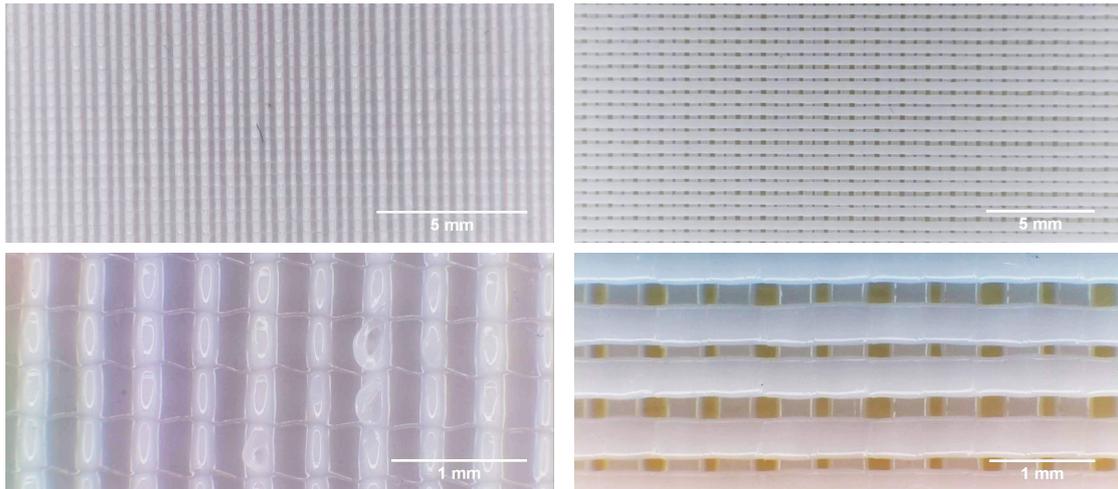


Abb. A.30: Probe Nr. 7: Haltekraft **158,3 N**, Oberflächenqualität **+2**

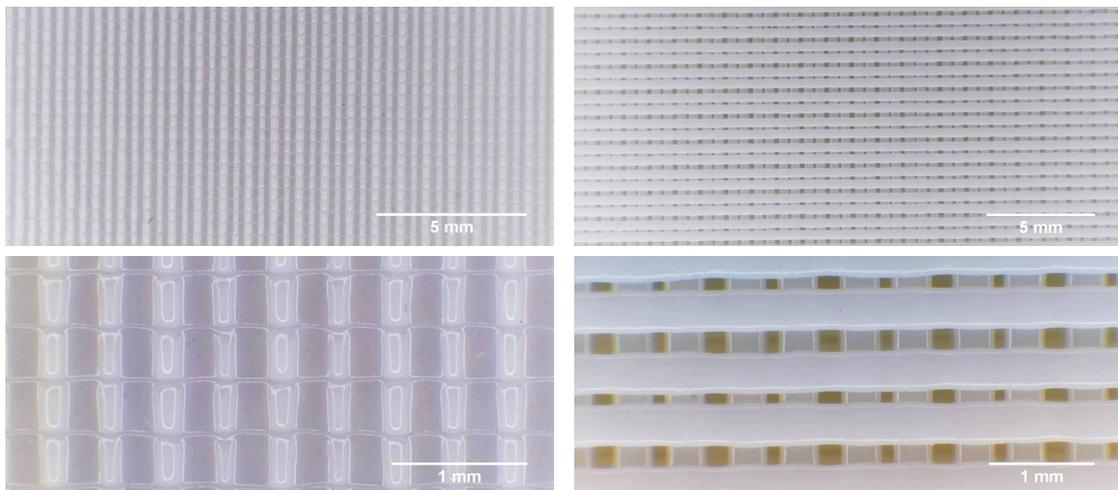


Abb. A.31: Probe Nr. 8: Haltekraft **24,1 N**, Oberflächenqualität **+1**

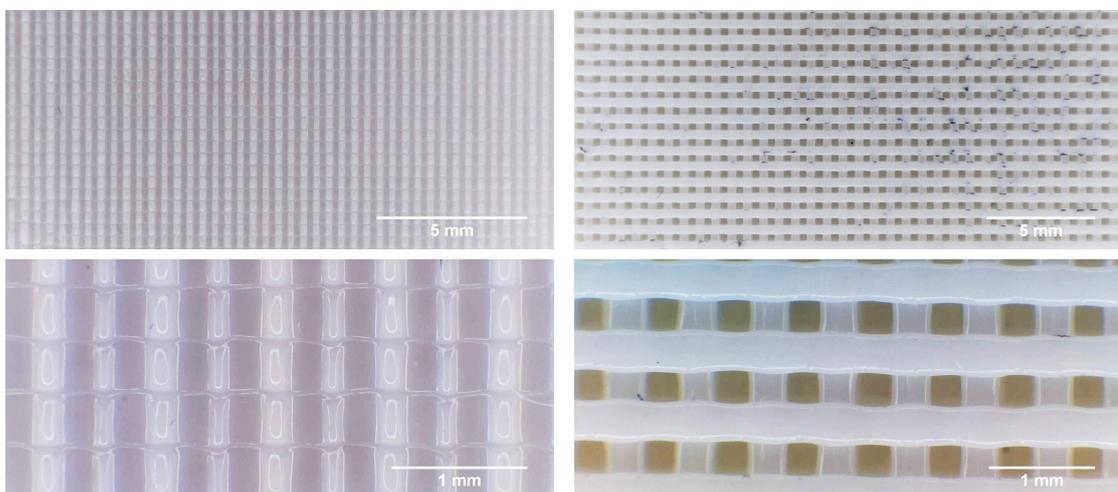


Abb. A.32: Probe Nr. 9: Haltekraft **27,1 N**, Oberflächenqualität **+1**

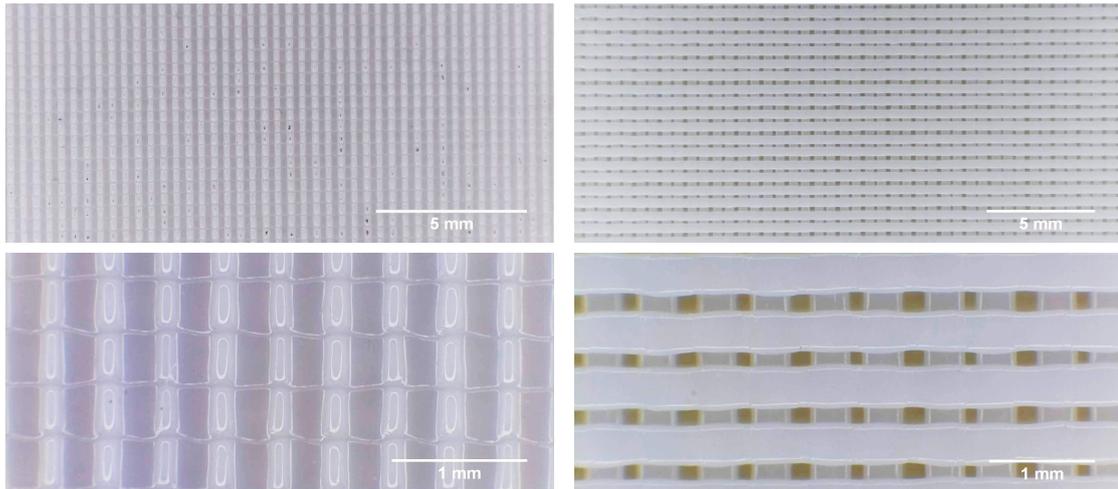


Abb. A.33: Probe Nr. 10: Haltekraft 24,1 N, Oberflächenqualität +1

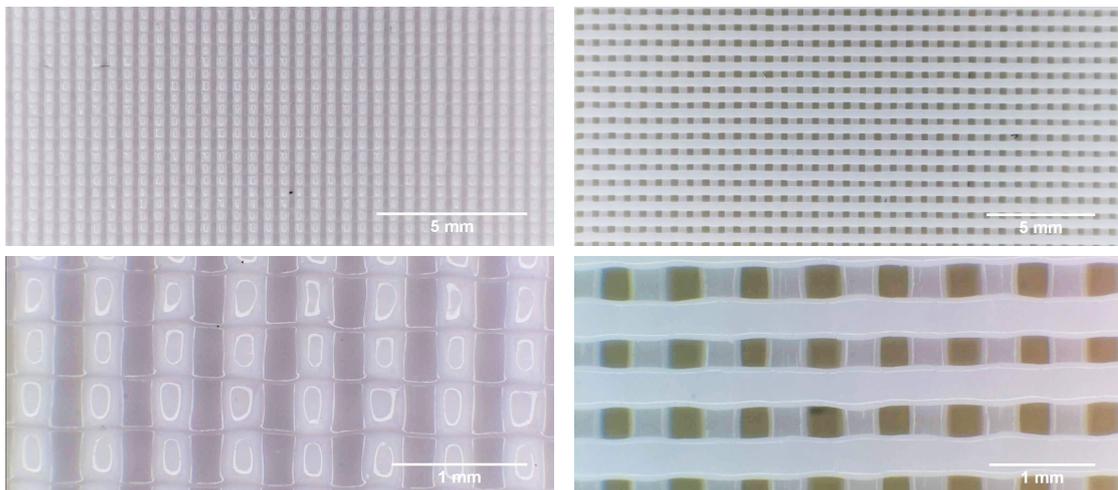


Abb. A.34: Probe Nr. 11: Haltekraft 29,2 N, Oberflächenqualität +1

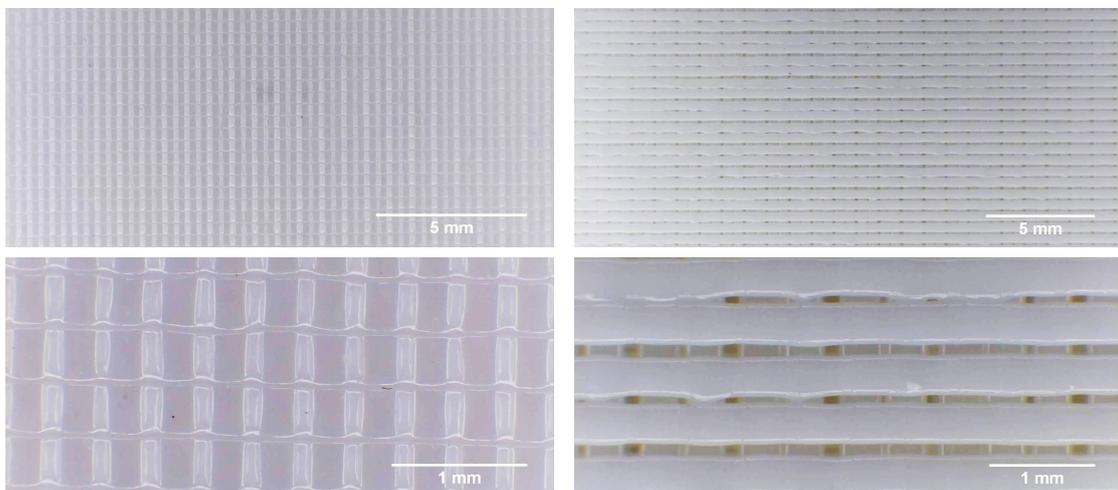


Abb. A.35: Probe Nr. 12: Haltekraft 11,9 N, Oberflächenqualität +1

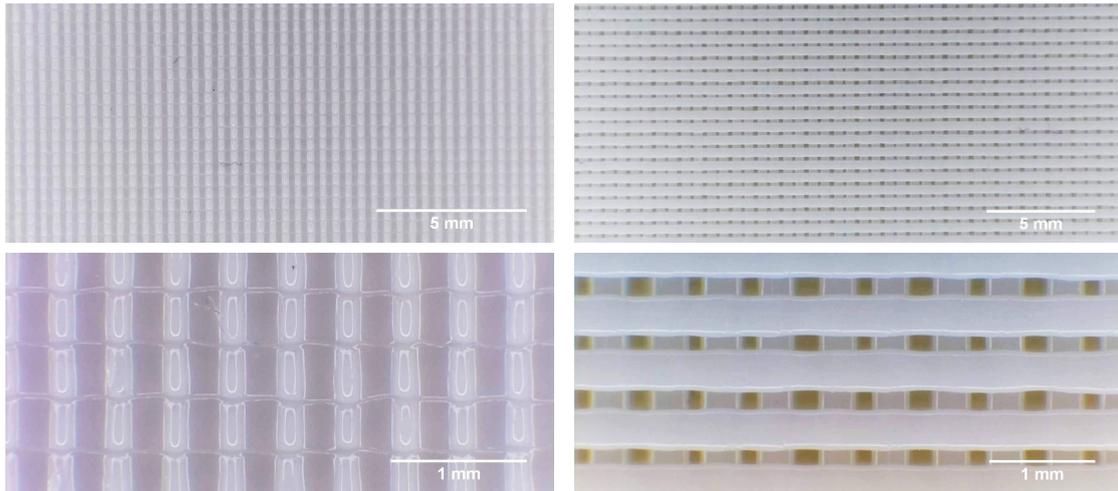


Abb. A.36: Probe Nr. 13: Haltekraft 21,1 N, Oberflächenqualität +1

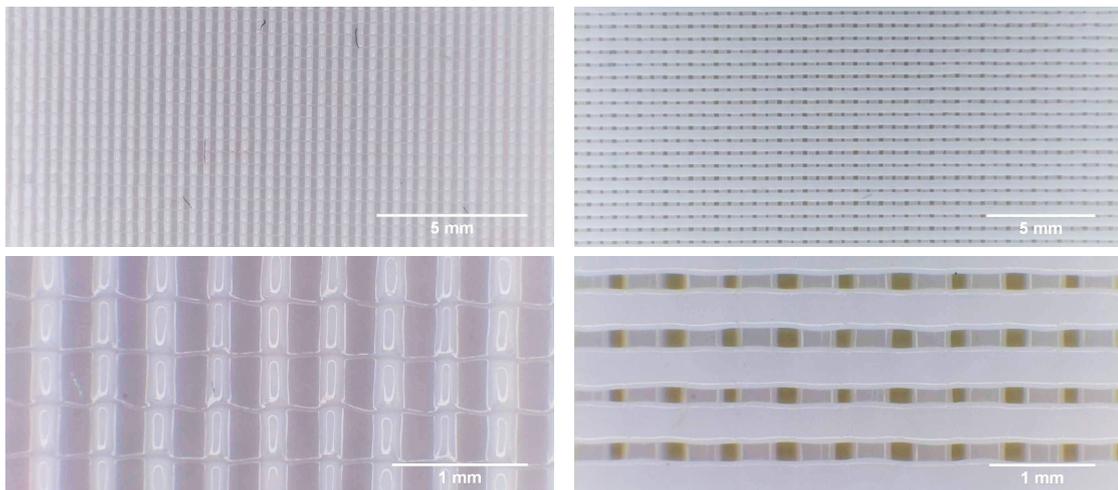


Abb. A.37: Probe Nr. 14: Haltekraft 19,9 N, Oberflächenqualität +1

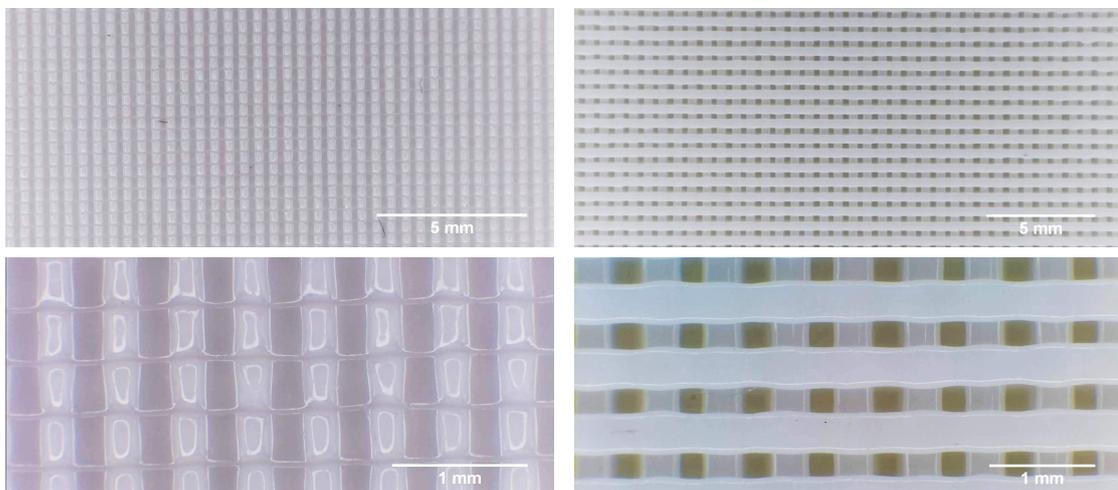


Abb. A.38: Probe Nr. 15: Haltekraft 14,8 N, Oberflächenqualität +1

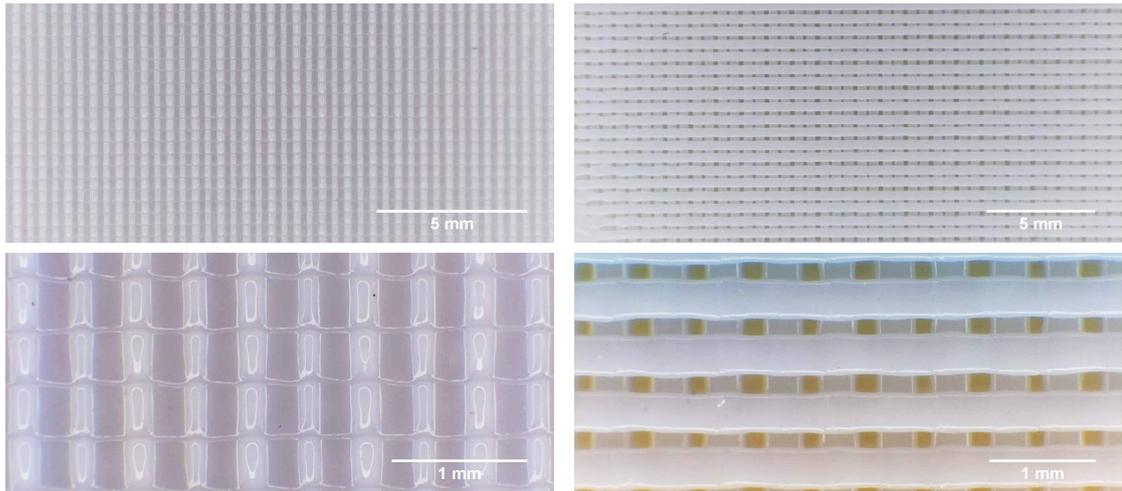


Abb. A.39: Probe Nr. 16: Haltekraft 37,7 N, Oberflächenqualität +1

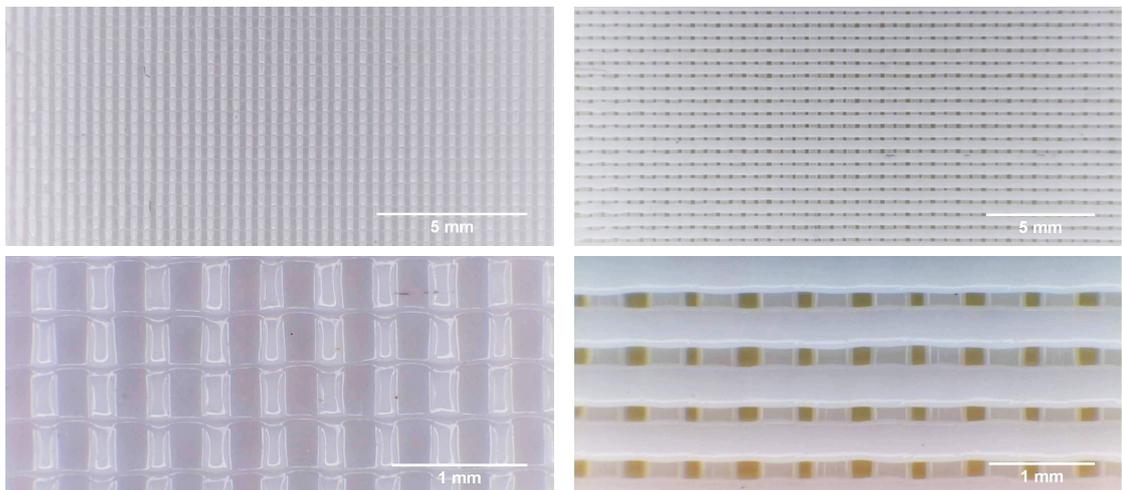


Abb. A.40: Probe Nr. 17: Haltekraft 14,4 N, Oberflächenqualität +1

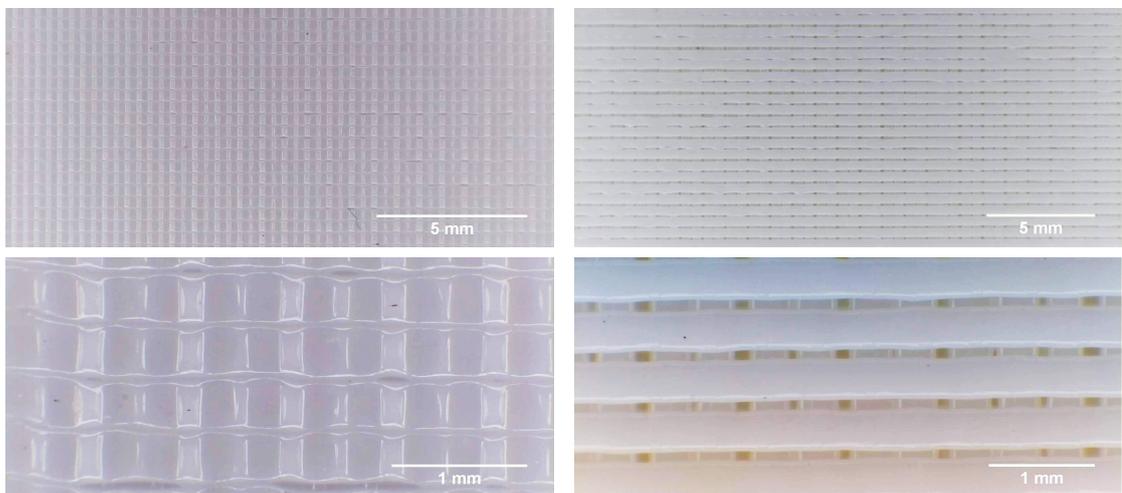


Abb. A.41: Probe Nr. 18: Haltekraft 5,0 N, Oberflächenqualität -1

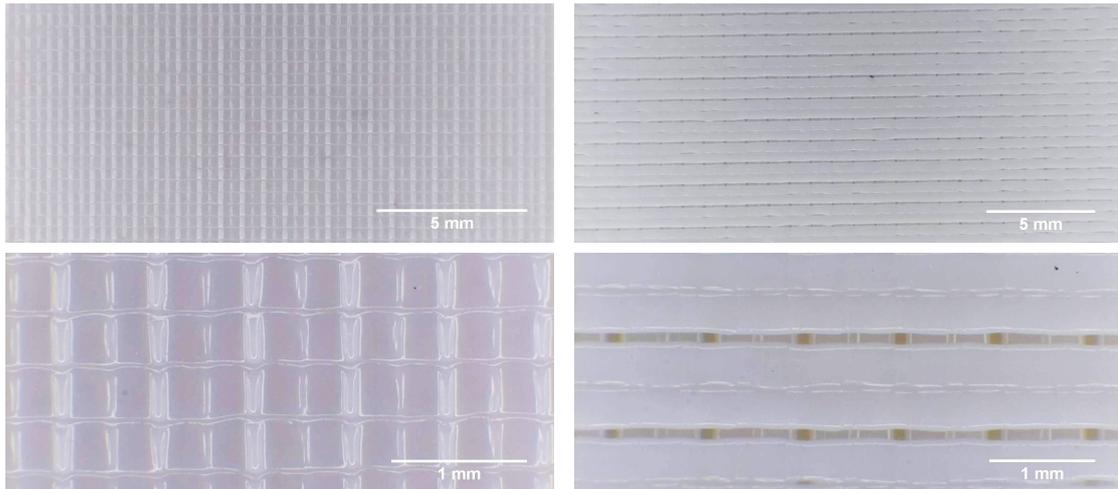


Abb. A.42: Probe Nr. 19: Haltekraft 15,6 N, Oberflächenqualität +1

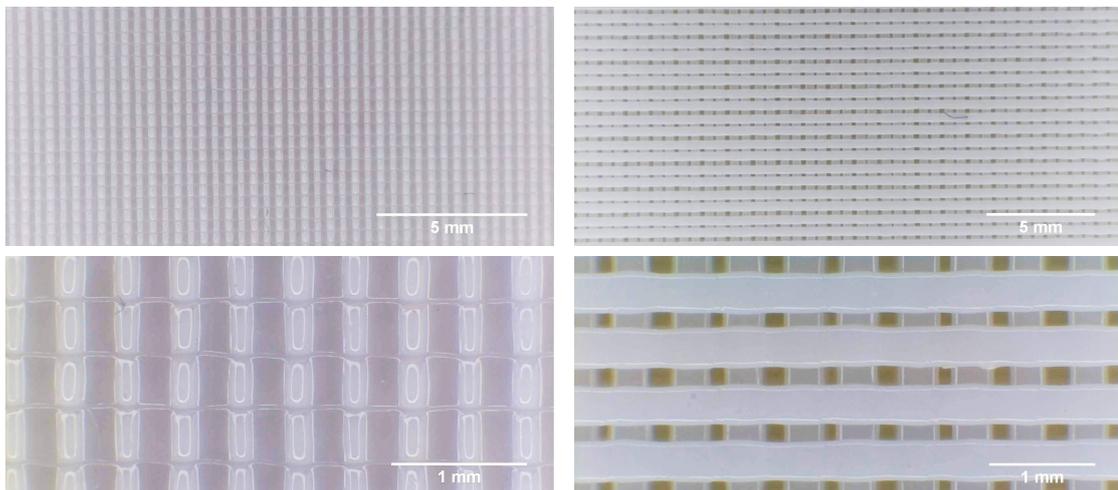


Abb. A.43: Probe Nr. 20: Haltekraft 34,8 N, Oberflächenqualität +1

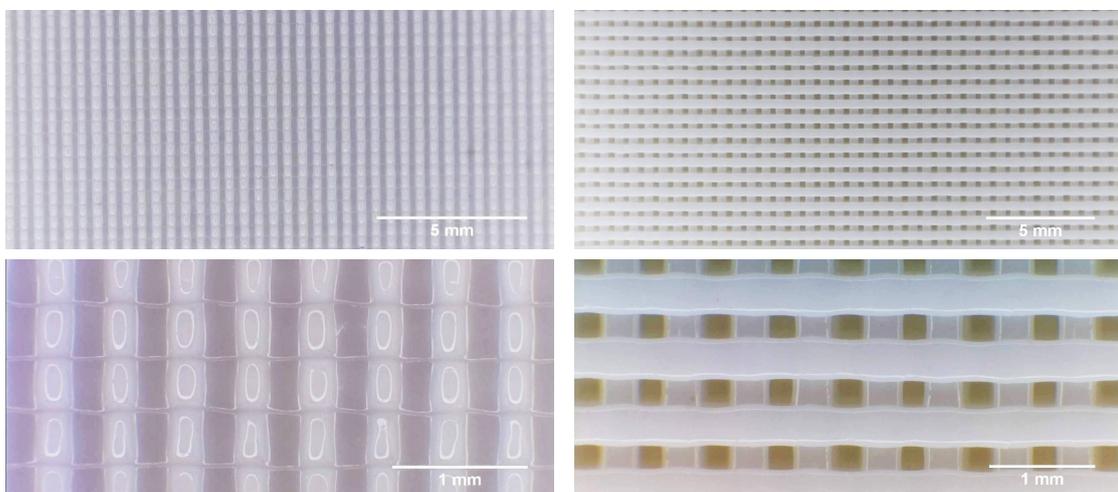


Abb. A.44: Probe Nr. 21: Haltekraft 56,5 N, Oberflächenqualität +1

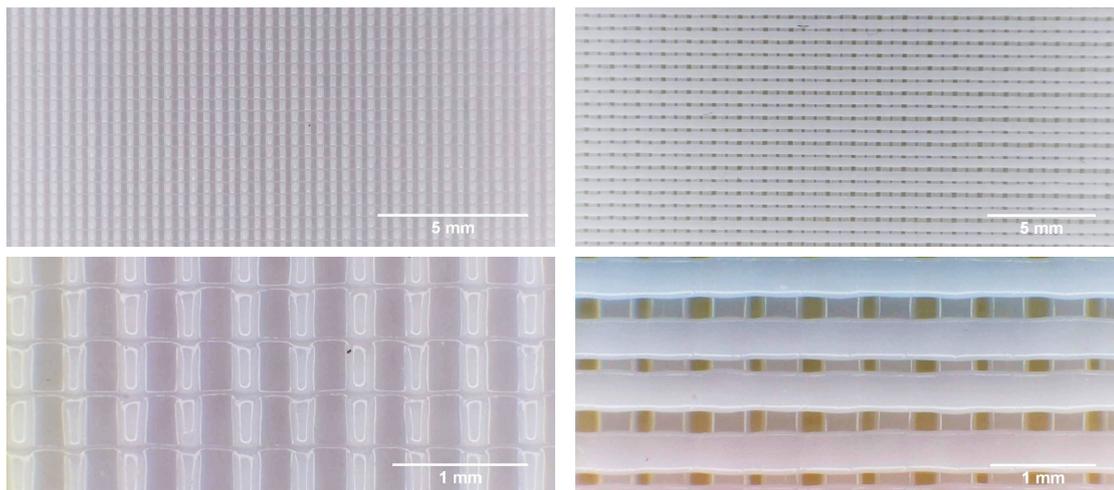


Abb. A.45: Probe Nr. 22: Haltekraft 21,9 N, Oberflächenqualität +1

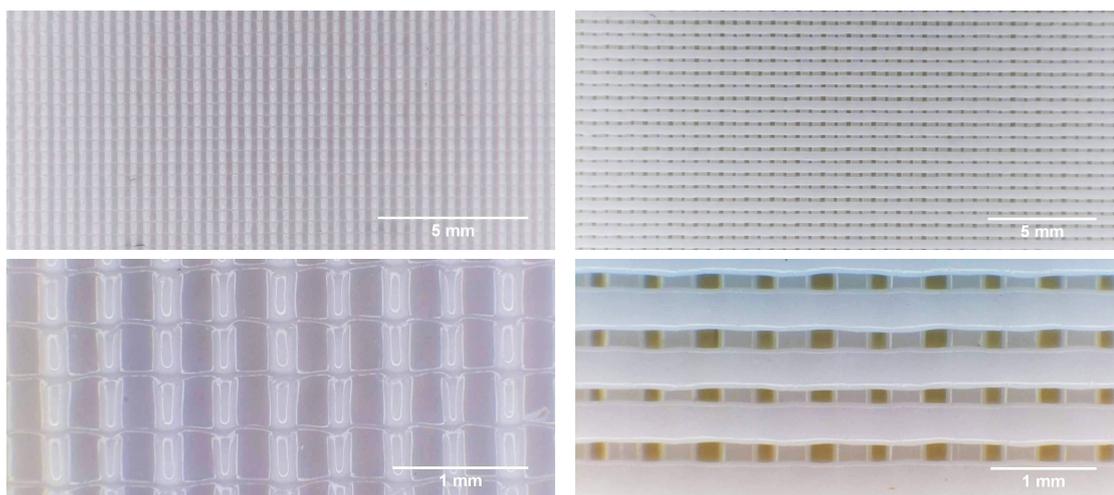


Abb. A.46: Probe Nr. 23: Haltekraft 40,5 N, Oberflächenqualität +1

A.3 Strukturformeln für auflösbares Stützmaterial

Stratasys Materials	Chemical Name	CAS-No	Weight %
SR-30™ / SR-30XL™ Soluble Support Material	2-Propenoic acid, 2-methyl-, polymer with butyl 2-propenoate and <u>ethenylbenzene</u> $\left\{ \text{H}_2\text{C} - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{COOH}}{\text{C}}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{O}=\overset{\text{O}}{\text{C}}}{\text{CH}} - \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{Ph}}{\text{C}}} \right\}_n$ $\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	25036-16-2	80-90
SR-100™ / SR-110™ Soluble Support Material	2-Propenoic acid, 2-methyl-, polymer with methyl 2-methyl-2-propenoate $\left\{ \text{H}_2\text{C} - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{COOH}}{\text{C}}} - \text{CH}_2 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O}=\overset{\text{O}}{\text{C}}}{\text{C}}} \right\}_n$ OCH_3	25086-15-1	60-70
ABS-M30™ Model Material	ABS resin chemical structure: $\left\{ \text{H}_2\text{C} - \overset{\text{CN}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \text{CH}=\text{CH} - \text{CH}_2 - \overset{\text{Ph}}{\text{CH}_2} \right\}_n$	9003-56-9	>96
PC-10™ Model Material	Polycarbonate chemical structure: $\left\{ \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} \right\}_n$	25037-45-0	>96
FDM™ Nylon 12 Model Material	Polyamide 12 chemical structure: $\left\{ \text{NH} - (\text{CH}_2)_{11} - \text{CO} \right\}_n$	-	-
P400-SC Waterworks Soluble Concentrate	Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃)	497-19-8	60-70
	Sodium hydroxide (NaOH)	1310-73-2	20-30
	Sodium lauryl sulfate (C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na)	151-21-3	1-5
	Sodium metasilicate (Na ₂ SiO ₃)	6834-92-0	1-5

Abb. A.47: Chemischer Aufbau ausgewählter Druck- und Stützmaterialien [Jia16]