



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich
Agrarwirtschaft & Lebensmittelwissenschaften

OPTIMIERUNG DER HANDHABUNG UND FUNKTIONALITÄT DES FOODPRINT^{3D}-EXTRUDERS

Masterthesis

zur Erlangung des akademischen Grades

„Master of Science“ (M.Sc.)

Eingereicht von : Reinhard Pfister

Betreuer : Prof. Dr. Siegfried Bolenz
M. Eng. Martin Kiskemper

Tag der Einreichung : 15.06.2017

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2016-0578-3

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den vielen Personen meinen Dank aussprechen, die mich im Zuge dieser Arbeit unterstützten. Meinen Betreuern Prof. Dr. Siegfried Bolenz und M. Eng. Martin Kiskemper, die mir bei der Bearbeitung der breitgefächerten Themen immer zur Seite standen. Tobias Franke und Robert Kaiser, die mit ihrer Vor- und Zuarbeit entscheidend beigetragen haben. Rolf Kretzschmar und Sebastian Geschwind, ohne die die Konstruktion des Lebensmittelextruders nicht möglich gewesen wäre. Den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachbereiches Lebensmitteltechnologie, die mir eine Labornutzung über das normale Maß hinaus ermöglichten und immer Gehör für neue Problemstellungen hatten.

Meiner Familie für ihre unschätzbare Unterstützung.

Erklärung über selbstständige Arbeit

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist und ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Textstellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen zitiert wurden, sind durch Zitate als solche gekennzeichnet.

Ich erkläre weiterhin, dass die abgegebene digitale Version mit der eingereichten schriftlichen Arbeit übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift

I. Glossar

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol. Dieses Polymer ist im Vergleich zu → PLA fester, hitze- und lösungsmittelbeständiger. Bei der Verarbeitung entsteht ein unangenehmer Geruch. Dieser Kunststoff neigt zum → Warping, und erfordert höhere Drucktemperaturen. Objekte aus ABS können zum Glätten mit Aceton behandelt werden.
Blender Unit	Die Standard Maßeinheit in der Software Blender. Diese kann programmintern in verschiedene Einheiten (Metrisch, Zoll) umgerechnet werden.
Bridging	Das → Filament überspannt einen Raum, ohne direkten Kontakt zu einer unteren Fläche.
Brim / Skirt	Um das Modell wird ein „Rahmen“ gedruckt, um Warping zu verhindern und die Druckeinstellung zu überprüfen.
Blue Tape	Ein Klebeband, das die Haftung des Kunststoffes auf dem Druckbett erhöht.
Buildvolumen	Das Druckvolumen eines 3D-Druckers, welches für die Objektgenerierung genutzt werden kann. Wird über die Multiplikation der X-,Y- und Z-Achsenlänge errechnet.
Druckbett	Eine unter Umständen beheizbare Fläche auf der Gedruckt wird.
Druckgeschwindigkeit	Die Geschwindigkeit in mm / min in der das Modell erstellt wird. Diese ist mit der Materialextrusion gekoppelt.
CAD	Computer-Aided-Design. Computer gestützte Modellerstellung.
Endstop	Ein „Schalter“, der weitere Bewegung der betreffenden Achse in Richtung des Stopps verhindert.
Extruder	Befördert Material in / durch eine Düse. Der Vorgang wird als Extrusion bezeichnet.
Extrudereinheit	Aufbau aus: Filamentführung, Extruder, Düse und → Thermistorwürfel / Hotend.

Glossar

Extrusionsmultiplier	Steuert die Materialextrusion relativ zur definierten Extrusionsgeschwindigkeit
Extrusions-Schichtbreite	Die Dicke eines aus der Düse extrudierten Filamentstranges. Die Auslegung dieses Parameters sollte sich am vorliegenden Düsendurchmesser orientieren.
FDM	„Fused Deposition Modeling“ bezeichnet ein Verfahren, welches schmelzfähiges Material in Schichten ausgibt, um ein 3D-Modell zu erschaffen. Der Ausdruck ist eine geschützte Marke der Firma Stratasys.
FFF	„Fused Filament Fabrication“ eine Alternativbezeichnung für das FDM-Verfahren.
FLM	„Fused Layer Modeling“ eine Alternativbezeichnung für das FDM-Verfahren.
Filament	Schmelzfähiges Material.
Füllung / Infill	Im Inneren eines Objektes wird ein Muster gedruckt, das einen definierten Hohlraum erzeugt. Die Art des Musters und die Größe des Hohlraumes werden vor dem → Slicen definiert.
G-Code	Generic Code. Eine genormte Aneinanderreihung von Befehlen (Position, Temperatur, Extrusion) an den 3D-Drucker.
Hotend / Thermistorwürfel	Bauteil, welches die benötigte Temperatur zur Schmelzung des Filaments in der Düse liefert.
Layer (height) bzw. Schichthöhe	Die beim Slicen definierte Höhe der einzelnen Schichten, aus denen das Objekt aufgebaut wird.
PLA	Polylactid / umgangssprachlich Polymilchsäure, Kunststoff, der bei niedrigen Temperaturen schmilzt und biologisch abbaubar ist.
PLAHT	Hochtemperaturbeständiges PLA
Perimeter Shells bzw. äußere Verschalung	Die Anzahl der Filamentstränge auf einer Schicht, welche die Wandstärke eines Objektes ergibt.

Glossar

Slicen	Das Objekt wird horizontal in Scheiben geschnitten. Die einzelnen Scheiben werden dann durch eine Befehlsreihenfolge ausgedrückt.
Skalieren	Bezeichnet hier das Verändern der Größe eines CAD-Modells, ohne dass zusätzliche Flächen erzeugt werden.
STL	Surface Tessellation Language, Standard Transformation Language, Standard Triangulation Language
Support bzw. Stützstruktur	Eine Struktur, die zusätzlich in das Modell eingebaut wird, um Überhänge zu stützen.
THF	Tetrahydrofuran. Chemikalie die im 3D-Druck für die Nachbehandlung von Objekten eingesetzt wird. Kann bei PLA bzw. PLAHT zur Oberflächenglättung eingesetzt werden.
Top / Bottom Solid Layer	Schichten am Ende bzw. Anfang eines Bauteiles, die solide gedruckt werden.
Warping	Die auf dem Druckbett liegende Fläche eines Bauteiles verzieht sich durch thermische Spannung. Dadurch wölbt sich die Fläche an den Rändern.

Inhaltsverzeichnis

I.	Glossar	i
1.	Einleitung.....	1
2.	Stand der Wissenschaft und Technik	2
2.1	Grundlagen des 3D-Drucks	2
2.1.1	Erstellung des CAD-Modells	3
2.1.2	Modell Translation (STL-File).....	5
2.1.3	Hostprogramm / Slicen	8
2.2	FLM Verfahren.....	11
2.3	Lebensmittelapplikationen	15
2.4	Systembeschreibung	17
2.4.1	Multirap M420	18
2.4.2	Das Projekt FoodPrint ^{3D}	21
2.4.3	Software und Kompatibilität	25
3.	Material und Methoden.....	28
3.1	Material.....	28
3.1.1	Software.....	28
3.1.2	3D-Drucker allgemein	28
3.1.3	FoodPrint ^{3D} Extruder.....	29
3.1.4	Druckmassenherstellung.....	29
3.1.5	Messgeräte	29
3.1.6	Raumkühlung.....	30
3.2	FLM Versuchsplanung und Durchführung	31
3.2.1	Größenabweichung PLAHT	31
3.2.2	Generierung solider Objekte	33
3.2.3	Wasserdichtigkeit des Doppelmantelzylinders	35

Inhaltsverzeichnis

3.2.4	Bauteilgenerierung der FoodPrint ^{3D} Applikation.....	37
3.2.5	Nachbearbeitung.....	37
3.3	Lebensmitteldruck Versuchsplanung und Durchführung	38
3.3.1	Herstellung der Druckmasse.....	38
3.3.2	Maximale Viskosität der Druckmasse	39
3.3.3	Untergrundbeschichtung	40
3.3.4	Detailgrad und Bauteilauslegung	41
3.4	Konstruktion der Raumkühlung	42
3.5	Anpassung der Firmware	44
3.6	Troubleshooting.....	44
4.	Ergebnisse und Auswertung.....	45
4.1	Kunststoff (FLM).....	45
4.1.1	Größenabweichung PLAHT	45
4.1.2	Generierung solider Objekte	54
4.1.3	Wasserdichtigkeit des Doppelmantelzylinders	58
4.1.4	Bauteilgenerierung der FoodPrint ^{3D} Applikation.....	65
4.1.5	Nachbearbeitung.....	70
4.2	Ergebnisse und Auswertung FoodPrint ^{3D}	72
4.2.1	Herstellung der Druckmasse.....	72
4.2.2	Maximale Viskosität der Druckmasse	73
4.2.3	Untergrund Beschichtung.....	75
4.2.4	Detailgrad und Bauteilauslegung	77
4.3	Konstruktion der Raumkühlung	81
4.4	Anpassung der Firmware	83
4.5	Troubleshooting.....	85
4.6	Anregungen für zukünftige Arbeiten	91
4.6.1	Fördersystem	91

Inhaltsverzeichnis

4.6.2	Lebensmittelmodelle	94
5.	Zusammenfassung	96
6.	Abstract	97
7.	Verzeichnisse	98
7.1	Abbildungsverzeichnis	98
7.2	Tabellenverzeichnis	100
7.3	Quellen	101
7.4	Bildquellen	104
Anhang:	106
I.	Maßabweichung gemessene Relativabweichung.....	106

1. Einleitung

3D-Druck bietet einzigartige Möglichkeiten der Bauteilgenerierung, wobei verschiedenste Verfahren zur Verfügung stehen. Die Entwicklungen in diesem Bereich ermöglichen den Einsatz einer Vielzahl von Materialien für nahezu jeden Verwendungszweck. Die Ansprüche an ein Bauteil bedingen dabei oft die Wahl des Verwendung findenden Systems. Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren können kürzere Produkterschaffungszyklen realisiert und Prototypen schneller erprobt werden. Die Reize dieses Verfahrens führten zur Erweiterung der Einsatzgebiete von der fertigenden Industrie über die Medizin bis zur Nahrungs- und Genussmittelindustrie.

Der generelle Trend geht von der Prototypengenerierung hin zur individuellen Fertigung. Hierbei können Dienstleistungen angeboten werden, die es ermöglichen die Wünsche der Konsumenten zeitnah zu verwirklichen. So können verschiedenste Formen selbst designt, produziert und vielleicht bald konsumiert werden. Auch bietet 3D-Druck ein Alleinstellungsmerkmal für Gastronomiebetriebe. Die individuelle Formgebung besitzt das Potential, eine neue Form der kundenorientierten Werbung zu ermöglichen.

Der relativ neue Einzug des 3D-Drucks in den Lebensmittelsektor erfordert weitere Entwicklungen an den bisherigen 3D-Systemen. Das Projekt FoodPrint^{3D} beschäftigt sich mit der Erschaffung eines Lebensmittelextruders für viskose Nahrungsmittel. Ein Fokus des Projektes war die Anpassung eines herkömmlichen 3D-Druckers für den Lebensmitteldruck. Diese sollte möglichst auch von Interessenten nachvollzogen werden können. Gleichzeitig sollte die Möglichkeit einer kontinuierlichen Förderung der Druckmasse gegeben werden. Ein solches System konnte von Tobias Franke (2016) erfolgreich aufgebaut werden.

Der Fokus dieser Masterarbeit liegt auf der Optimierung und Weiterentwicklung des zuvor erwähnten Systems. Unter anderem sollen die für den Druck anzupassenden Parameter für ein in Kooperation mit einer anderen Arbeit¹ hergestelltes Lebensmittel untersucht werden. Ferner soll die Funktionsweise optimiert werden, um die Nutzung des Systems ohne zeitlich intensive Einarbeitung zu ermöglichen.

¹ (Kaiser, Development of fast solidifying food mixture for 3D-printing (Fortsetzung), 2016)

2. Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlagen des 3D-Drucks

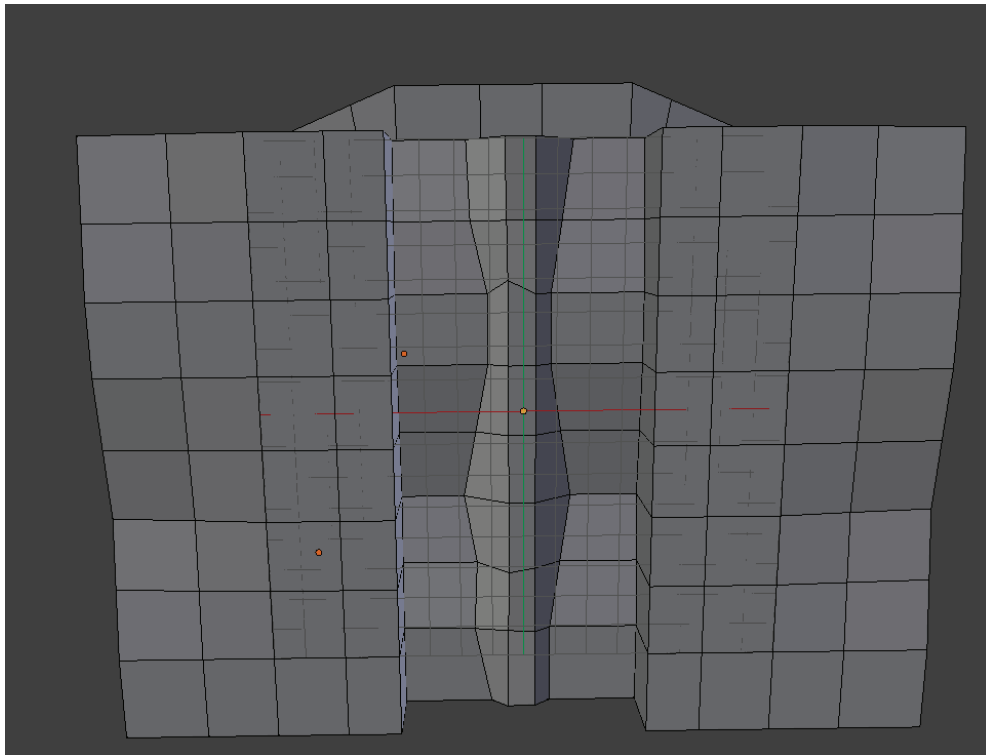
In den letzten Jahren erlebte der 3D-Druck einen Boom, in industrieller sowie privater Nutzbarkeit. Die Anfänge, in denen dieses Gebiet vornehmlich von Bastlern und technikversierten Enthusiasten dominiert wurde, haben sich zu einem medial beworbenen Thema für jedermann entwickelt. Kleinere Firmen und Hobbyisten können ihre Visionen in unterschiedlichsten Materialien online oder in größeren Städten direkt bei Druckshops verwirklichen lassen.

Insbesondere die Einsatzgebiete erfuhren schnelle Erweiterung. Ausgehend vom Gebiet des Prototypenbaus, werden laufend neue Fachgebiete erschlossen. Von der „Revolution“ der Medizintechnik, die daran arbeitet, organische Materialien oder Implantate direkt zu drucken (Gröneweg, 2016) bis zum Drucken von Bauteilen in der fertigen Industrie finden sich zahllose Beispiele. Die Luftfahrtindustrie stellte auf der „Internationalen Luft- und Raumfahrttausstellung Berlin“ 2016 den Prototypen „Thor“ vor, der nahezu komplett aus gedruckten Teilen besteht (Pluta, 2016). Die Automobilindustrie konnte durch kürzere Produkt-Entwicklungsphasen die Zeit bis zur Markteinführung ihrer Produkte stark verkürzen (voxeljet AG, 2017). Auch in der Militärtechnik finden sich 3D gedruckte Teile wieder (Grund, 2015).

3D-Druck wird in der Industrie zur Herstellung von Modellen, Mustern und insbesondere Prototypen eingesetzt. Hierbei wird zunächst eine digitale Version des zu druckenden Objekts generiert und über eine Schnittstelle an den Drucker übergeben. Dieser erzeugt das physikalische Objekt durch stückweises Auftragen von Material, weshalb diese Art der Fertigung auch als generative bzw. additive Fertigung bezeichnet wird (in Abgrenzung zu subtraktiver Fertigung durch Entfernung von Material wie etwa Fräsen) (Fasterman, 2012). In der Literatur wird im Kontext von 3D-Druck häufig auch von „Rapid Prototyping“ gesprochen. Der Unterschied zum gewöhnlichen 3D-Druck liegt lediglich in der realisierbaren Größe der druckbaren Objekte (Fasterman, 2014).

2.1.1 Erstellung des CAD-Modells

Die Objekte in der zugrundeliegenden CAD-Modellierung können entweder volumenbezogen oder als Polygonnetz (Mesh) definiert werden. Eine Volumendefinition beschreibt den gesamten Körper über festgelegte Volumina geometrischer Grundelemente, wogegen ein Netz nur dessen Kanten und damit Grenzflächen definiert (Fasterman, 2012). Dieser Unterschied ist in *Abbildung 1* (S.4) dargestellt.



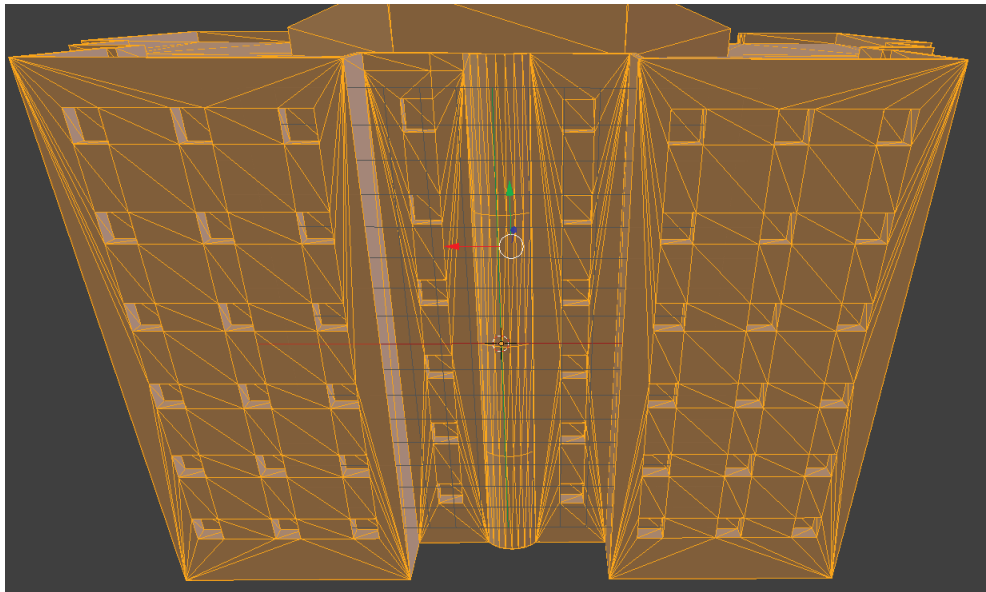


Abbildung 1: Unterschied der Oberflächenbeschreibung durch Netz oder volumenbezogene Definition. Die obere Ansicht zeigt das Volumen des Körpers, das bei der Oberflächenberechnung mit einbezogen wird. Das Modell besteht dabei aus einer Vielzahl kleinerer Körper definierter Größe. Die Netzansicht (unten) beschreibt die Oberflächen ausschließlich anhand der Kanten der begrenzenden Flächen.

Zur Erstellung eines CAD-Modells kann eine Vielzahl von Programmen genutzt werden. Neben kommerziell erhältlichen Programmen stehen auch eine Reihe Freeware-Alternativen zur Verfügung.

Die Hauptunterschiede zwischen diesen Programmen finden sich in der Modell-Erstellung und den weiterführenden Optionen. Bei der Modellierung kann unter anderem das Modell im dreidimensionalen Raum Punkt für Punkt aufgebaut oder auf Basis einer technischen Zeichnung automatisch erstellt werden. Weiterführende Optionen betreffen nicht nur die Fülle an Werkzeugen zur Nachbearbeitung des Modelles, vielmehr muss hier zwischen ingenieurstechnischer Aufbereitung und künstlerischer Animation gewählt werden. Die unterschiedliche Bedienung der Programme richtet sich nach der angesprochenen Zielgruppe. So werden Modelle in, der für den Maschinenbau gedachten Software, Inventor auf Basis technischer Zeichnungen erstellt und angepasst. Die weiteren Werkzeuge ermöglichen hier Festigkeitsanalysen und Materialberechnungen. Dementsprechend hängt die Wahl des Programmes nur zum Teil von der persönlichen Präferenz des Nutzers ab. Vielmehr wird die Auswahl vom

Verwendungszweck des Modells und dem Tätigkeitsbereich bestimmt. Eine kleine Auswahl gebräuchlicher CAD-Programme kann [Tabelle 1 \(S.5\)](#) entnommen werden.

Tabelle 1:CAD-Programme.

	Programm	Anbieter	Bezugsart
Technische Zeichenprogramme	Inventor	Autodesk Inc.	Kommerziell
	AutoCAD	Autodesk Inc.	Kommerziell
	SolidWorks	SolidWorks Corp.	Kommerziell
Zeichenprogramme für organische Strukturen oder Animationen	Blender	Blender Foundation	Freeware
	Cinema 4D	MAXON Computer GmbH	Kommerziell
	3ds Max	Autodesk Inc.	Kommerziell

2.1.2 Modell Translation (STL-File)

Jedes Programm hinterlegt das erstellte Modell in einem eigenen Dateiformat. Diese sind untereinander oft nicht kompatibel bzw. austauschbar. Um das erstellte Modell für den Druck vorzubereiten, muss es von einem „Hostprogramm“ interpretiert werden können. Bei der Fülle unterschiedlicher Software ist es nachvollziehbar, dass das Modell hierfür in ein allgemein gültiges Format gebracht werden muss. Als Industriestandard hat sich das STL-Format etabliert, welches von nahezu jedem 3D verarbeitenden Programm interpretiert werden kann (3D Systems Inc, 1988). Das STL-Format gibt die Oberfläche des Modells über Dreiecke wieder (Triangulation siehe [Abbildung 2 S.6](#)).

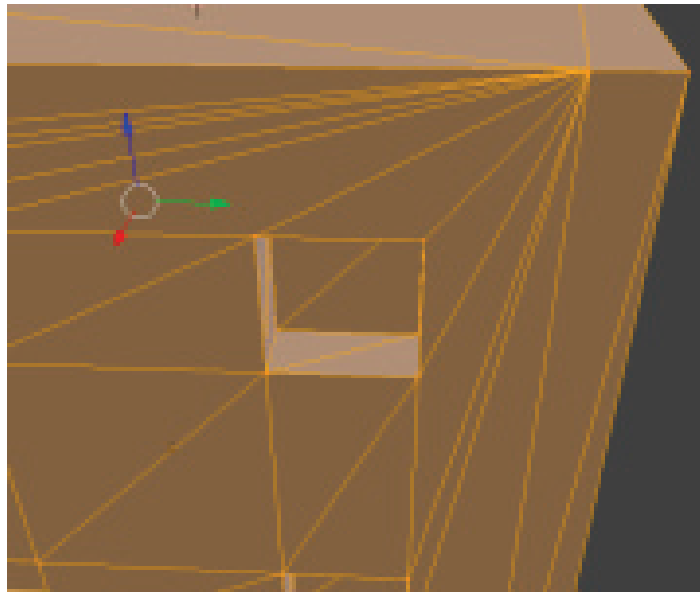


Abbildung 2 STL-Oberfläche. Die ursprünglich aus Polygonen bestehende Oberfläche des Modells wird durch Dreiecke angenähert. Jeder Eckpunkt kann Eck- und Ausgangspunkt unendlich vieler Dreiecke sein.

Jedes Dreieck wird durch drei Punkte (Vertices) und einer Flächennormale beschrieben, wobei ein Vertex als Eckpunkt von mehreren Dreiecken dienen kann. Die Normale gibt an, welche Seite des Dreiecks innen bzw. außen ist (Fasterman, 2012). Runde Oberflächen können durch Dreiecke nur angenähert werden, mit steigender Zahl verwendeter Dreiecke steigt der Detailgrad der beschriebenen Oberfläche. Die Auflösung in einem höheren Detailgrad erfordert zwar mehr Speicherplatz, entsprechend aufgelöste Dateien werden jedoch im Regelfall die vom Drucker maximal akzeptierte Dateigröße nicht übersteigen. Es sollte aber in Betracht gezogen werden, dass durch die steigende Dateigröße die Fehler-Wahrscheinlichkeit beim Datelexport steigt. Die darauf folgenden Prozesse werden zudem rechenintensiver. Vor der eigentlichen Modellierung lohnt es sich daher, die Auflösung des 3D-Druckers in Erfahrung zu bringen, etwa um keine unnötigen Designelemente einzubauen, die ohnehin nicht im gedruckten Modell zu sehen wären.

Die Neukonfiguration der Oberfläche beim Export in das STL-Format kann unerwünschte Nebeneffekte, wie das Entstehen von Schrägen, Löchern, Normalen-Invertierung oder Verschmelzung von vorher nicht verbundenen Kanten mit sich

bringen. Diese Fehler entstehen vornehmlich bei der neuen Vermaschung. Hierbei können Flächen in nicht abschließender Weise verbunden werden. Wird bei diesem Prozess die „geschlossene“ Oberfläche geöffnet, können die begrenzenden Flächen fälschlich als Inn- bzw. Außenseite definiert werden. Ferner bringt die neue Definition der Oberfläche eine Einschränkung der Nutzbarkeit mit sich. Diese Einschränkung bezieht sich darauf, dass das Modell durch nachträgliches Verändern der Maße (Skalieren) gröber wirkt, was vor allem bei Rundungen oder Schrägen auffällt.

Die Entstehung des Problems hängt von der Anzahl, Krümmung, Größe und räumlichen Ausrichtung der Oberflächen ab. Nachdem beim Skalieren nur die Größe der Oberfläche verändert wird, bleibt die Anzahl der beschreibenden Punkte konstant. Ein kleines Modell desselben Körpers wird häufig durch weniger Kanten definiert. Wenn die Größe nur multipliziert ($x > 1$) wird, kann es dazu kommen, dass durch die geringe Anzahl von Kanten eine andere Form entsteht. Eine Skalierung in kleinem Ausmaß wird dagegen nur kleinere Ungenauigkeiten zur Folge haben. Diese können von der durch den Düsendurchmesser bedingten Schichtbreite (Auflösung des Druckers) kaschiert werden. Die [Abbildung 3 \(S.7\)](#) visualisiert anhand dreier Kreise das Problem. Natürlich treten ähnliche Auswirkungen auf die gesamte Geometrie bei einer solchen Veränderung auf, allerdings sind die negativen Effekte vornehmlich bei Rundungen sichtbar.



Abbildung 3: Durch Eckpunkte bedingte Form eines Kreises. Die Kreise besitzen den gleichen Durchmesser und sind (von links) durch 6, 12 bzw. 24 Eckpunkte definiert. Werden die Kreise von links nach rechts betrachtet entspricht das in etwa einer Multiplikation der jeweils vorangegangenen Größe mit zwei. Jeder Kreis hat den Durchmesser einer Blender Unit.

Um das Modell nach dem ursprünglichen Entwurf fertigen zu können, sollte die STL-Datei auf Fehler überprüft werden. Einige Hostprogramme haben diese Funktion bereits integriert. Es empfiehlt sich jedoch, die Reparatur mit einem eigens dafür geschriebenen Programm durchzuführen.

2.1.3 Hostprogramm / Slicen

Die reparierte Datei kann jetzt in ein Hostprogramm eingelesen, dargestellt und verarbeitet werden. Das Hostprogramm ist eine Steuerplattform bzw. Schnittstelle zwischen der elektronischen Steuerplatine des Druckers und dem Nutzer.

Hier wird das Modell auf einem virtuellen Druckbett positioniert und wenn nötig dessen Größe erneut skaliert. Anschließend werden mittels eines Slicers (meist im Hostprogramm integriert) die Druckparameter (u.A. Druck-geschwindigkeit, -temperatur und die Schichtdicke) festgelegt. Diese Parameter definieren das Aussehen, die Eigenschaften und den Entstehungsprozess des Objektes. Nachdem diese Parameter definiert wurden, wird das Modell in Schichten geschnitten, was auch als *Slicen* bezeichnet wird.

Hierzu werden eine Reihe horizontaler Ebenen in das Objekt eingezogen, daraus resultieren geschlossene Kurven oder Polygone. Der zwischen zwei benachbarten Ebenen befindliche Abstand wird als *Slice* bezeichnet (Pandey, Reddy, & Dhande, 2003). Wobei die virtuelle Schichtdicke (Slice) der physikalischen Druckhöhe entsprechen muss. *Abbildung 4 (S.9)* zeigt ein geslicetes Modell wie es in der Druckvorschau gezeigt wird.

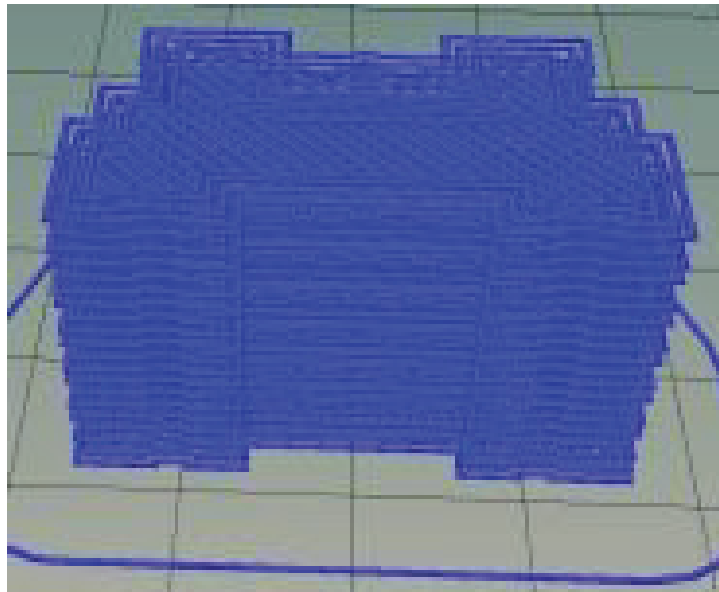


Abbildung 4: Geslicetes Modell. Jede Ebene von blauen Linien stellt eine Schicht des Modells dar. Die Umrandung mit etwas Abstand zum Modell (Brim) dient der Justierung des Düsenabstandes und ist Teil der ersten Schicht.

Je nach Auflösung des gesliceten Modells und dessen Aufbau, können Teile einer Fläche bei Schrägen oder Rundungen außerhalb der Geometrie liegen. Dieser Versatz kann auch innerhalb des Objektes liegen, in bestimmten Fällen auch beides zugleich. Diese fehlerhafte Oberflächenbeschaffenheit wird als „*Containment*“ bezeichnet (Pandey, Reddy, & Dhande, 2003). Die Oberfläche kann durch die Reduktion der Schichtdicke verbessert werden. Jedoch bedeutet die Reduktion der Schichtdicke um den Faktor S_h eine Verlängerung der Bauzeit um den selbigen Faktor. Auf Grund der umgekehrt proportionalen Beziehung muss immer ein Kompromiss zwischen Oberflächenbeschaffenheit und Druckzeit in Kauf genommen werden.

Bei der Prototypengenerierung ist die Bauzeit eng mit den Kosten verknüpft, was Slicen zu einem außerordentlich wichtigen Schritt in der Prozesskette macht (Pandey, Reddy, & Dhande, 2003). Wenn Containment bei der Modell-Generierung nicht umgangen werden kann, sollte darauf geachtet werden, dass der Versatz nur auf einer Seite in Erscheinung tritt, um die Nachbearbeitung zu vereinfachen.

Die Auswahl der Slicestärke erfolgt durch den Nutzer und wird für das gesamte Modell festgelegt. Unterschiedliche Schichthöhen innerhalb eines Modells können im Hostprogramm nur über einen Umweg erreicht werden. Hierzu ist das Modell manuell aufzuteilen und jedes einzeln zu slicen. Es existieren jedoch Ansätze für das dynamische Slicen, bei dem die Schichtdicke an die vorliegende Geometrie angepasst wird. Folgend wird eines der ersten Konzepte vereinfacht dargestellt, wobei viele weitere Ansätze zur Verhinderung von Containment existieren.

Das Konzept der Zackenhöhe („cusp height“) von Dolence und Makela (1994) (Abbildung 5 S.10) passt die Schichtdicke in einer gegebenen Spannbreite an den entstehenden Versatz an.



Abbildung 5: Das Konzept der Zackenhöhe². Die gekrümmte Linie MCAD stellt den Verlauf des CAD-Modells im Zeichenprogramm dar. Durch die Triangulation der Oberfläche (STL-File) ergibt sich die Form aus Geraden (MSTL). Beim Slicen wird diese Form in einzelne Schichten aufgeteilt, die jeweils der physikalischen Schichtdicke (L_h) entsprechen. Die Höhe der Schicht bedingt, dass eine Schräge nicht exakt abgebildet werden kann. Der Abstand zur Schräge (V) entspricht der beim Druck entstehenden „Zackenhöhe“.

Dieses Konzept wird seither für das adaptive Slicen optimiert. Sabourin, Houser, & Bohn (1997) gelang es, eine feinere Schichtgliederung für unterschiedliche Geometrien in das Konzept zu implementieren. Aus diesen Ansätzen kann jedoch nicht nur eine Versatzreduktion abgeleitet werden, viel mehr können Bauteile bezüglich mechanischer Beanspruchung angepasst werden.

²Nach einer Grafik von (Dolenc & . Mäkelä, 1994)

Nach dem Slicen liegt das Modell in einer Abfolge von Maschinenbefehlen vor, was als G-Code bezeichnet wird. Dieser kann von jedem Hostprogramm gelesen werden. Es ist jedoch in diesem Stadium nur bedingt möglich, Einfluss auf die, beim Slicen definierten, Parameter zu nehmen. Eine Ausnahme stellen lediglich die Geschwindigkeit, die Temperatur und die Materialextrusion dar. Diese können auch während des Druckes manuell überschrieben werden.

Der G-Code stellt das letzte Bindeglied zwischen dem digitalen Entwurf und dem tatsächlichen Druck des Modells dar. Nach der Erzeugung können Änderungen nur durch die Implementierung eines eigenen Codes eingefügt werden. Um den Code nicht Zeile für Zeile lesen zu müssen, bieten Hostprogramme zum Teil eine vereinfachte Möglichkeit an, Änderungen für besondere Situationen einzufügen. Besonders für den Druckanfang, den Schichtwechsel und das Druckende können allgemeine Verhaltensweisen festgelegt werden. Beispielsweise kann über das Anhängen des Befehls „M104 S0 T0“ das Heizelement „T0“ nach dem Druck deaktiviert werden. Auch können so Positionswechsel, Temperatur- und Geschwindigkeitsänderungen nachträglich eingefügt werden. Diese eigenen Codes, bieten sich vornehmlich für die Individualisierung der Druckprozesse an, sollten jedoch nur von erfahrenen Nutzern eingefügt werden. Weiterhin können so fremderzeugte G-Codes auf die eigenen Bedürfnisse angepasst werden. Nach Vor- und Nachbereitung des Codes und Erfüllung aller mechanischen Anforderungen kann der Druck eingeleitet werden.

2.2 FLM Verfahren

Im vorangegangenen Kapitel wurden die notwendigen Schritte bei der Modellgenerierung beschrieben. Hier soll das wohl am stärksten mit 3D-Druck assoziierte Fertigungsverfahren näher beschrieben werden.

Fused Deposition Modeling (kurz FDM) bzw. *Fused Layer Modeling* (kurz FLM) bezeichnet ein Verfahren, bei dem Objekte durch das schichtweise Auftragen von geschmolzenem Kunststoff entstehen (Upcraft & Fletcher, 2003).

Bei diesem Generierungsprozess wird ein Materialstrang, auch Filament genannt, als Draht oder Tablette einer Düse zugeführt. In der Düse wird das Filament geschmolzen und anschließend auf eine beheizbare Plattform (Druckbett) extrudiert. Nach der Extrusion bildet das Filament eine zusammenhängende Struktur die beim Abkühlen aushärtet. Abbildung 6 (S.12) zeigt die Funktionsweise von diesem Prinzip.

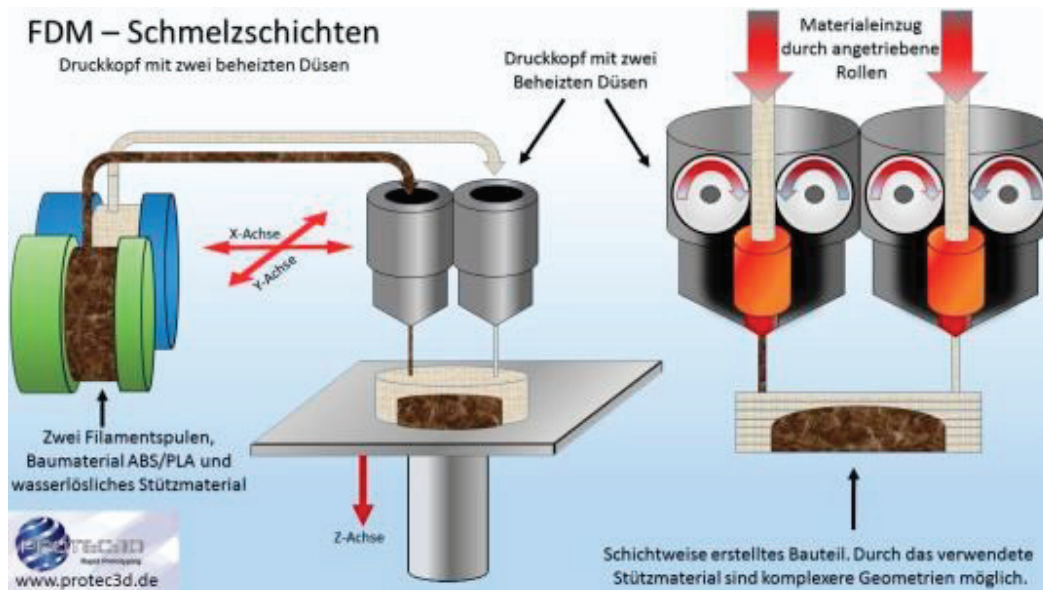


Abbildung 6: FLM Verfahren mit 2 Druckköpfen.³

Das Filament muss ein thermoplastisches Verhalten aufweisen. Durch den hohen Schmelzpunkt anderer Materialien wie Metall oder Keramik finden hauptsächlich Wachse und Kunststoffe praktische Anwendung (Grund, 2015). Werden Abwandlungen des Verfahrens für den Lebensmitteldruck verwendet, gelten vergleichbare Eigenschaften für die verwendete Druckmasse. Durch den Zwang, eines thermoplastischen Verhaltens kommen für den Druck mittels *FLM* nicht alle Nahrungsmittel in Frage.

Diese Thermoplaste können einen gewissen Anteil Feststoff enthalten, wobei der Kunststoff als Klebe- und Gerüstsubstanz dient. Die Düse und das Druckbett werden hierbei getrennt beheizt.

³ <http://www.protec3d.de/3d-drucken/vor-und-nachteile/>

Im Gegensatz zur herkömmlichen Extrusion, z.B. bei der Nudelherstellung, ist der Düsendurchmesser wesentlich kleiner als der Querschnitt des Modells (Abbildung 7 und Abbildung 8 S.13).



Abbildung 7: Nudelextrusion.⁴

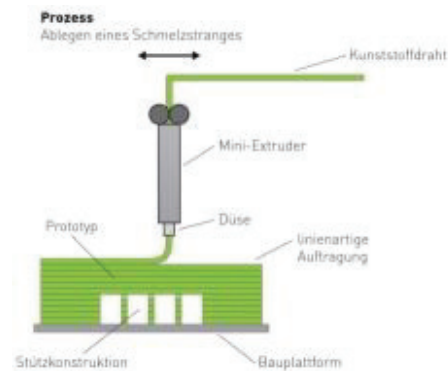


Abbildung 8: Prototypengenerierung mittels FDM Verfahren.⁵

Von diesem Punkt aus können zwei Systeme unterschieden werden:

Bei der ersten Möglichkeit bewegt sich die Düse in X- und Y-Richtung während sich das Druckbett entlang der Z-Achse bewegt. Diese Art der Bewegungsführung ermöglicht das genauere Justieren des Druckbettes, was vor allem durch die „starre“ Anbringung erreicht wird. Aufgrund der Beweglichkeit des Extruders kann es allerdings bei höheren Geschwindigkeiten zu Ungenauigkeiten durch die Extruder-Achsenbewegung führen.

Bei der zweiten Möglichkeit bewegt sich die Düse entlang der Z-Achse und das Druckbett in X- und Y-Richtung. Hierbei kommt es zu weniger Ungenauigkeiten in X- und Y-Richtung. Jedoch birgt die „flexible“ Anbringung des Druckbettes die Gefahr einer Schiefstellung. Für diesen Zweck können letztere Systeme mit Sensoren ausgestattet werden, um eine gerade Ebene zu simulieren. Allerdings arbeiten Sensoren mit einer gewissen Toleranz, was zu Ungenauigkeiten im Druckablauf führen kann (weitere Unzulänglichkeiten werden im Kapitel Troubleshooting auf Seite 85 beschrieben).

⁴ http://www.italgi.it/de/maschinen-fur-kombinierte-nudeln-Multipla-Kombiniert-mit-Pressen_c4_p70.html

⁵ [http://www.chemieundmore.com/archive/844594/Entwicklung-biobasierter-Kunststofffilamente-fuer-den-3D-Druck-im-Schmelzschichtverfahren-\(FDM\).html](http://www.chemieundmore.com/archive/844594/Entwicklung-biobasierter-Kunststofffilamente-fuer-den-3D-Druck-im-Schmelzschichtverfahren-(FDM).html)

Nachdem die Düse den Querschnitt abgefahren hat, erfolgt eine Verschiebung um die Schichthöhe in Richtung der Z-Achse. Der nächste Querschnitt wird auf den darunter liegenden extrudiert. Durch die Temperatur des extrudierten Thermoplastes verbindet sich die neue Schicht mit der unteren.

Durch den schichtweisen Aufbau können Überhänge nur bis zu einem geringen Grad realisiert werden, bevor eine Stützstruktur mit generiert werden muss. Diese Stützstruktur muss nach Vollendung des Drucks von Hand entfernt werden.

Das schichtweise Auftragen von Material birgt darüber hinaus einen weiteren Nachteil, der bei dem FLM Verfahren besonders ausgeprägt ist: Die Schichtstruktur ist meist auch bei sehr geringen Schichthöhen fühl- und erkennbar. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Schichthöhe und tritt besonders bei Flächen mit einem Winkel ungleich 90° auf. Der Effekt wird auch als „*Staircase*“ oder „*registering*“ Effekt bezeichnet (Danforth, 1996). Um eine gänzlich „glatte“ Oberfläche des Modells zu erreichen, ist oft eine Nachbehandlung erforderlich.

Wird ein System mit zwei oder mehr Extrudern genutzt, kann mit Hilfe von zusätzlichen Düsen ein weiteres Filament extrudiert werden. Hierbei kann nicht nur ein unterschiedlich farbiges Modell generiert werden, vielmehr eröffnet sich die Möglichkeit unterschiedliche Filamente mit einander zu verschmelzen und so die optischen sowie mechanischen Eigenschaften anzupassen (Espalin, Albert, Medina, & Wicker, 2014). Ferner können Thermoplaste verwendet werden, die unterschiedlich auf Lösungsmittel reagieren. Die differierende Resistenz kann beispielsweise bei der Kombination *Acrylnitril-Butadien-Styrol* (kurz ABS) und *Polylactid acid* (kurz PLA) dazu verwendet werden, um eines der beiden Filamente chemisch aufzulösen, ohne das andere merklich in Mitleidenschaft zu ziehen (Franke, 2016).

2.3 Lebensmittelapplikationen

Ein noch in den Kinderschuhen steckendes, sich jedoch schnell entwickelndes Anwendungsgebiet findet sich im Nahrungs- und Genussmittelsektor. Einige Unternehmen wie *Print2Taste* bieten bereits Lebensmitteldrucker für den Heim- und Gastronomiebereich (Print2Taste GmbH, 2016). Wird jedoch die Fülle an Nahrungsmitteln in Betracht gezogen, existieren diesbezügliche Anwendungen doch nur in einem kleinen Bereich der Branche.

So können Fettsuspensionen im weiteren Sinn, z.B. Schokolade (Krämer, 2016), aber auch Zuckeremulsionen wie Marzipan (Wiegmann, 2015) für diese Applikation verwendet werden. Weiterführend sind Kaugummi (Krämer, 2016) oder mehrfarbige Süßigkeiten (Heinze-Wallmeyer, 2016) möglich. Neben Süßigkeiten kann auch Käse (mögliches Design siehe Abbildung 10 S.15) gedruckt werden, wobei die dabei auftretenden Veränderungen in Textur und Geschmack merklich feststellbar sind (Le Tohic, et al., 2017). Der Teigwarenproduzent *Barilla* arbeitet an einem Gerät um Nudeln für den Endkonsumenten oder Gastronomiebetreiber druckbar zu machen (siehe Abbildung 9 S.15) (Barilla G. e R. Fratelli S.P.A, 2016).



Abbildung 9: Barilla Nudeldrucker.⁶

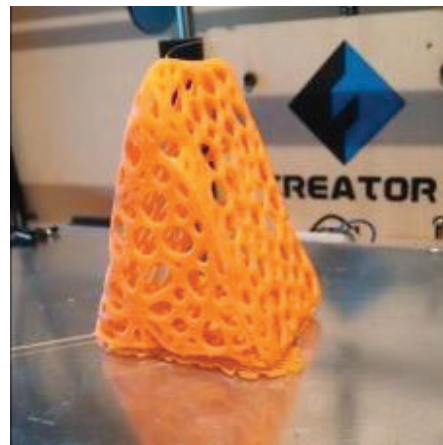


Abbildung 10: Käse 3D.⁷

⁶ https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/05/barilla_3d_printer_pasta.jpg

⁷ <https://www.google.de/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwi8xfGttaHTAhUjSJoKHTbtDPQQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fwww.wamungo.de%2FImages%2FRaum-Kaese-41cc7b78970281690f34b73&psig=AFQjCNGqE1vpzW3aqQU8GBHZ5wcfRSQgZw&ust=1492172323598303&cad=rjt>

Ähnliche Neuheiten finden in zunehmendem Maße ihren Weg auf Fachmessen wie die *Leitmesse für Gastronomie - INTERNORGA 2017*. Die mediale Bewerbung fasst den Begriff *3D-Druck* jedoch vergleichsweise weit. So werden Apparate beschrieben, die im eigentlichen Sinn keine 3D-Drucker darstellen. Ein Beispiel ist der in *Abbildung 11* (S.16) gezeigte Pfannkuchendrucker der russischen Fastfood Kette Teremok (Krämer, 2017). Bei dieser Applikation wird der Pfannkuchen nur in X- und Y-Richtung erstellt.



Abbildung 11:
Pfannkuchendrucker von
Teremok.⁸

Obwohl schon erste Ansätze für die Bereitstellung dieser Technologie für den Endkonsumenten bestehen, existiert weiterer Forschungsbedarf, so können die existierenden Systeme weiterhin deutlich verbessert werden.

Das betrifft zum einen deren technische Seite, insbesondere die kontinuierliche Massenzufuhr und die Förderung. Die meisten Systeme im Lebensmittelsektor arbeiten mit einer Abwandlung des FLM Verfahrens, wobei sich die Materialförderung dahingehend unterscheidet, dass kein Materialstrang sondern Patronen mit definiertem Volumen Benutzung finden. Das Lebensmittel wird anschließend mittels eines Hubkolbens aus den Patronen heraus gepresst. Dieser simple Mechanismus besitzt den entscheidenden Nachteil, dass ausschließlich mit Batchprozessen gearbeitet werden kann. Bei fließfähigen Massen würde sich eine Pumpförderung anbieten, deren Vorratsbehälter jederzeit zugänglich bzw. wieder auffüllbar ist.

⁸ <https://www.3d-grenzenlos.de/wp/wp-content/uploads/2017/03/teremok-pfannkuchendrucker.jpg>

Besonderer Optimierungsbedarf existiert aber immernoch vornehmlich bei den Druckmassen. Hierbei gilt es, die vorhandenen Stoffsysteme neu zu bewerten und hinsichtlich der späteren Nutzbarkeit Standards zu etablieren. Ferner muss das Spektrum der bearbeitbaren Lebensmittel vergrößert werden.

Die Anpassung für sich nach dem Druck stark verändernde Materialien wie Teige, dürfte noch etwas dauern. Insbesondere Teigwaren wie Pizzaböden, die ihre Volumina während der Bearbeitung verändern, sind nur bedingt für den Einsatz als Druckmasse geeignet. Für eine optimale Modellgenerierung wäre es erforderlich, die Volumen-Änderung präzise vorherzusagen, um diese in die Bewegungen des Druckers zu implementieren.

Leider haben alle 3D-Drucker im Lebensmittelsektor gemein, dass der Mengenoutput noch keine industrielle Fertigung erlaubt. Es ist jedoch denkbar, dass mittels dieser Technologie der Produktentwicklungsprozess in der Lebensmittelindustrie zukünftig stark verändert wird.

In dieser Arbeit soll auf den Aufbau eines Lebensmitteldruckers sowie dessen Bedienung eingegangen werden. Der Fokus liegt auf der technischen Weiterentwicklung eines Systems, das eine kontinuierliche Förderung erlaubt. Dessen detaillierte Beschreibung und die Hintergründe des Projektes erfolgen im nächsten Kapitel.

2.4 Systembeschreibung

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Lebensmitteldruck im Allgemeinen vorgestellt, hier soll jetzt auf das System des FoodPrint^{3D} Extruders eingegangen werden. Dabei erfolgt eine gesonderte Betrachtung des ursprünglichen Systems 2.4.1 (S.18) und der für Lebensmittel nutzbaren Applikation 2.4.2. (S.21) Der Unterpunkt 2.4.3 (S.25) widmet sich dem Softwarekomplex und dem Zusammenspiel.

2.4.1 Multirap M420

An der Hochschule Neubrandenburg im Fachbereich Lebensmitteltechnologie befindet sich derzeit ein Multirap M420 der Multec GmbH mit integriertem Sensor im Einsatz. Dieser wurde im Rahmen der Masterarbeit von Tobias Franke 2016 zusammengebaut. Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien: offene Bauweise, Anpassungsfähigkeit, Stabilität, Extruderanzahl, Unabhängigkeit (stand alone) und Kosten (Franke, 2016). Erste Probeläufe und Druckparameter-Tests erfolgten im Zuge der Masterarbeit von Josephin Steinke (2016).

Bei diesem Drucker handelt es sich um einen dual extrudierenden FLM Printer. Der Rahmen besteht aus einem Aluminiumgestänge, wodurch eine offene Bauweise entsteht. Dies ermöglicht die Anpassung einzelner Komponenten sowie die flexible Anbringung von Zusätzen ohne Stabilitätsverlust. Die Extruder können eine maximale Temperatur von 265 °C erreichen (Gubbels & van der Zalm, 2015). Der integrierte Sensor dient ausschließlich der Messung des Abstandes zum Druckbett und dessen Nivellierung. Die Ausstattung umfasst weiterhin ein beheizbares Druckbett mit externem Trafo und einer Kunststoffschutzplatte. Diese Schutzplatte wird auf das eigentliche Druckbett geklebt, um dieses vor Schäden durch Einfahren der Düse bei falscher Justierung zu schützen. Ferner wird die Elektronik anhand einer externen Steuerplatine angesteuert, die den Schnittpunkt der Kommunikation mit dem Hostprogramm darstellt. Der externe Stelltransformator des Druckbettes ermöglicht ein schnelles Aufheizen und höhere Temperaturen (Franke, 2016). Allerdings ist diese Erweiterung derzeit nicht in die Firmware der Steuerplatine integriert, was zu einer automatischen Abschaltung bei Temperaturen über 108°C führt. Das System kann über ein Tablet mit der zugehörigen App, einen Desktop PC bzw. Laptop angesteuert werden.

Die Bedienung über die Tablet App stellt sich hierbei einfach und anfüngerfreundlich dar. Durch die vereinfachte Bedienung können jedoch nicht alle Funktionen des Druckers genutzt werden. Insbesondere rechen- oder grafikintensive Aufgaben können schnell zu Überforderung und Abstürzen führen. Es empfiehlt sich daher die Verwendung eines Desktop PC oder einem Laptops.

Ebenfalls von Vorteil ist die zur Verfügung stehende Programmauswahl in Bezug auf die Modellnachbearbeitung, die sich durch die Verwendung eines PCs ergibt. Abbildung 12 (S.19) aus dem Datenblatt des Herstellers zeigt den Drucker in der oben beschriebenen Konfiguration mit aufgebrachtem Blue Tape (Haftung erhöhendes Klebeband).

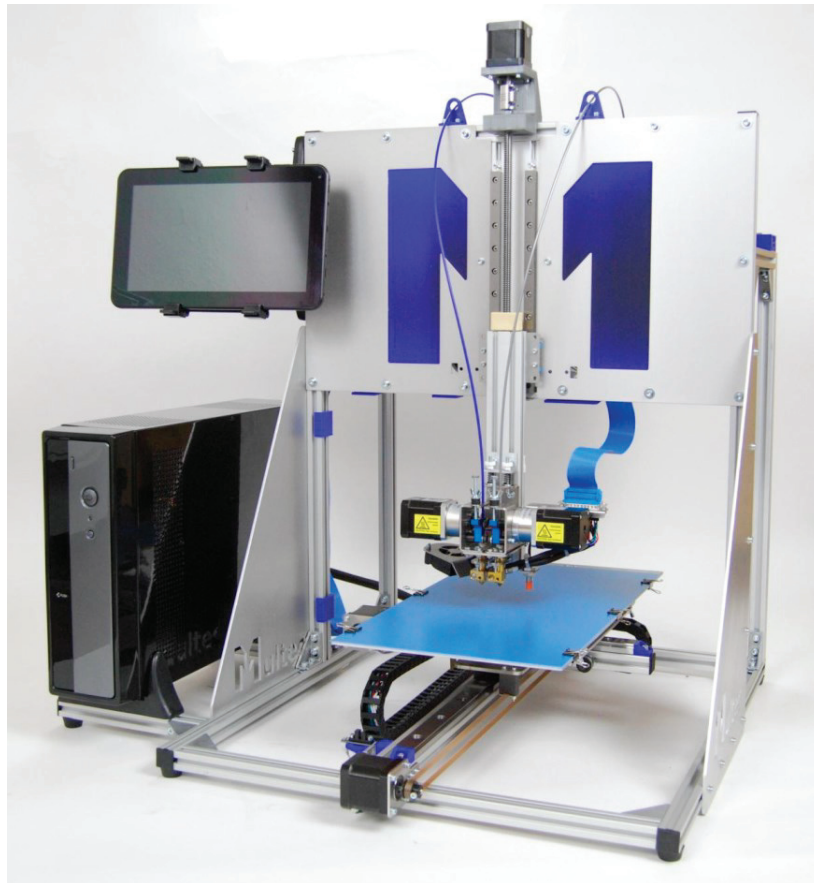


Abbildung 12: Multirap M420 mit Sensor.⁹

Die Extruder können mit Düsen unterschiedlicher Durchmesser bestückt werden, die zugehörigen Filament-Aufnahmen können dem jeweiligen Material angepasst werden. Das Filament wird als Strang von einer Rolle zugeführt und hat einen Durchmesser zwischen 1,75 mm und 3,00 mm.

⁹ (Multec GmbH, 2016)

Der Multirap M420 bewegt das Druckbett mittels Schrittmotoren, deren Kraft direkt übertragen wird, in X- und Y-Richtung. Die für die Bewegung zur Verfügung gestellte Kraft kann durch die Modulation der verfügbaren Stromstärke an der Steuerplatine variiert werden. Die Extrudereinheit wird entlang der Z-Achse bewegt. Die Endstopps in X- und Y-Richtung sind Lichtschranken, wobei zu beachten ist, dass in der Firmware die Endstopps als minimale Fahrtweite („min“) definiert sind. Dementsprechend wird bei Anfahren der Lichtschranke (siehe [Abbildung 13 S.20](#)) der Wert der jeweiligen Achse auf „0“ gesetzt (Achsen-Homeposition). Danach wird die X-, Y- und Z-Position nur noch anhand der erfolgten Schritte gemessen. Dementsprechend erhält die Steuerung während eines Druckes, keinerlei Rückmeldung über die tatsächliche Position. Die Konfiguration der Endstopps ist eine Eigenschaft, die von der Firmware an das Hostprogramm vererbt wird. Die Eigenschaften können also im Hostprogramm verändert werden, ohne dass Auswirkungen auf die Druckbettausmessung entstehen. Durch die Änderungen an der Konfiguration wird jedoch die virtuelle Druckbettauslegung beeinflusst, was unter Umständen zu einer falschen Bauteilpositionierung führt.

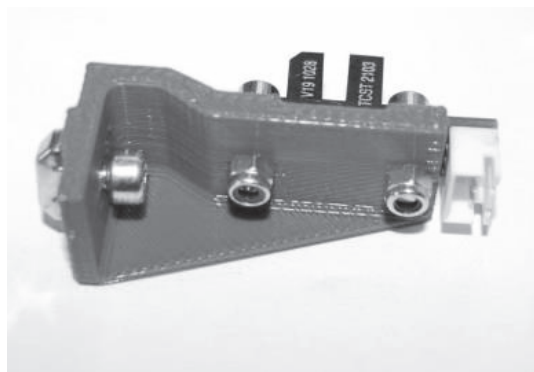


Abbildung 13: Lichtschranke.¹⁰

In Z-Richtung erfolgt die Nivellierung durch Anfahren des Sensor-Nullpunktes, der in der Mitte des Druckbettes liegt. Dies ist nur bei der Konfiguration mit Sensor ([Abbildung 14 S.21](#)) der Fall; nachdem sich dieser etwa 2 cm hinter der Extrudereinheit befindet, wird so eine Abtastung außerhalb des Druckbettes verhindert.

¹⁰ (Multec GmbH, 2016)

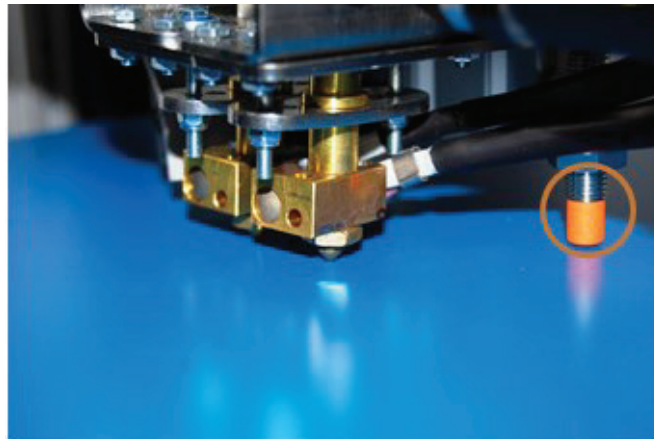


Abbildung 14: Extruderkomplex und Sensor (Kreis).¹¹

Die maximale anfahrbare Höhe der Z-Achse, Breite und Länge des Druckbettes betragen 220 mm * 210 mm * 400 mm (Höhe x Breite x Länge), woraus sich ein Volumen von rund 18,5 l ergibt. Nachdem in Richtung der Z-Achse kein Endstopp montiert ist, sind Arbeiten am Rand der maximalen Höhe mit erhöhter Vorsicht auszuführen. Um ein versehentliches Arbeiten über der verwirklichtbaren Höhe zu verhindern, empfiehlt es sich, mit einer maximalen Höhe von 200 mm zu kalkulieren. Die 20 mm Sicherheitsabstand entstehen durch die Höhe der Schutzplatte sowie der Düsenanhebung beim Ausführen von *retract* Befehlen oder speziellen Laufwegen während des Drucks. Diese sind teils so hinterlegt, dass ein Extruderhub vorgeschaltet wird.

2.4.2 Das Projekt FoodPrint^{3D}

Die Vision des Projekts FoodPrint^{3D} ist es, einen handelsüblichen 3D-Drucker mit möglichst begrenzten zusätzlichen Anschaffungen für den Lebensmitteldruck umzurüsten. Es wird angestrebt, dass dieser Ansatz auch von etwas technikversierten Interessenten nachvollzogen werden kann. Aus diesem Grund sollten die Anpassungen an der Elektronik, der Software sowie die manuelle Nachbearbeitung der Bauteile möglichst einfach gehalten sein. Dementsprechend kann die Applikation nur selbstgedruckte Teile oder Komponenten enthalten, welche am Drucker verbaut sind.

¹¹ (Multec GmbH, 2016)

Hierfür ist es erforderlich, dass nahezu alle nicht elektronischen Komponenten aus einem Thermoplast hergestellt werden können.

Abbildung 15 (S.22) zeigt den von Tobias Franke konstruierten Lebensmittelextruder.

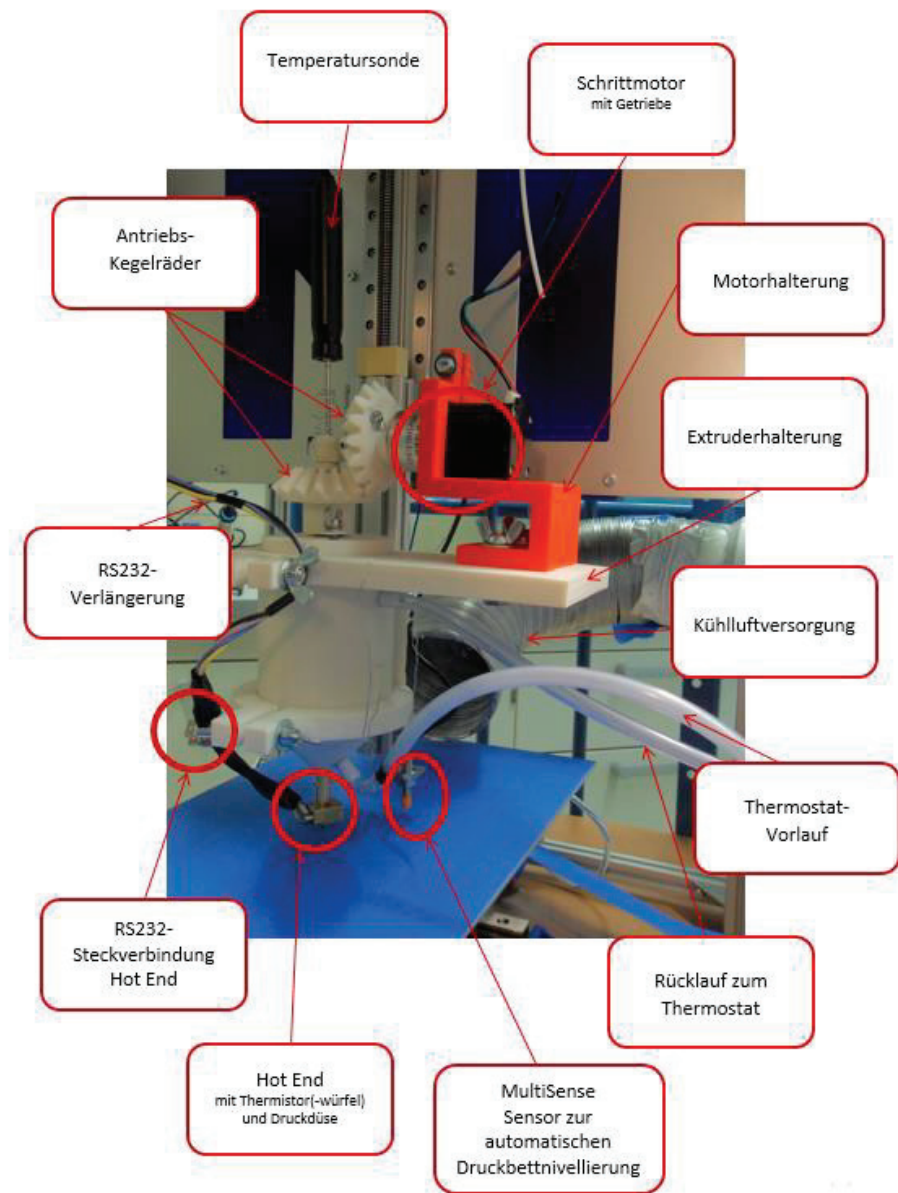


Abbildung 15: FoodPrint^{3D} Applikation von Tobias Franke (Franke, 2016).

Die dargestellte Version des Lebensmittelextruders ist die erste des Projektes FoodPrint^{3D}. Mit dieser war es möglich, weiße Kuvertüre und Kokosfett zu drucken.

Versuche eine pastöse Zuckermasse mit höheren Temperaturen des Doppelmantels zu drucken, resultierten in der Verformung des eingesetzten Zylinders (Cisse, 2016). Um die Vision des Projektes weiter auszubauen, soll das System optimiert neu erstellt werden. Im Folgenden schließen hierzu Ausführungen bezüglich der Kunststoffe, des Druckerumbaus, der benötigten Komponenten sowie deren Anbringung an.

Anforderungen an verwendete Thermoplaste

Der Thermoplast muss einerseits den applizierten Temperaturen und der mechanischen Beanspruchung standhalten. Andererseits muss dieser eine gewisse Resistenz gegenüber Wasser und Reinigungsmitteln aufweisen. Zusätzlich gilt zwingend, dass das Verhalten des Kunststoffes während des Druckes vorhersagbar ist, um passgenaue Teile generieren zu können. Für diejenigen Bauteile mit Lebensmittelkontakt gilt außerdem, dass diese lebensmittelecht sein müssen. Im Rahmen des Projektes wurde mit den lebensmittelechten Filamenten PLA und *Poly lactid High Temperature* (PLAHT) gearbeitet. Auf den Einsatz eines nicht-lebensmittelechten Hartkunststoffes wurde für den Bau der ersten Applikation indes verzichtet.

Umrüstung des verwendeten 3D-Druckers

Die Bausatzstruktur des Multirap M420 ermöglicht, dass die Extrudereinheit einfach an einer anderen Stelle des Gestänges befestigt werden kann. Aus Sicherheitsgründen muss die Anbringung auf eine Weise erfolgen, welche keine Komponente der Extrudereinheit oder des Gestänges durch versehentliches Aufheizen der Thermistorwürfel beschädigen kann.

Nachdem die Fehlerabschaltungsprotokolle der Firmware die Standardkonfiguration überprüfen, müssen jedoch alle Komponenten ansteuerbar bleiben. Aus diesen Notabschaltungen ergibt sich eine softwareseitige Hürde. Diese entsteht dadurch, dass Materialextusion nur über einer bestimmten Temperatur zulässig ist, um die Düse vor Schäden zu schützen. Für das vorangegangene Projekt von Tobias Franke wurde die Software von der Firma Multec GmbH umgeschrieben, was eine Düsenextrusion bei einer Temperatur von 15 °C ermöglicht.

Komponenten des FoodPrint^{3D} Extruders

Die wichtigsten Komponenten des FoodPrint^{3D} Extruders sind ein Doppelmantelzylinder und eine Förderschnecke aus PLAHT (siehe Abbildungen 16, 17, 18 und 19 S.24). An der Schnecke sind zusätzlich ein Deckel und ein Kegelrad fixiert. Diese Bauteile sitzen Horizontal zum Druckbett. Durch die Fördermethode beschränkt, können ausschließlich Viskose Massen verarbeitet werden. Durch die horizontale Lage und die Fließfähigkeit des extrudierbaren Lebensmittels, kommt es zu einer kontinuierlichen Tropfenbildung an der Düse.

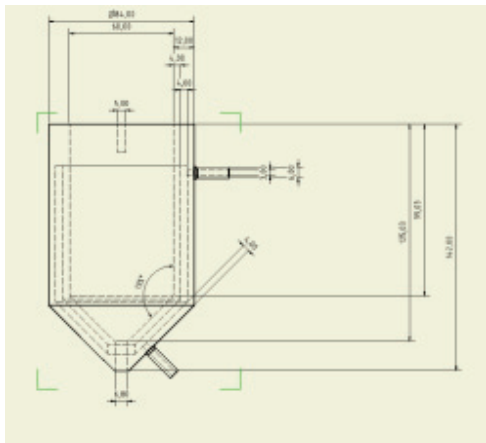


Abbildung 16: Technische Zeichnung Doppelmantelzylinder.

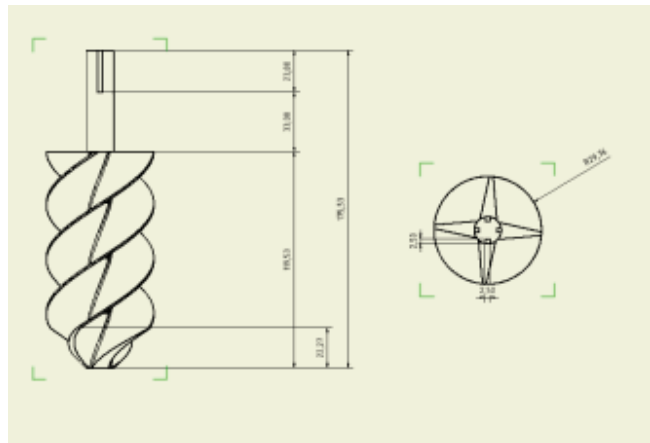


Abbildung 17: Technische Zeichnung Förderschnecke.



Abbildung 18: Zylinder Design (Franke, 2016) mit der Düsenhalterung oben.



Abbildung 19: Schnecke mit Deckel und Kegelrad.

Anbringung der Extruderkomponenten

Der Zylinder wird an einer Halterung angebracht, welche anstelle der Kunststoff-Extrudereinheit an der Z-Achse befestigt wird. Auf dieser ist ein Schrittmotor mit fixiertem Kegelrad angebracht. Durch die Verzahnung der Kegelräder wird die Kraft des Schrittmotors direkt übertragen. Der Doppelmantelzylinder wird mittels eines Wasserbades beheizt, wobei der Zufluss des Warmwassers unten und der Abfluss oben befestigt werden. Um herkömmliche Düsen nutzen zu können, ist ein Messinggewinde in die Unterseite des Zylinders integriert. Im Prinzip können alle für den Multirap M420 erhältlichen Düsen verwendet werden. In der Praxis zeigte sich jedoch, dass Düsendurchmesser kleiner als ein Millimeter leicht verstopfen. Ähnlich wie bei der Kunststoffapplikation werden Lebensmittel mit thermoplastischem Verhalten gedruckt. Dementsprechend erfolgt eine Kühlung des extrudierten Gutes über einen Kühlluftstrom, der möglichst nur den Druckbereich treffen sollte.

2.4.3 Software und Kompatibilität

Im Kapitel 2.1 (S.2) erfolgte eine Darstellung der nötigen Schritte, um ein Modell drucken zu können. Hier soll ein kleiner Einblick in die verwendeten Programme und deren Zusammenspiel gegeben werden. Eine Auswahl der in vorangegangenen Projekten verwendeten Software kann Tabelle 2 (S.27) entnommen werden.

Wie weiter oben erwähnt wurde, beginnt die Modellgenerierung mit einem CAD-Programm. Nach dem praktisch jedes dieser Programme sein eigenes Speicherformat hat, erfolgt der Austausch des Modellnetzes über den Export in eine STL-Datei. Eine Nachbearbeitung des übertragenen Punktnetzes (Mesh) ist dann nicht mehr in jedem CAD-Tool möglich. Zusätzlich zu den Formaten müssen die Konstruktionsumgebungen einer genauen Betrachtung unterzogen werden. Dies gilt der Auswahl der zu verwendenden Maßeinheiten, nach dem einige Programme standardmäßig ihre eigene Maßeinheit verwenden, z.B. nutzt die Software Blender standardmäßig *Blender Units*. Es kann zwar im Regelfall ein Design im metrischen System gewählt werden, es ergeben sich daraus aber häufig Skalierungsfehler beim Exportieren des Modells.

In dieser Arbeit erfolgt die Modellierung in *Autodesk Inventor 2017*. Inventor erstellt grundsätzlich Modelle mit Volumenbezug anhand technischer Zeichnungen. Daher können Punktnetze zwar importiert, aber nur deren Oberfläche bearbeitet werden. Innerhalb eines Entwicklerteams ist es daher empfehlenswert, dass das verwendete CAD Programm festgelegt wird. Es sollte weiterhin beachtet werden, dass es STL-Dateien erzeugen kann, um keine zusätzliche Software für die Umwandlung einsetzen zu müssen.

Wie im Abschnitt 2.1 (Grundlagen 3D-Druck auf Seite 2) beschrieben, muss die STL-Datei auf Fehler überprüft werden. Hierfür kann zwischen einer Reihe von spezialisierten Programmen wie *Netfabb* oder Cloud Diensten gewählt werden. Einige Hostprogramme bieten diese Möglichkeit ebenfalls, wobei spezialisierte Anwendungen bezüglich ihrer Optionen zu bevorzugen sind.

Für das Slicen können wieder eigene Programme oder Hostprogramm-Kombinationen genutzt werden. Anders als bei der Fehlerüberprüfung bietet die Verwendung eines Hostprogramms hier Vorteile. So müssen das virtuelle Druckbett und die Druckerkonfiguration für die Positionierung und den Druck nur einmal eingerichtet werden. Fehlerhafte Einstellungen in dieser Konfiguration würden sich fatal auf das Druckergebnis auswirken und könnten sogar zu Beschädigungen der Hardware führen. Ob nun ein Kombinationsprogramm oder ein externer Slicer verwendet wird hat ansonsten keine Auswirkungen auf dessen Funktion.

Nach dem Druckstart im Hostprogramm erfolgt die Übertragung der Befehle in definierter Geschwindigkeit an die Firmware des Druckers. Die eingehenden Befehle werden hier für die entsprechenden Komponenten übersetzt. Beispielsweise wird Der Befehl „G28 X0“ (Position X = 0) von der Firmware interpretiert: Es erfolgt die elektronische Ansteuerung des Schrittmotors der X-Achse, dieser wird jetzt so lange mit Strom versorgt, bis der X-Endstopp erreicht ist.

Die Firmware ist für die Steuerung der Elektronik bzw. Mechanik verantwortlich. In dieser sind essentielle Eigenschaften, Abschaltungsprotokolle, Bewegungsmuster und weitere Befehle festgeschrieben. Die hier definierten Eigenschaften können von den vorgeschalteten Programmen nicht verändert werden. Erfolgt eine falsche Definition in einem vorangegangenen Schritt, kommt es unweigerlich dazu, dass die in der Firmware hinterlegten Eigenschaften in Kraft treten, was zu einem Druckfehler oder Abbruch führen kann.

Tabelle 2: In vorangegangenen Projekten verwendete Software. In den Projekten wurde jeweils eine Auswahl der aufgeführten Programme genutzt.

Programmart	Name	Projekte
CAD	SketchUp	(Cisse, 2016)
	SolidWorks	
	Inventor	(Franke, 2016)
	Blender	
STL-Reparatur	Netfabb Basic	(Helmholz, 2015)
	AccuTrans 3D	
Slicer	Slice3r	(Kaiser, 2016)
Hostprogramm	Cura	
	Mattercontrol	(Pfister, 2016)
	Repetierhost	
	Simplify3D	(Steinke, 2016)

3. Material und Methoden

3.1 Material

3.1.1 Software

- CAD: Inventor Professional (Version 2017 Version 2015, Autodesk Inc., San Rafael, USA)
- STL-Repair: Netfabb Basic (Version 7.4 Netfabb GmbH, Parsberg, Deutschland)
- Hostprogramm: Simplify3D (Version 3.1 Simplify3D Inc., Cincinnati, USA)
- Firmware Anpassung (Microcontroller): Software Arduino (Version 1.6.0, Arduino LLC, US)
- Firmware Anpassung (Microcontroller): Software Arduino (Version 1.8.1, Arduino LLC, US)
- NVIDIA Grafikkartentreiber 359.21
- ECHIP Version 7.0 (Echip Inc., Yorklyn Rd, Delaware USA)

3.1.2 3D-Drucker allgemein

- 3D-Drucker Multec Multirap M420 (Seriennummer 1203, Multec GmbH, Riedhausen, Deutschland)
- Druckerdüsen (Serie Multec Pro, Durchmesser 0,5 mm, 0,35 mm und 1,0 mm, Multec GmbH, Riedhausen, Deutschland)
- Laborstelltrafo Voltcraft (DPPS-32-20, Voltcraft, Wollerau, Deutschland)
- Luftkühlung / Klimatronic (Modell Transform 7000, Suntec Wellness GmbH, Düsseldorf, Deutschland)
- Thermostat Haake B12 (Thermo Haake GmbH, Karlsruhe, Deutschland)
- Desktop PC; Intelcore Duo 2,94 GHz, 4 GB RAM, Windows 7 service Pack 1
- Blue Tape (Scotch 2090, 50-m-Rolle, 5cm breit, 3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland)

3.1.3 FoodPrint^{3D} Extruder

- Halterung aus PLAHT, im Projekt von Tobias Franke erstellt
- Schrittmotor mit fixiertem Kegelrad, im Projekt von Tobias Franke erstellt
- Sekundenkleber (Stylex Schreibwaren GmbH, Bad Bentheim, Deutschland)
- PLA 2,85 mm, 2 kg (Multec GmbH, Riedhausen, Deutschland)
- PLA HT 2,85 mm, 2 kg (Multec GmbH, Riedhausen, Deutschland)
- ABS 2,85 mm, 1 kg (Multec GmbH, Riedhausen, Deutschland)
- Schleifpapier
- Fräse Proxon Micromot System (PROXXON GmbH, Föhren, Deutschland)
- Klarlack Seidenmatt (Meffert AG Farbwerke, Bad Kreuznach, Deutschland)
- Dichtfix (MEM Bauchemie GmbH, Ostfriesland)
- Pattex Kraft-Mix (Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, Deutschland)
- Kaltglasur (Createc Trend-Design-GmbH, Lindenberg, Deutschland)

3.1.4 Druckmassenherstellung

- Puderzucker (Diamant, Köln, Deutschland)
- Entöltes Kakaopulver (11%) (Bensdorp, Barry Callebaut Cocoa AG, Zürich, Schweiz)
- Kokosfett (Dr. Schlincks Palmin®, Elmshorn, Deutschland)
- Rotationskugelmühle (IMP 5, LIPP- Mischtechnik GmbH, Mannheim, Deutschland)

3.1.5 Messgeräte

- Fühlerlehre (Bahco, SNA Europe SNS, Eragny-sur-Oise, Frankreich)
- Messschieber (Modell Eventus 50512, Exact GmbH & Co. KG Präzisionswerkzeuge, Remscheid, Deutschland)
- Rotationsrheometer Rheolab UDS 200 (Paar Physica, Stuttgart, Deutschland)

3.1.6 Raumkühlung

- Winkelverbinder Edelstahl (Umformtechnik GmbH, Quedlingburg, Deutschland)
- Polystyrolplatten 5 mm Dicke 1 m x 1 m (Breite x Länge) (Gutta Werke GmbH, Schutterwald, Deutschland)
- Schrauben 4 mm Gewinde (Emil Lux GmbH & Co. KG Wermelskirchen Deutschland)
- Silikon transparent (Soudal NV, Turnhout, Belgien)
- Schraubendreher
- Innsechskantschlüssel
- Edelstahlbolzen
- Acryl-Wasserlack Grau matt (Kwasny GmbH, Gundelsheim, Deutschland)

3.2 FLM Versuchsplanung und Durchführung

Die Versuche mit Kunststoff haben zum Ziel, die Konstruktion im Rahmen der Möglichkeiten zu verbessern. Hierzu wird die zu erwartende Größenabweichung der Bauteile aus den hauptsächlich verwendeten Kunststoffen untersucht. Weiterhin soll die innere Struktur der generierten Ausdrucke verbessert sowie auf Wasserdichtigkeit angepasst werden.

Außerdem sollen die Verwendeten Bauteile virtuell hinterlegt werden, um weitere Anpassungen / Verbesserungen zu ermöglichen. Die Bauteile aus Kunststoff unterliegen permanenter Beanspruchung. Deshalb sollen die Verbrauchskomponenten in einer Weise hinterlegt werden, die die einfache Herstellung von Ersatzteilen ermöglicht.

Die ursprüngliche Version des FoodPrint^{3D} Extruders wurde im Rahmen eines Projektes mit dem Ziel Fondant zu drucken beschädigt (Cisse, 2016). Dies hatte zur Folge, dass die Bauteile (von (Franke, 2016)) Doppelmantelzylinder, Schnecke mit Kegelrad und Deckel nicht weiter nutzbar waren. Um einen Funktionsabgleich mit den neu entworfenen Komponenten möglich zu machen, werden die beschädigten Bauteile zusätzlich neu generiert.

3.2.1 Größenabweichung PLAHT

Gedruckte Bauteile weisen häufig eine Größenveränderung im Vergleich zu ihrem virtuellen Modell auf (betroffen sind vornehmlich deren Breite und Länge). Weiterhin muss zwischen der ersten Schicht und dem Rest des Körpers unterschieden werden. Diese Unterscheidung basiert darauf, dass für die erste Schicht gesondert Extrusionsparameter definiert werden.

Um den Ursprung und das Ausmaß der Veränderung vorherzusagen wird ein einfacher Würfel mit der Kantenlänge 10 mm (Abbildung 20 S.32) gedruckt. Die Größe der ersten Schicht und die der darauffolgenden, werden mit einem Messschieber gemessen.

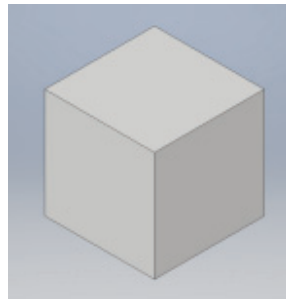


Abbildung 20: Testwürfel Größenabweichung. (Kantenlänge 1 cm)

Von Interesse ist vornehmlich, ob Parameter, die nur indirekt zum Materialfluss beitragen, eine Änderung in der resultierenden Größe hervorrufen. Aus diesem Grund wird der Einfluss der in Tabelle 3 (S.32) aufgeführten Parameter untersucht.

Tabelle 3: Bereich der untersuchten Parameter zur Bestimmung der Größenabweichung.

Parameter	Bereich Anfang	Bereich Ende
Äußere Verschalung	2	4
Temperatur	200 °C	210 °C
Geschwindigkeit	1600 mm /min	2400 mm / min
Größe	Kantenlänge 1 cm	Kantenlänge 2 cm

Die Versuchsgestaltung erfolgt in ECHIP Version 7.0 mittels eines teilfaktoriellen Designs. Genauer basiert der Versuchsplan (siehe Tabelle 4 S.33) auf einem quadratischen Modell. Dieses basiert auf der Annahme, dass die Wirkungen der Parameter im System einen Wendepunkt aufweisen und gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Das Design enthält demnach die Enden der Skalen, sowie den Mittelpunkt der Parameterrange. Es besteht aus 20 Versuchen, von denen 5 wiederholt werden. Die Messung erfolgt in Dreifachbestimmung, demnach werden die 25 Versuche zweifach wiederholt.

Tabelle 4 Versuchsplan Größenabweichung.

Trial	Perimeter	Temperatur in °C	Speed in mm / min	Größe in %
12	2	200	2,400	150
1	2	200	1,600	100
8	2	210	2,400	200
2	4	210	1,600	100
20	2	205	1,600	200
5	2	200	1,600	200
5	2	200	1,600	200
3	4	200	2,400	100
4	2	210	2,400	100
17	3	210	1,600	100
14	4	205	2,000	200
7	4	200	2,400	200
13	3	205	2,400	200
11	2	210	1,600	150
6	4	210	1,600	200
9	4	210	2,400	150
19	2	205	2,400	100
4	2	210	2,400	100
2	4	210	1,600	100
3	4	200	2,400	100
15	3	210	2,000	200
16	3	200	1,600	200
18	4	200	2,000	100
1	2	200	1,600	100
10	4	200	1,600	150

3.2.2 Generierung solider Objekte

Bevor die Generierung der neuen Bauteile für die FoodPrint^{3D} Applikation begonnen werden kann, gilt es, die mechanische Festigkeit der Bauteile zu erhöhen. Im Regelfall werden Objekte nicht gänzlich solide generiert. Sie bestehen aus einer definierten Anzahl an soliden Schichten am Anfang und Ende des Bauteiles sowie einer Schale mit definierter Dicke (Anzahl Outline Perimeter Shells). Der überwiegende Rest des Objektes wird mit einem Gittermuster gefüllt, welches als *Infill* bezeichnet wird. Dieses ist jedoch lediglich für die Generierung von Füllmaterial gedacht und wird so eingestellt, dass die gedruckten Gitter und Verschalung möglichst gut ineinander greifen.

Theoretisch ist es allerdings möglich, die Infill-Generierung so anzupassen, dass mit einer Füllung von 100 % solide Modelle entstehen. Um diesen Anpassbarkeits-Grad zu erreichen, müsste eine eigene Testreihe bezüglich der spezifischen Infill-Parameter (Überlappung, Breite, Länge, Winkel, Geschwindigkeit etc.) erfolgen.

Daher wird hier versucht, durch Variation (siehe Tabelle 6 S.35) der in Tabelle 5 (S.34) aufgeführten Parameter Bauteile solide zu generieren.

Tabelle 5: Parameter Bauteil solidieren.

Parameter	Düsen- durchmesser	Perimeter Shells (Umrandung)	Extrusionsweite	Anzahl der soliden Schichten
Range				
Anfang	0,35 mm	4	0,35 mm	1
Ende	0,5 mm	6	0,5	∞
Schritte	-	1	0,05	-

Zur Beurteilung erfolgt der Druck der Kegelräder mittels unterschiedlicher Düsen-durchmesser bei gleicher Filamentdicke (2,85 mm). Die Extrusionsweiten 0,35 mm und 0,4 mm werden mit der 0,35 mm Düse verwirklicht. Die Weiten 0,45 mm und 0,5 mm werden mit der 0,5 mm Düse gedruckt. Diese Einschränkung erfolgt, da sich die Extrusionsweite nur geringfügig vom Düsendurchmesser entfernen kann.

Die äußeren Schalen werden in Kombination mit der Extrusionsweite an die Geometrie des Doppelmantels angepasst. Ziel ist es die Filamentextrusion für den optimalen Flächenschluss anzupassen. Die Variation der soliden Schichten erfolgt am Modell des Zylinders.

Tabelle 6: Versuchsplanung Bauteile solide generieren.

Versuche:	Parameter 1	Parameter 2	Druckobjekt
1	Düsendurchmesser 0,35 mm	Extrusionsweite 0,35 mm	Kegelrad
2	Düsendurchmesser 0,35 mm	Extrusionsweite 0,40 mm	Kegelrad
3	Düsendurchmesser 0,5 mm	Extrusionsweite 0,45 mm	Kegelrad
4	Düsendurchmesser 0,5 mm	Extrusionsweite 0,50 mm	Kegelrad
5	Perimeter shells 4	Extrusionsweite 0,50 mm	Zylinder
6	Perimeter shells 5	Extrusionsweite 0,45 mm	Zylinder
7	Perimeter shells 5	Extrusionsweite 0,40 mm	Zylinder
8	Perimeter shells 6	Extrusionsweite 0,35 mm	Zylinder
9	Solid layer (Bottom) = 1	Solid layer (Top) = ∞	Zylinder
10	Solid layer (Bottom) = ∞	Solid layer (Top) = 1	Zylinder
11	Solid layer (Bottom) = ∞	Solid layer (Top) = ∞	Zylinder

3.2.3 Wasserdichtigkeit des Doppelmantelzylinders

Der Doppelmantelzylinder der Foodprint^{3D} Applikation stellt bezüglich der Produktion eine besondere Herausforderung dar. Dieser muss nicht nur der mechanischen Beanspruchung durch Halterung und Schnecke, sondern auch dem aufgebauten Wasserdruck in Kombination mit der Temperatur standhalten. Nachdem PLA nur kurzfristig eine Resistenz gegenüber Wasser und höheren Temperaturen aufweist (Pfister, 2016) kommen für dessen Generierung nur PLAHT oder ABS in Frage. Nach dem nur PLAHT für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet ist, wird ein Ausdruck aus ABS zur späteren Nachbearbeitung (Lackierung) erstellt.

Die Bearbeitung dieses Bereiches gliedert sich in einen Teil, in dem die Designparameter des Doppelmantelzylinders festgelegt, und einen Teil, in dem die Nachbearbeitung hingehend der Dichtigkeit und Funktion angepasst werden (Tabelle 7 S.36).

Die Versuche den Doppelmantelzylinder mit Hilfe einer Nachbearbeitung wasserdicht zu gestalten, beziehen sich auf das Aufbringen einer dichtenden Schicht. Hierfür sollen verschiedene *Lacke* und *Kleber* untersucht werden.

Nicht lebensmittelechte Zusätze, werden nur in Bereichen angebracht, die keinen Kontakt zur Druckmasse haben. Die Dichtigkeit des Doppelmantels, wird durch einstündigen Anschluss an ein Thermostat (Haake B12) mit Wasserkreislauf bei 40 °C überprüft.

Tabelle 7: Nachbehandlung der Zylinder mit Lacken, Harzen und Klebern.

Behandlung	Anwendungsgebiet	Trocknungszeit
Lackieren (Klarlack unverdünnt)	Doppelmantel und Außen	72 Stunden
Lackieren (Klarlack verdünnt mit Wasser 1:1)	Doppelmantel und Außen	72 Stunden
Lackieren (Klarlack verdünnt mit Wasser 1:2)	Doppelmantel und Außen	72 Stunden
Lackieren (Kaltglasur)	Zylinder Innenraum und Leckagen	36 Stunden
Dichten (Epoxidharz)	Leckagen Außenseite	36 Stunden
Dichten (Sekundenkleber)	Leckagen Außenseite	2 Minuten

Nachträgliche Temperaturbehandlungen müssen den Kunststoff verflüssigen (PLAHT $T \geq 160$ °C), ohne diesen gänzlich zu schmelzen. Die aus der Verflüssigung resultierende Verformung bzw. Verschmelzung ist jedoch kaum steuerbar. Zudem könnten um einer funktionsstörenden Verformung vorzubeugen ausschließlich die äußeren Bereiche so behandelt werden. Diese Einschränkung würde aber keinen dauerhaft dichtenden Effekt zulassen.

Die Oberfläche im Doppelmantel könnte auf chemischem Weg gelöst und anschließend wieder verfestigt werden. Die zum Einsatz kommenden Chemikalien greifen kleinere Geometrien stärker an. Nachdem nicht garantiert werden kann, dass diese in einen existierenden Hohlraum eindringen und die Schwierigkeit der Reaktionssteuerung, machen diese Art der Nachbehandlung wenig erfolgsversprechend. Um die strukturelle Integrität des Doppelmantels nicht zu gefährden, wird von einer nachträglichen chemisch- oder temperaturbedingten Verschmelzung der Schichten abgesehen.

3.2.4 Bauteilgenerierung der FoodPrint^{3D} Applikation

Die Entwürfe aus dem vorangegangenen Projekt von Tobias Franke werden bezüglich ihrer Funktionalität angepasst. Die Bauteile werden in Inventor Professional 2017 designt, um eine nachträgliche Anpassung gewährleisten zu können.

Der Fokus liegt ferner darauf, die Nachbearbeitung möglichst gering zu halten, um Ersatzteile ohne großen Aufwand replizieren zu können. Außerdem wird eine außerordentlich temperaturstabile Version des Doppelmantelzylinders angestrebt.

Bezüglich der Ersatzteilgenerierung sollen die Bauteile so hinterlegt werden, dass diese ohne Vorkenntnisse neu gedruckt werden können. Hierfür werden diese als STL-File und G-Code mit zugehöriger Anleitung hinterlegt. Ferner werden die Prozessparameter für eine möglichst einfache Erstellung optimiert.

3.2.5 Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung der Bauteile soll ausschließlich mechanisch erfolgen. Es soll ein möglichst effektiver Weg gefunden werden, die Bauteile von überschüssigem Material zu befreien (Filament Fäden, Erhebungen). Außerdem werden verschiedene Instrumente untersucht, um die Förderschnecke bezüglich ihrer Lauffähigkeit zu präparieren. Auf den Einsatz von speziellen Maschinen soll indes verzichtet werden, nachdem nicht erwartet werden kann, dass diese für durchschnittliche Anwender zugänglich sind. Daher soll die Funktionalität von Schleifpapier, Feilen und einer Fräse (in Abbildung 21 Seite 38 dargestellt), die als Druckerzusatz erhältlich ist, untersucht werden.

Die Fräse wird hier von Hand bedient und kann mit verschiedenen Köpfen unterschiedlicher Rauigkeit bestückt werden. Es werden Edelkorund-Schleifstifte sowie Messing-Reinigungsbürsten zur Nachbearbeitung eingesetzt. Die Drehgeschwindigkeit ist von 5.000 bis 22.000 Umdrehungen / Minute einstellbar.

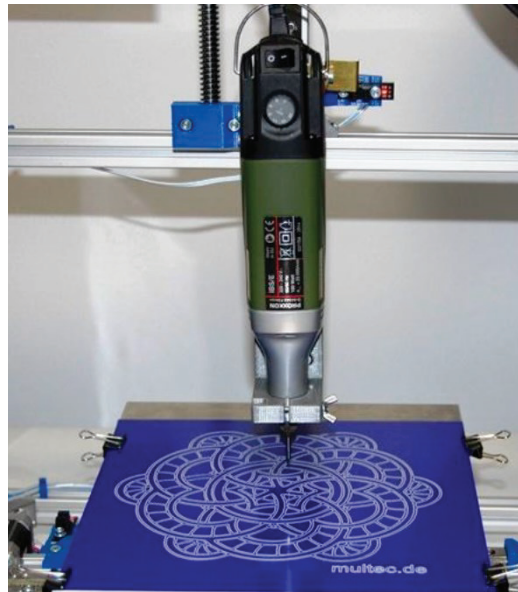


Abbildung 21: Fräse Proxon Micromot System an einem 3D-Drucker.¹²

3.3 Lebensmitteldruck Versuchsplanung und Durchführung

Die Versuche mit der FoodPrint^{3D} Applikation dienen der Optimierung des Drucks von Fettsuspensionen mit Kakaoanteil. Außerdem soll die Verfahrensweise angepasst und verbessert werden. In den vorangegangenen Projekten von Franke und Kaiser wurden vornehmlich Objekte gedruckt, die nur aus einer äußeren Umrandung (z.B. Vasen, Zylinder) bestehen. Hier sollen nun der verwirklichte Detailgrad, und die Modellauslegung untersucht werden.

3.3.1 Herstellung der Druckmasse

In Kooperation mit Robert Kaiser soll eine für den 3D-Druck optimierte kakaohaltige Überzugsmasse hergestellt werden. Hierzu werden Puderzucker, entöltes Kakaopulver und Kokosfett in einer Rotationskugelmühle feinvermahlen. Der Austausch von Kakaobutter mit Kokosfett ermöglicht eine Verwendung ohne Temperierung, und Reduktion der Fettreifbildung (Kaiser, 2016).

¹² (Multec GmbH, 2014)

Um eine Extrusion zu ermöglichen, müssen die Partikel auch bei Bildung kleiner Agglomerate kleiner als der eingesetzte Düsendurchmesser sein. Hierzu wird eine Partikelgröße von kleiner als 30 Mikrometer angestrebt. Die Partikel sollten jedoch nicht feiner als nötig gemahlen werden, nachdem eine Reduktion der Partikelgröße einen steigernden Einfluss auf die Viskosität der Masse hat (Beckett, 1999). Die Viskosität soll einer Referenzprobe Dr. Oetker „Weiße Kuvertüre“ durch den Zusatz von Kokosfett angeglichen werden.

3.3.2 Maximale Viskosität der Druckmasse

Durch schrittweise Zugabe von Kokosfett zu einer nicht druckfähigen Masse (Fettgehalt 38,47 %) soll die maximale Viskosität der Fettsuspension ermittelt werden. Der Masse werden schrittweise 0,5 % Kokosfett zugegeben und deren Fließeigenschaften mittels eines Rotationsrheometers in Dreifachbestimmung gemessen. Jede Probe wird auf ihre Druckfähigkeit untersucht, wobei eine vertretbare Extrusion angestrebt wird. Weiterhin soll die Masse soweit aufgefettet werden, bis sich daraus negative Folgen für den Druck ergeben. Dadurch sollen Anpassung des Fettgehaltes und damit der Fließeigenschaften der Druckmasse erleichtert werden.

Die Messung der Fließeigenschaften erfolgt in Dreifachbestimmung, mittels des Rotationsrheometer Rheolab UDS 200 und der zugehörigen Software (Physica US 200). Bei dieser Methode wird die aufgeschmolzene Masse (50°C), bis zu einer angebrachten Begrenzung, in einen temperierten (40 °C) Zylinder gefüllt. Anschließend wird ein konisch abschließender Zylinder eingefahren und die Kraft bei unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten gemessen. Abbildung 22 (S.40) zeigt ein solches System. Die Viskosität (η) wird aus der Kraft, die der Motor benötigt ($\tau = \text{Kraft pro Fläche}$) um eine vorgegebene Scherrate (γ in 1 / s) zu erreichen errechnet ($\eta = \frac{\tau}{\gamma}$). Die Messung erfolgt mit unterschiedlichen Scherraten.

Nicht newtonische Fluide müssen einer Kraft ausgesetzt werden, bevor diese zu fließen beginnen.

Nachdem die untersuchte Masse zu diesen Fluiden zählt, wird aus den gemessenen Schubkräften / Scherrate die Fließgrenze und die unendliche Viskosität nach Casson errechnet. Die Casson-Fließgrenze (τ_0) gibt Mindestschubspannung an, bis die Masse fließt. Die Casson-Viskosität (η_c) entspricht der dynamischen Viskosität bei unendlichem Schergefälle. (Beckett, 1999)

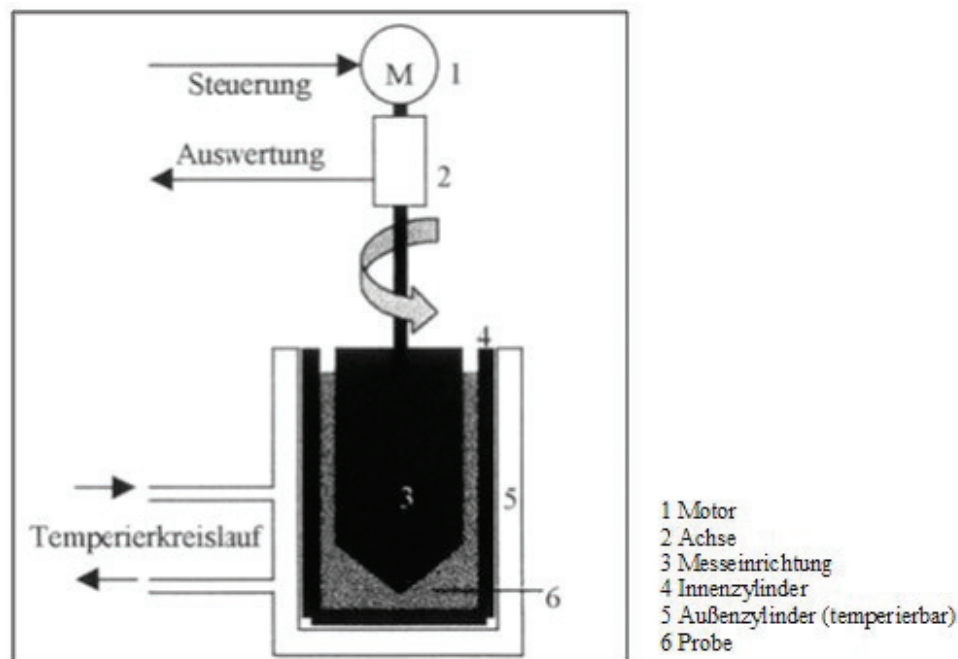


Abbildung 22: Aufbau Koaxial Rheometer (Römis, 2012).

3.3.3 Untergrundbeschichtung

Für den Druck von Kunststofffilamenten wird das Druckbett mit einer haftungserhöhenden Schicht (Blue Tape) überzogen. Dieses ist jedoch nicht lebensmittelecht, weshalb es als Untergrund für den „Schokoladendruck“ ausscheidet. Lebensmittel wiesen in den Vorversuchen keinen auffälligen Warpingeffekt auf, weshalb keine Haftungerhöhung von Nöten ist. Allerdings weisen gedruckte Fettsuspensionen nur eine geringe Druckresistenz auf. Beim Entfernen eines solchen Modells wird dementsprechend sehr leicht dessen Oberfläche beschädigt.

Deshalb werden verschiedene mögliche Druckbettüberzüge; Backpapier, Klarsichtfolie, Aluminiumfolie und lebensmittelechtes Verpackungsmaterial (Kunststoff) in Kombination mit einer Marmorplatte getestet. Ziel ist es die Druckpräparation sowie die Entfernung des Modelles möglichst simpel zu gestalten.

3.3.4 Detailgrad und Bauteilauslegung

Durch den Druck verschiedener Modelle soll der zu erreichende Detailgrad sowie die minimal erreichbare Bauteilgröße herausgefunden werden (Tabelle 8 S.41). Ferner soll die Fähigkeit der Druckmasse, freie Räume zu überspannen, eruiert werden. Diese Versuche sollen die Bauteilauslegung für den Druck von Fettsuspensionen sowie die nötigen Parameteranpassungen verbessern. Die Abbildung 23 und Abbildung 24 (S.42) zeigen zwei Modelle, die für diese Art der Prozessanpassung gewählt wurden.

Tabelle 8: Versuche Detailgrad und Bauteilauslegung

Versuch	Extrusionsmultiplier	Düsentemperatur	Bauteilgröße	Füllung
Vorversuch	5 * (900 mm / min)	26	Abbildung 23 (S.42)	50 %
1	8* (900 mm / min)	28	Abbildung 23 (S.42)	90 %
2	8* (900 mm / min)	28	Abbildung 24 (S.42)	Solide
3	7* (900 mm / min)	30	Abbildung 23 (S.42)	90 %
4	6* (900 mm / min)	32	Abbildung 23	90 %



Abbildung 23: Einkaufschip Design (Steinke, 2016). Größe 20 mm x 5 mm (Durchmesser x Höhe)

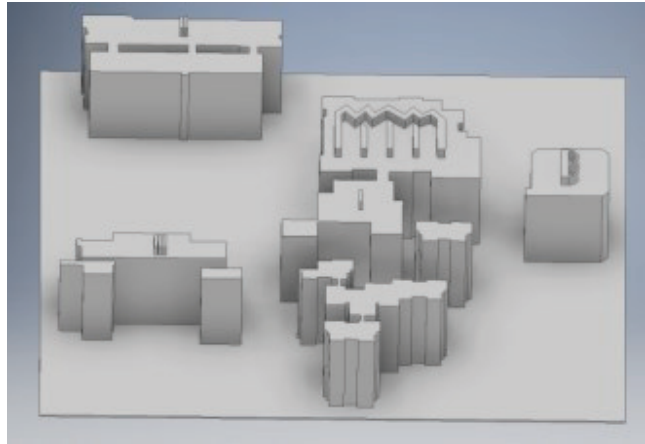


Abbildung 24: Einfaches Modell des Campus der HS Neubrandenburg. Größe: 2 cm x 2 cm x 1 cm (B x L x H)

3.4 Konstruktion der Raumkühlung

Der bisherige Versuchsaufbau sah vor, dass das Druckbett über einen direkt darauf gerichteten Kühlluftstrom von einer oder zwei Seiten gekühlt wird (Abbildung 25 S.43). Durch das direkte Anblasen des Objektes kann es schnell zur Bildung einer wellenartigen Struktur auf der Oberfläche des extrudierten Lebensmittels kommen.

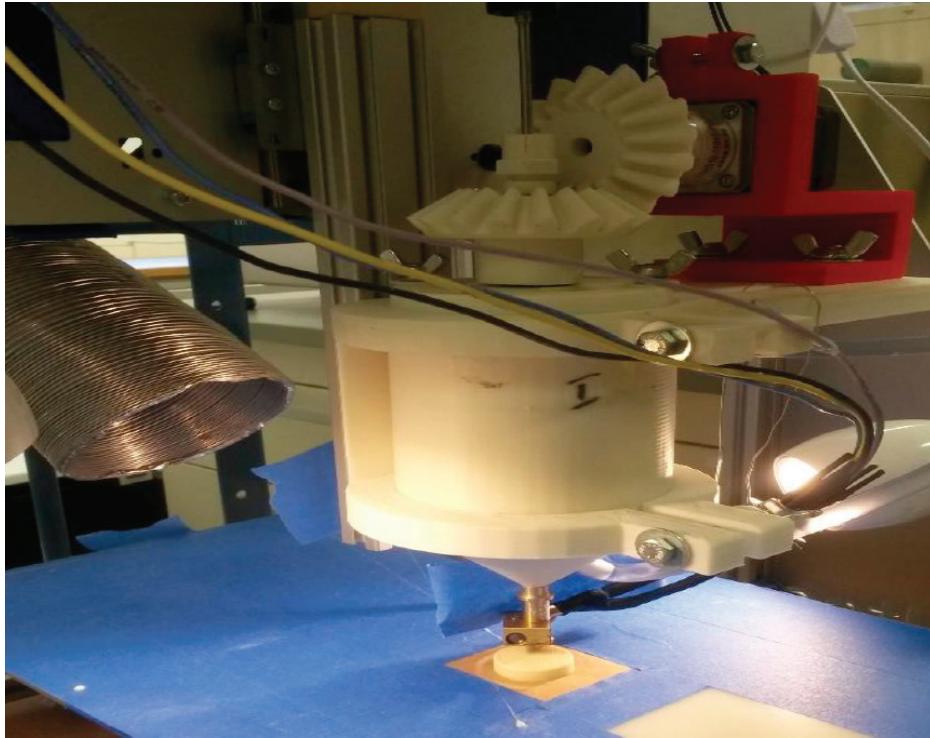


Abbildung 25: FoodPrint^{3D} Applikation mit direkter Luftströmung (Franke, 2016). Durch das silberne Rohr (links oben) wird das Objekt direkt mit kalter Luft angestrahlt. Das Blue Tape an der Messingdüse soll ein Auskühlen der Druckmasse beim Durchlaufen der unbeheizten Messinggewinde verhindern.

Ferner wird bei hohen Außentemperaturen z.B. im Sommer eine sehr große Kühlleistung benötigt, damit das gedruckte Material aushärtet. Um eine gleichmäßigere Lufttemperatur zu gewährleisten, bietet es sich daher an, den Drucker mit einer Verschalung zu umgeben, die in der Lage ist, eine niedrigere Temperatur gleichbleibend zu halten. Aus diesem Grund wird der vormals offene Versuchsstand auf einer Holzkonstruktion untergebracht. Auf dieser wird ein Plexiglaskasten mit den Maßen 56 cm x 80 cm x 100 cm (Breite x Länge x Höhe) angebracht. Der Kasten soll an einer Seite durch eine Tür zugänglich sein und wird bis zu 60 cm Höhe mit Silikon abgedichtet. Nachdem die kalte Luft am Boden die wärmere nach oben verdrängt, wird ein Deckel nur lose aufgesetzt. Ziel ist eine kontinuierliche Kühlung des Objektes zu gewährleisten, ohne dass ein Kühlluftstrom aus geringer Distanz auf das Druckbett gerichtet ist.

3.5 Anpassung der Firmware

Um den Drucker den Abmessungen der Raumkühlung anzupassen, ist es erforderlich, das Buildvolumen geringfügig anzupassen. Ferner soll die Sensorabkühlzeit von 90 Sekunden reduziert werden. Diese Abkühlzeit tritt nach der Achsennivellierung und direkt vor der Druckbettabtastung (4 Messpunkte) in Kraft. Durch die Änderung der Druckbettgröße müssen die Punkte zur Messung der Druckbettschiefstellung neu definiert werden. Die Programmierung der Änderungen erfolgt in *Arduino* und wird anschließend über den emulierten Port (Druckerzugang) auf den Mikrocontroller der Steuerplatine aufgespielt. Bevor jedoch Änderungen an der im Einsatz befindlichen Firmware vorgenommen werden, wird von der ursprünglichen Version eine Sicherungskopie erstellt. Alle Änderungen in der Firmware werden mit einem Kommentar versehen, um diese zurückverfolgbar zu gestalten. Die eingefügten Kommentare fangen Grundsätzlich mit „#original“ an. Im [elektronischen Anhang](#), findet sich die angepasste Firmware sowie die Sicherungskopie.

3.6 Troubleshooting

Im Rahmen des Projektes sollen häufig vorkommende Fehler behoben, sowie deren Ursache ergründet werden. Insbesondere betrifft das den Versatz von Bauteilen, den Druckabbruch, Warping, Abstürze des Hostprogrammes, Fehler beim Laden von Druckprofilen in Simplify3D, fehlende Materialextrusion und die „falsche“ Darstellung des G-Codes. Obwohl ein großer Teil der praktischen Umsetzung in der Lösung auftretender Fehler bestand, können in dieser Arbeit jedoch nur die wichtigsten Fehlerursachen dokumentiert werden. Aus diesem Grund befindet sich im [elektronischen Anhang](#) ein Troubleshooting Guide für das eingesetzte System. Dieser soll künftigen Nutzern die Fehlersuche vereinfachen und im Rahmen weiterer Projekte fortgeführt werden.

4. Ergebnisse und Auswertung

4.1 Kunststoff (FLM)

4.1.1 Größenabweichung PLAHT

Um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, wurde weitestgehend auf eine Neujustierung des Düsenabstandes verzichtet. Nachdem die Justierung bei längerem Gebrauch jedoch an Genauigkeit verliert, erfolgte bei den Versuchen 9, 16, 18 und 19 (gelb hinterlegte Felder) eine neue Einstellung des Düsenabstandes von 0,2 mm. Die gemessenen Absolutwerte können der Tabelle 9 (S.45) entnommen werden.

Tabelle 9: Messwerte der Größenabweichung in mm. Die Abweichung war symmetrisch, daher erfolgte die Messung jeweils nur an einer Seite. Wiederholungen sind mit „I“ nach der Zahl gekennzeichnet.

Trial	Messung 1 erste Schicht	Messung 2 erste Schicht	Messung 3 erste Schicht	Messung 1 Körper- mitte	Messung 2 Körper- mitte	Messung 3 Körper- mitte
12	0.5	0.55	0.35	0.35	0.25	0.35
1I	0.45	0.45	0.45	0.3	0.35	0.3
1	0.4	0.45	0.45	0.3	0.35	0.35
8	0.65	0.65	0.65	0.35	0.3	0.35
2	0.75	0.8	0.75	0.4	0.35	0.35
2I	0.8	0.75	0.75	0.35	0.4	0.4
3	0.7	0.65	0.7	0.35	0.4	0.4
3I	0.7	0.75	0.7	0.35	0.4	0.4
4	0.65	0.65	0.65	0.3	0.3	0.25
4I	0.65	0.65	0.7	0.25	0.25	0.3
20	0.6	0.45	0.55	0.2	0.15	0.15
17	0.75	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3
14	0.7	0.7	0.65	0.2	0.3	0.25
7	0.6	0.65	0.6	0.3	0.35	0.3
10	0.5	0.55	0.55	0.3	0.25	0.3
5	0.5	0.4	0.45	0.3	0.25	0.25
5I	0.45	0.45	0.5	0.25	0.25	0.3
13	0.75	0.7	0.8	0.25	0.35	0.25
11	0.7	0.75	0.7	0.25	0.35	0.35
6	0.65	0.7	0.7	0.2	0.3	0.3

9	0.8	0.8	0.75	0.5	0.5	0.35
19	0.35	0.4	0.35	0.35	0.4	0.35
18	0.4	0.45	0.4	0.4	0.35	0.3
16	0.5	0.4	0.25	0.3	0.15	0.15
15	0.8	0.75	0.75	0.3	0.3	0.25

Es zeigte sich, dass alle Bauteile die gleiche Größenveränderung von plus 0,5 mm in Richtung der Z-Achse aufweisen. Im Folgenden sind die Ergebnisse der relativen Abweichung in X- und Y-Richtung dargestellt, getrennt betreffend des ersten Layers und des restlichen Körpers. Eine Aufstellung der gemessenen Relativwerte kann dem Anhang I entnommen werden.

Größenabweichung der ersten Schicht

Tabelle 10: Auswertung der relativen Größenabweichung der ersten Schicht. Für eine feinere Auswertung der Auswirkungen, können die „Zeilen“ entfernt werden, welche eine geringe Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung (P) aufweisen. Das Auswertungsmodell konnte nicht weiter angepasst werden, da Veränderungen zu Programmabstürzen führten. SD entspricht der Standardabweichung des ausgewerteten Terms, P = 1-Wahrscheinlichkeit der Einflussnahme.

COEFFICIENTS	SD	P	TERM
2.29376			CONSTANT
-0.0726902	0.213672	0.7350-	1 Perimeter
0.161397	0.0414413	0.0003	2 Temperatur
0.000679258	0.000511196	0.1892	3 Speed
1.15608	0.404037	0.0059	4 Größe
-0.106672	0.0443953	0.0195	5 Perimeter*Temperatur
0.000395895	0.000534071	0.4616-	6 Perimeter*Speed
0.0634976	0.423441	0.8813-	7 Perimeter*Größe
-0.000106807	0.000110345	0.3372-	8 Temperatur*Speed
0.222042	0.0899009	0.0165	9 Temperatur*Größe
-0.000259129	0.00104603	0.8052-	10 Speed*Größe
-0.427687	0.484784	0.3814-	11 Perimeter^2
0.0510356	0.0197543	0.0124	12 Temperatur^2
6.7082e-006	3.65235e-006	0.0715	13 Speed^2
2.72069	1.85959	0.1489	14 Größe^2

Aus der in Tabelle 10 (S.46) aufgeführten Auswertung kann die folgende Systemgleichung erstellt werden. Wobei die Größe in cm, die Geschwindigkeit in mm / min, die Temperatur in °C und die Anzahl der „Outline Perimeter“ eingesetzt werden.

$$\begin{aligned} \text{Abweichung in \%} = & 2,72(\text{Größe}^2) + 6,7 * 10^{-6}(\text{Speed}^2) + 0,05(\text{Temperatur}^2) \\ & - 0,43(\text{Perimeter}^2) - 2,6 * 10^{-4}(\text{Speed} * \text{Größe}) + 0,22(\text{Temperatur} * \text{Größe}) \\ & - 1,1 * 10^{-4}(\text{Temperatur} * \text{Speed}) + 0,06(\text{Perimeter} * \text{Größe}) \\ & + 4,0 * 10^{-4}(\text{Perimeter} * \text{Speed}) - 0,11(\text{Perimeter} * \text{Temperatur}) \\ & + 1,2(\text{Größe}) + 6,8 * 10^{-4}(\text{Speed}) + 0,16(\text{Temperatur}) - 0,07(\text{Perimeter}) + 2,3 \end{aligned}$$

Wird das System auf die Variablen reduziert, welche die höchste Wahrscheinlichkeit („P < 0,2“) besitzen die Abweichung zu beeinflussen, ergibt sich das vereinfachte Modell:

$$\begin{aligned} \text{Abweichung in \% vereinfachtes System} = & 2,72(\text{Größe}^2) + 6,7 * 10^{-6}(\text{Speed}^2) \\ & + 0,05(\text{Temperatur}^2) + 0,22(\text{Temperatur} * \text{Größe}) - 0,11(\text{Perimeter} * \text{Temperatur}) \\ & + 1,2(\text{Größe}) + 6,8 * 10^{-4}(\text{Speed}) + 0,16(\text{Temperatur}) + \text{Konstante} \end{aligned}$$

Dieses zeigt sich jedoch als zu ungenau, um die relative Größenabweichung vorherzusagen.

Es zeigte sich, dass die Temperatur sowie die Größe des Modells den größten Einfluss besitzen (Abbildung 27 S.49). Die Anzahl der äußeren Schalen wirkt ebenfalls auf die entstehende Größenabweichung der ersten Schicht aus (Abbildung 26 S.48). Der Einfluss der Druckgeschwindigkeit ist bei der ersten Schicht nicht stark ausgeprägt. Der mangelnde Einfluss der Druckgeschwindigkeit, kann auf die Standardeinstellungen für den Druckanfang zurückgeführt werden. Der erste Layer wird grundsätzlich langsamer (50 %) als der Rest des Körpers gedruckt. Zusätzlich erfolgt für die Verschalung eine Reduktion der Geschwindigkeit, um einen definierten Faktor pro Verschalungseinheit (Extrusionsweite). Die jeweils erfolgten Geschwindigkeits-reduktionen dienen ausschließlich dem Zweck, die Haftung des Filaments zu erhöhen und genauere Oberflächen zu generieren.

Dies geschieht dadurch, dass dem Material mehr Zeit bleibt, um sich mit der Oberfläche, auf welche extrudiert wird, zu verbinden. Außerdem härtet der Filamentstrang stärker aus, bevor eine „Zugbelastung“ durch das „wandern“ der Düse hervorgerufen werden kann.

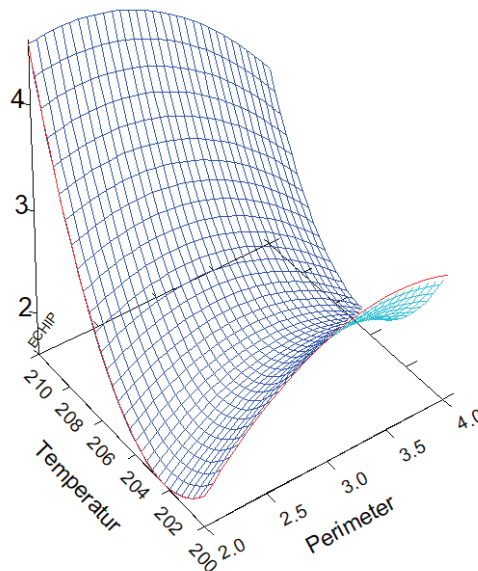


Abbildung 26: Größenabweichung der ersten Schicht 3D Surfaceplot der Temperatur und Verschalung. Auf der Z-Achse ist die relative Größenabweichung, die Temperatur ist in °C und die Perimeter sind in Anzahl Verschalungen. Off-Axis Parameter: Größe = 1,5 cm; Geschwindigkeit 2000 mm / min. Erstellt mit ECHIP 7.0

In der Grafik sind zwei unterschiedliche Verhaltensbereiche der Parameter erkennbar. Die geringsten Abweichungen werden für eine Temperatur von 203 °C erhalten. Steigt die resultierende Größenabweichung mit der Anzahl der Schalen bei sinkender Temperatur von 200 °C – 203 °C. Im Bereich 203 °C – 210 °C generieren geringere Verschalungen größere Abweichungen. Der Temperaturanstieg verläuft näherungsweise linear mit dem Anstieg der zu erwartenden Abweichung, im Bereich 200 °C – 203 °C. Im Bereich 200 °C – 203 °C verhält sich die Abweichung umgekehrt proportional zur Temperatur. Die geringste Abweichung wird bei 203 °C und 2 Verschalungen erreicht.

In **Abbildung 26** wird der Einfluss der Temperatur und der Anzahl äußerer Schalen gezeigt. Das Temperaturoptimum entspricht hierbei einem Tiefpunkt der resultierenden Abweichung. Im Hochtemperaturbereich, werden höhere Abweichungen erreicht. Diese sinken mit der Anzahl der äußeren Schalen. Bei niedrigem Temperaturniveau wird die geringste Abweichung mit 2 Schalen und steigender Temperatur erreicht. Ferner steigt die Abweichung bis 3 Schalen, die gedruckt werden, und sinkt danach langsam ab. Demnach liegt der Hochpunkt des Einflusses der äußeren Schalen bei hohen Temperaturen bei 2 und im niedrigen Temperaturbereich bei 3 Schalen.

Die höheren Abweichungen im Hochtemperaturbereich können dadurch erklärt werden, dass die Fließfähigkeit des Materials über die Temperatur stark beeinflusst wird. Nachdem das Filament bei höheren Temperaturen flüssiger ist, läuft der extrudierte Kunststoff breit, bevor er sich weit genug verhärtet. Der Einfluss der Schalen kann hier nur über die sinkende Geschwindigkeit bei jeder zusätzlichen Schale erklärt werden.

Im niedrigen Temperaturbereich kann die steigende Abweichung bei sinkender Temperatur nur über einen möglichen Versuch der Software die höhere Viskosität des Kunststoffes durch ein mehr an Extrusion auszugleichen erklärt werden. Für den Einfluss der äußeren Schalen konnte bisher keine Erklärung gefunden werden.

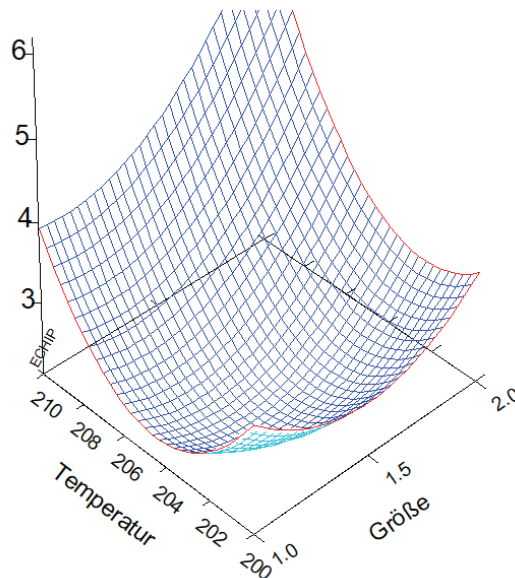


Abbildung 27: Größenabweichung der ersten Schicht 3D Surfaceplot der Temperatur und Größe. Auf der Z-Achse ist die relative Größenabweichung, die Temperatur ist in °C und die Größe in cm (Kantenlänge des Würfels). Off-Axis Parameter: Perimeter 3; Geschwindigkeit 2000 mm / min. Erstellt mit ECHIP 7.0
Die Grafik zeigt, dass die Temperatur sowie die Größe einen parabelartigen Einfluss auf die resultierende Abweichung besitzen. Die Tiefpunkte sind jeweils in der Mitte der untersuchten Range (205°C und 1,5 cm)

Der Plot der relativen Größenabweichung in Abhängigkeit der Temperatur und Größe zeigt, dass beide Parameter ein parabelartiges Verhalten aufweisen. Die geringste Abweichung wird bei einer Kantenlänge von 1,5 cm und einer Temperatur von 203 °C erhalten.

Das Temperaturoptimum ist von den äußeren Schalen abhängig und verschiebt sich nahezu linear mit deren Anzahl. Auch hier kann beobachtet werden, dass bei gleicher Entfernung vom Optimum, eine höhere Abweichung im Hochtemperaturbereich entsteht.

Der parabelförmige Einfluss der Modellgröße, kann in der untersuchten Range durch die zusätzliche Extrusion, welche für die erste Schicht definiert ist, erklärt werden. Die steigende Größenabweichung für kleine Kantenlängen resultiert vermutlich aus einem Zusammenspiel mit der Temperatur und dem Verhältnis der Modellgröße zum Düsendurchmesser. Das Verhalten für hohe Kantenlängen kann durch Materialüberlappung erklärt werden. Dabei wird durch jede zusätzliche Schale das Material nach außen gedrückt. Es ist davon auszugehen, dass die Bauteilgröße einen endlichen Einfluss besitzt. Dieser Endpunkt liegt jedoch außerhalb der gemessenen Range und konnte nicht ermittelt werden.

Größenabweichung Körper

Tabelle 11: Auswertung der relativen Größenabweichung des Körpers. SD entspricht der Standardabweichung des ausgewerteten Terms, P = 1- Wahrscheinlichkeit der Einflussnahme.

COEFFICIENTS	SD	P	TERM
1.13983			CONSTANT
-0.128006	0.112618	0.2604-	1 Perimeter
0.0144156	0.021842	0.5119-	2 Temperatur
0.000593614	0.00026943	0.0316	3 Speed
0.00810334	0.212951	0.9698-	4 Größe
-0.0290202	0.0233989	0.2200-	5 Perimeter*Temperatur
7.40644e-005	0.000281487	0.7934-	6 Perimeter*Speed
-0.145537	0.223178	0.5170-	7 Perimeter*Größe
6.0866e-006	5.81583e-005	0.9170-	8 Temperatur*Speed
0.109789	0.047383	0.0241	9 Temperatur*Größe
0.000160304	0.000551316	0.7723-	10 Speed*Größe
0.123189	0.255509	0.6316-	11 Perimeter^2
0.0334692	0.0104117	0.0022	12 Temperatur^2
8.52274e-007	1.925e-006	0.6596-	13 Speed^2
1.1433	0.980111	0.2483-	14 Größe^2

Aus der in Tabelle 11 (S.50) aufgeführten Auswertung kann die folgende Systemgleichung erstellt werden. Wobei die Größe in cm, die Geschwindigkeit in mm / min, die Temperatur in °C und die Anzahl der „Outline Perimeter“ eingesetzt werden.

$$\begin{aligned}
 \text{Abweichung in \%} = & 1,14(\text{Größe}^2) + 8,5 * 10^{-7}(\text{Speed}^2) + 0,03(\text{Temperatur}^2) \\
 & + 0,12(\text{Perimeter}^2) + 1,6 * 10^{-4}(\text{Speed} * \text{Größe}) + 0,11(\text{Temperatur} * \text{Größe}) \\
 & - 6,1 * 10^{-6}(\text{Temperatur} * \text{Speed}) - 0,14(\text{Perimeter} * \text{Größe}) \\
 & + 7,4 * 10^{-5}(\text{Perimeter} * \text{Speed}) - 0,03(\text{Perimeter} * \text{Temperatur}) \\
 & + 0,01(\text{Größe}) + 5,9 * 10^{-4}(\text{Speed}) + 0,01(\text{Temperatur}) - 0,12(\text{Perimeter}) + 1,14
 \end{aligned}$$

Die Maßabweichung des gedruckten Objekts nach der ersten Schicht wird vornehmlich von der Druckgeschwindigkeit beeinflusst. Zusätzlich wirken sich auch die Temperatur und die Größe mit nicht zu vernachlässigendem Einfluss aus. Diese wirken auf gleiche Weise wie bei der ersten Schicht. Abbildung 28 (S.52) zeigt den Einfluss der Druckgeschwindigkeit und der Größe.

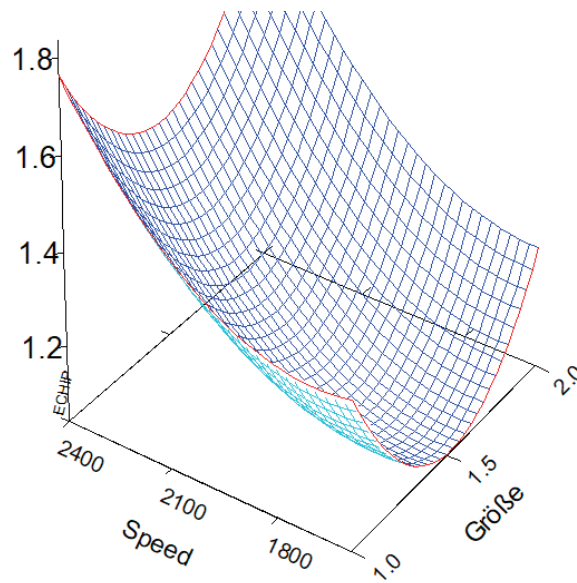


Abbildung 28: Größenabweichung des Körpers 3D Surfaceplot der Geschwindigkeit und Größe. Auf der Z-Achse ist die relative Größenabweichung, die Geschwindigkeit ist in mm / min und die Größe in cm (Kantenlänge des Würfels). Off-Axis Parameter: Verschalung = 3; Temperatur = 205°C. Erstellt mit ECHIP 7.0

Bei der Geschwindigkeits- und Größenvariation können für diese Parameter unterschiedliche Auswirkungen beobachtet werden. Die Größe wirkt sich parabelartig auf die resultierende Abweichung des gedruckten Modells aus, wobei der Tiefpunkt bei 1,5 cm liegt. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu steigenden Abweichungen.

Es zeigte sich, dass die resultierende Abweichung mit steigender Geschwindigkeit ansteigt. Im Gegensatz dazu weist die Größe des Modelles ein Optimum bei 1,5 cm auf. Die Abweichung steigt für größere Kantenlängen bei steigender Geschwindigkeit steiler. Der Einfluss der Temperatur in Verbindung mit der Druckgeschwindigkeit auf die Abweichung wird in [Abbildung 29 \(S.53\)](#) dargestellt.

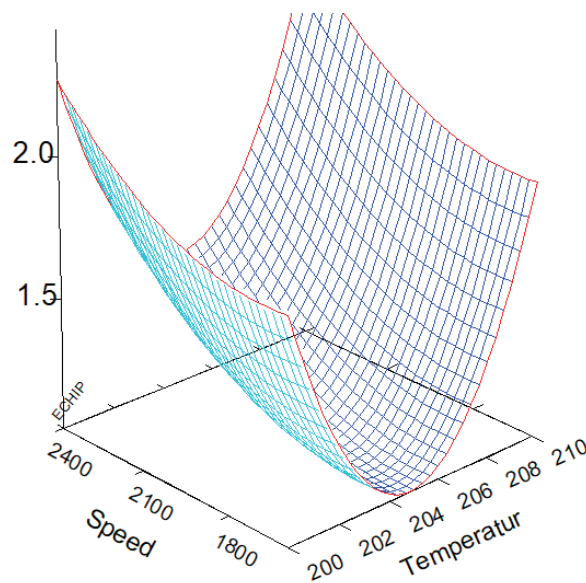


Abbildung 29: Größenabweichung des Körpers 3D Surfaceplot der Geschwindigkeit und Temperatur. Auf der Z-Achse ist die relative Größenabweichung, die Geschwindigkeit ist in mm / min und die Temperatur in °C. Off-Axis Parameter: Verschalung = 3; Größe = 1,5 cm. Erstellt mit ECHIP 7.0

Die Temperatur zeigt einen parabelartigen Einfluss, mit einem Tiefpunkt bei 205 °C. Die resultierende Abweichung steigt mit steigender Geschwindigkeit. Dieser Effekt ist für hohe Temperaturen stärker ausgeprägt.

Im Gegensatz zur ersten Schicht resultiert die Abweichung vornehmlich aus der Druckgeschwindigkeit. Der Einfluss resultiert vermutlich aus der kürzeren Zeit die dem Filament zum Verfestigen zur Verfügung steht. Diese These wird durch die Beeinflussung durch die Temperatur sowie der Größe gestützt.

In diesen Versuchen wurden die Objekte mit einer Füllstruktur von 50 % generiert. Es ist davon auszugehen, dass alle Effekte, die auf Materialverdrängung, zusätzlicher Materialextusion oder veränderter Viskosität beruhen, in soliden Körpern stärker in Erscheinung treten.

Für die Standardprofile können mit diesem Versuch die in Tabelle 12 (S.54) ersichtlichen Abweichungen geschätzt werden. Es ist zu beachten, dass sich diese Abweichung auf jede Seite (Würfelkante) bezieht und daher bei runden Geometrien mit der doppelten Abweichung in X- und Y-richtung gerechnet werden muss.

Tabelle 12: Kalkulierbare Größenabweichung bei der Arbeit mit Standardprofilen.

Parameter	Standard PLAHT
Äußere Verschalung	3
Temperatur	205 °C
Geschwindigkeit	2000 mm /min
Abweichung erste Schicht	(0,263) mm
Abweichung Struktur >2 cm	0,1 mm
Abweichung Struktur <1 cm	(0,14) mm

4.1.2 Generierung solider Objekte

Durch die Variation der Düsendurchmesser und damit verbunden der Extrusionsweite, Anzahl solider Schichten (Top-, Bottom- solid Layer) und Dicke der äußeren Umrandung sollen solide Bauteile möglichst stabil generiert werden. Es wurden Düsen mit einem Durchmesser von 0,35 mm und 0,5 mm Durchmesser genutzt. Bei der Anpassung solider Schichten wurde deren Anzahl zum einen auf Höhen, die Größer und zum anderen auf die exakte Höhe des Bauteiles ausgelegt.

Die 0,35 mm Düse kann mittels eines dünneren Filaments betrieben werden. Dies ermöglicht eine feinere Abstufung und kann dazu eingesetzt werden, den höchsten realisierbaren Detailgrad zu erreichen. Allerdings führen Verringerungen des Düsendurchmessers auch zu längeren Laufwegen für jede Schicht und damit längeren Druckzeiten. Die Bauteile der FoodPrint^{3D} Applikation sind in Bezug auf das Buildvolumen des Multirap M420 große Bauteile und benötigen bis zu 70 Stunden zur Generierung. Diese hohen Erschaffungszeiten entstehen durch den soliden Druck sowie eine Reduktion der Bewegungs- und Extrusionsgeschwindigkeit, um die Bauteilhaftung zu garantieren. Hohe Objekte können sich ansonsten durch geschwindigkeitsbedingte Erschütterungen ablösen.

Es zeigte sich visuell keine merkliche Verbesserung der Oberfläche, bei Wahl der 0,35 mm Düse. Zusätzlich gestaltet sich die Extrusionsweite bei verwenden eines 2,85 mm dicken Filaments bei kleineren Düsendurchmessern nicht kontinuierlich vorhersagbar. Dementsprechend wurde die Generierung der FoodPrint^{3D} Komponenten mittels der 0,5 mm Düse und daraus resultierend 0,5 mm Extrusionsweite durchgeführt.

Die Dicke der äußeren Umrandung wurde anhand verschiedener spezieller Geometrien, wie der Dicke des Doppelmantelzylinders angepasst. Hierbei konnte beobachtet werden, dass bei schmalen Geometrien wie den Zwischenwänden minimale Abweichung der Extrusion kleinere Hohlräume zur Folge haben (Abbildung 30 S.55). Nachdem diese mit Luft gefüllt bleiben und sich deren Volumen bei Temperaturänderung drastisch ändert, stellen diese eine strukturelle Schwäche dar.



Abbildung 30: Zoom auf eine stark betroffene Stelle.

Nachdem die Wandstärke des Doppelmantelzylinders immer 4 mm beträgt, konnte durch die Erhöhung der Anzahl der Perimeter Shells auf vier ein durchgängiger Mantel gedruckt werden. Aus diesem und Gründen der Produktionsgeschwindigkeit empfiehlt es sich, die Bauteile der FoodPrint^{3D} Applikation auch bei der Ersatzteil Replikation mit der 0,5 mm Düse zu erstellen.

Bei der Variation der Anzahl solider Schichten wurde zuerst die Möglichkeit untersucht, diese mit größerer Höhe als das Modell als solches zu definieren. Wobei die Anzahl der „Bottom solid Layer“ die Menge an soliden Schichten vom Druckbett oder vor einer Öffnung (Hohlraum) aus definiert. „Top solid Layer“ wählt als Referenz immer eine nach oben abschließende Geometrie und kann daher je nach Bauteil an vielen verschiedenen Geometrien auftreten. Zusammen ergeben sich daraus drei Fälle:

1. Anzahl der Bottom solid Layer >> als das Modell
2. Anzahl der Top solid Layer >> als das Modell
3. Anzahl der Top und Bottom solid Layer >> als das Modell

Es zeigte sich, dass mit allen drei Varianten solide Bauteile generiert werden können. Bei besonders großen oder komplexen Bauteilen kann es aber zu Slicing-Fehlern kommen, was zu zusätzlichen Schichten oder nicht generierbaren Teilen führen kann. Die zusätzlichen Schichten stellen ein entscheidendes Problem dar. Kommt es zu einem solchen Fehler, wird versucht auf der gleichen Höhe wie der vorangegangenen Schicht Material aufzutragen. Hierbei kann es zu einem „Hängenbleiben“ oder Materialstau innerhalb der Düse kommen. Insbesondere der Materialstau kann einen verheerenden Effekt auf die Funktionalität der Düse haben. Es empfiehlt sich also, für komplexe Bauteile eine Kombination aus der Anpassung der äußeren Schalen und der soliden Schichten.

Anhand des Doppelmantelzylinders in [Abbildung 31 \(S.57\)](#) soll eine solche Auslegung beispielhaft mit den Einstellungen entsprechend der Standardprofile erfolgen.

- Die primäre Schichtdicke wird auf 0,1 mm festgelegt.
- Die Dicke der ersten Schicht beträgt 200 % = 0,2 mm.
- Die Generierung erfolgt mit der 0,5 mm Düse.
- Die Schichtbreite wird auf 0,5 mm festgelegt.
- Um eine Überlappung der Schichten auf ein Minimum zu begrenzen, wird mit einem Extrusionsmultiplier von 95 % gearbeitet.

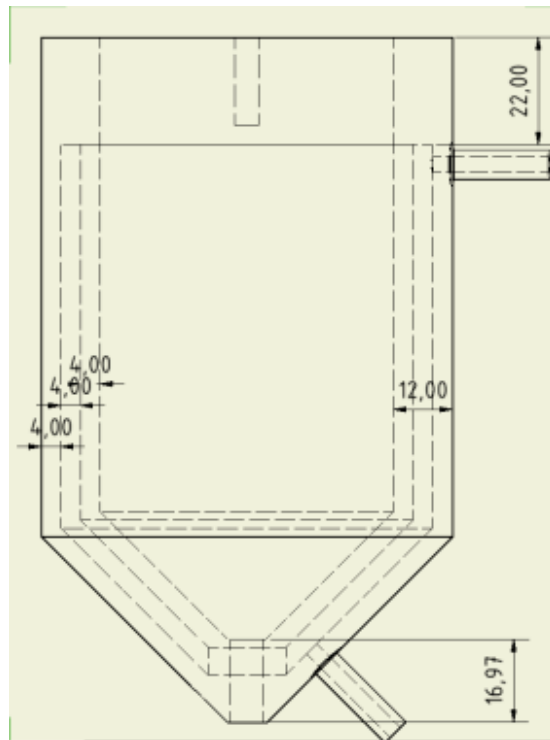


Abbildung 31: Bemaßungen zur Generierung eines soliden Zylinders. Alle Maße sind in Millimeter angegeben.

Aus der Zeichnung geht hervor, dass die Wände und der Hohlraum des Doppelmantels jeweils 4 mm betragen. Ferner ist der nicht beheizte solide Teil (Zeichnung oben) 22 mm hoch und die Düsenhalterung 16,97 mm (~17 mm) hoch. Mit einer primären Schichthöhe von 0,1 mm ergeben sich, wenn der 22 mm hohe Teil auf dem Druckbett steht, 219 Bottom solid Layer, 170 Top solid Layer. Die Wände des Doppelmantels werden durch die Variation der äußeren Verschalung gedruckt. Nachdem diese jeweils auf der Innenseite und Außenseite einer Wand gedruckt werden, ergeben sich 4 „Outline Perimeter Shells“ (je 0,5 mm). Allgemein kann dieser Vorgang wie folgt ausgedrückt werden.

$$\text{Bottom solid Layer} = \frac{\text{Höhe bis zu spezieller Geometrie oder Mitte}}{\text{primäre Schichthöhe}} + \left(1 - \frac{\text{Höhe der ersten Schicht}}{\text{primäre Schichthöhe}}\right)$$

Der addierte Term entspricht der Anpassung an das Verhältnis der Schichthöhen. Wird die erste Schicht dicker gedruckt, muss die Anzahl der solid Layer angepasst werden.

$$\text{Top solid Layer} = \frac{\text{Höhe von spezieller Geometrie oder Mitte bis zum Bauteilende}}{\text{primäre Schichthöhe}}$$

$$\text{Outline Perimeter Shells} = \frac{\text{Wand eines Hohlkörpers}}{\text{Extrusionsweite} \cdot 2}$$

Die Teilung der Wandstärke des Hohlkörpers beruht darauf, dass die Verschalung immer bei Kontakt zur „Umwelt“ gedrückt wird. Im Fall eines Hohlkörpers innen und außen.

4.1.3 Wasserdichtigkeit des Doppelmantelzylinders

Für die Generierung eines neuen Doppelmantelzylinders wurde das ursprüngliche Design den Anforderungen der Applikation angepasst. Die Neuerungen umfassen das Wegfallen einer Umrandung zur Deckelhalterung, nachdem dieser mit Schrauben fixiert werden kann. Außerdem wurde die Dicke der Wasserzuläufe erhöht, um diese resistenter gegenüber mechanischer Belastung zu machen. Ferner wurde deren Länge und Winkel verändert und eine Erhöhung zur erleichterten Abdichtung eingefügt. Anschließend wurden die Dicken der Wände des Doppelmantels sowie der Hohlraum auf jeweils 4 mm angeglichen. Als letzter Punkt wurde die Gewindeführung aus Plastik entfernt und durch eine Gewindevorbohrung ersetzt, in die eine Gewindestange aus Messing eingesetzt werden kann. Daraus ergaben sich drei unterschiedliche Designvarianten, zwei neue und die ursprüngliche. Die [Abbildung 32 \(S.59\)](#) zeigt ein neues Design, wobei sich der Winkel und die Position des Wasserzulaufes ([Abbildung unten](#)) nur geringfügig geändert haben.

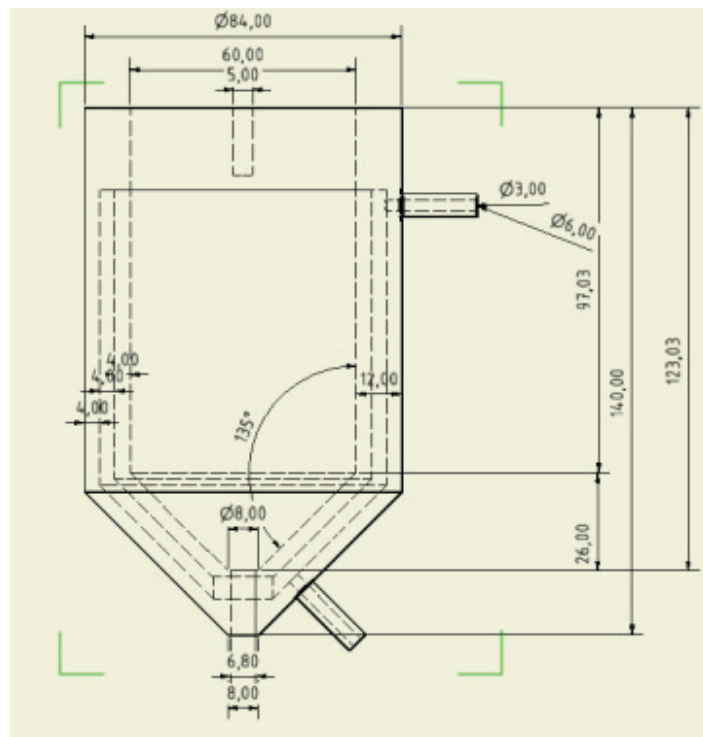


Abbildung 32: Zylinder neu Variante 1. Alle Maße sind in Millimeter und Winkel in Grad angegeben.

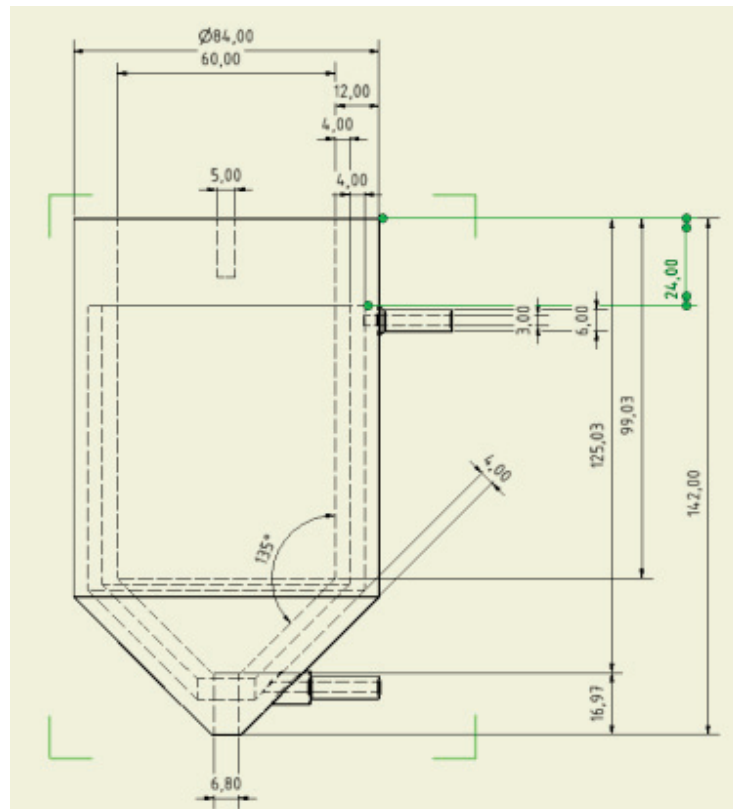


Abbildung 33: Optimiertes Zylinderdesign. Alle Maße sind in Millimeter und Winkel in Grad angegeben. Der Hohlraum und die Wände des Doppelmantelzylinders sind gleich dick. In die Bohrung (unten, Mitte) mit 6,8 mm Durchmesser wird nachträglich ein M8 Gewinde geschnitten. Die Bohrungen (oben, Mitte) 5 mm Durchmesser dienen der Fixierung des Deckels.

In Abbildung 33 (S.60) ist das optimierte Design mit allen Änderungen ersichtlich. Die neue Ausrichtung des Wasserzulaufes (Abbildung unten) soll die Schlauchführung verbessern und gleichzeitig über den zylindrischen Abschluss das Abdichten erleichtern. Wie in 3.2.3 (S.35) erfolgt die Betrachtung der Nachbearbeitung und Prozessparameteranpassung getrennt.

Nachbearbeitung undichter Zylinder.

Für den nachträglichen Dichtungstest wurde die ursprüngliche Variante sowie deren Abwandlung Design 1 gedruckt. Wobei alle zur Verfügung stehenden Kunststoffe (PLA, PLAHT, ABS) genutzt wurden. Aus diesen Versuchen ging hervor, dass die Dichtigkeit durch nicht sichtbare Hohlräume zwischen den einzelnen Schichten stark beeinflusst wird und materialunabhängig ist.

Zum einen können diese Hohlräume durch Luft einschüsse während des Druckes und zum anderen durch nicht optimale Verschmelzung des Materials hervorgerufen werden. Ohne eine spezielle Anpassung der Druckparameter an das jeweilige Material und der Modellgeometrie war es nicht möglich einen wasserdichten Doppelmantel zu generieren. Auffällig war, dass vermehrt der Anfang und das Ende des Doppelmantels zu Leckagen neigten.

Durch das Füllen des Doppelmantels mit *Klarlack* und anschließender Trocknung (24, 48, 72 Stunden Trockenzeit) konnte keine dauerhafte Dichtigkeit erhalten werden. Das Aufbringen erfolgte in unverdünntem und 1:1, 1:2 verdünntem Zustand, wobei sich keine Verbesserung der Deckeigenschaften innerhalb des Doppelmantels zeigte. Aufgrund des Materialverbrauches kann zudem davon ausgegangen werden, dass es dem Klarlack auch ohne Verdünnung möglich ist, in die Kunststoffschichten einzudringen. Allerdings ist die gebildete Schicht nur kurzzeitig stabil. Bei längerem Betrieb werden diese „gesprengt“ und es kommt erneut zu Leckagen. Nach 24 Stunden war der Lack noch nicht gänzlich ausgehärtet. Daraufhin erfolgte erst nach 48 und 72 Stunden Aushärtezeit ein Dichtigkeitstest.

Durch Markierung der undichten Stellen war es möglich, diese punktuell mit einem dichtenden *Epoxidharz* bzw. im inneren mit einer lebensmittelechten *Kaltglasur* (zwei Komponenten: Harz und Härter) ähnlicher Funktion zu Verschließen. Das aufgetragene Harz dringt nicht vollständig zwischen die Schichten und härtet innerhalb von 24 Stunden aus. Um eine dichtende Wirkung zu erzielen, muss dieses mehrmals, bis zu einer resultierenden Dicke von ca. 0,5 – 1 mm aufgetragen werden. Es zeigte sich, dass diese Schichten stark unter der Reinigung der Bauteile leiden und sich bei langem Gebrauch vom Objekt absetzen (Abbildung 34 S.62). Dementsprechend sind diese nicht für die Nachbearbeitung geeignet. Ein Versuch, eine handelsübliche mit Fasern versehene Dichtmasse (*Dichtfix*) zu verwenden, führte zwar zur Dichtung des Bauteils, jedoch kann diese nicht gleichmäßig aufgetragen werden. Zudem ist die Anwendung einer solchen Masse an einem Bauteil mit Lebensmittelkontakt nicht möglich.

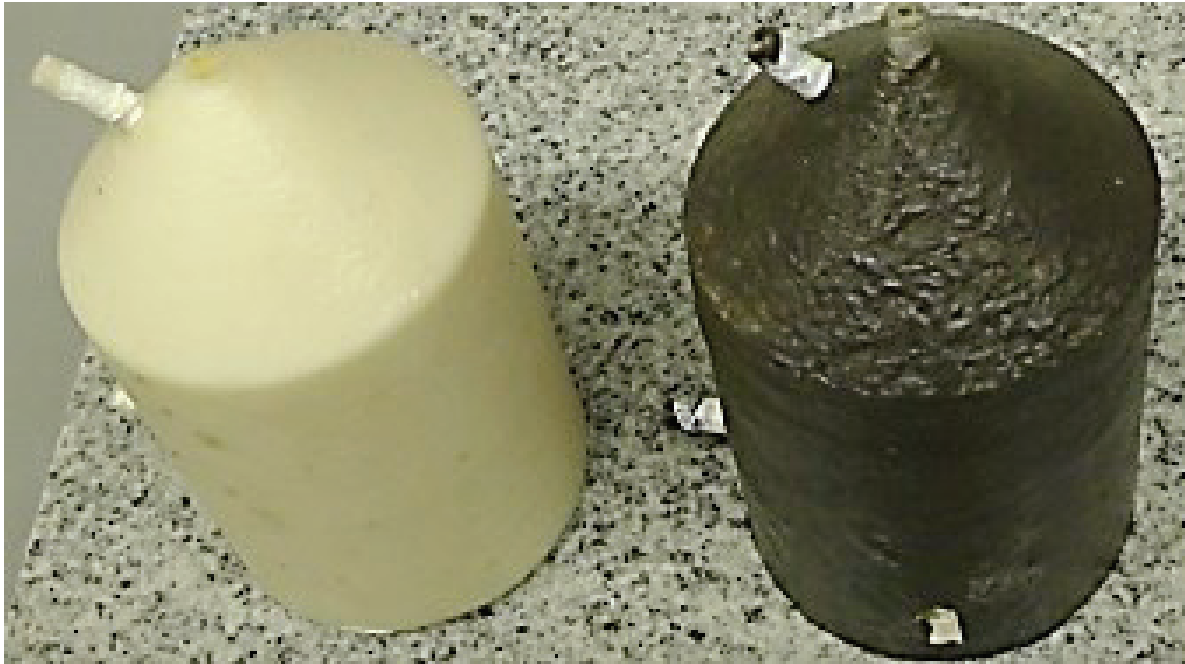


Abbildung 34: Kaltglasur und Dichtmassen Versuch. Von links: ABS-Zylinder mit Kaltglasur, PLAHT-Zylinder mit Dichtmasse. Die dunkleren Stellen des ABS-Zylinders entstehen nach mehrmaliger Reinigung durch Ablösen der Kaltglasur. Die unebene Struktur des mit „Dichtfix“ behandelten PLAHT-Zylinders entsteht durch die Zähflüssigkeit der Dichtungsmasse sowie auch durch die enthaltenen Fasern. Es war unmöglich, eine gleichmäßige Verteilung der Fasern in der Dichtungsmasse zu erreichen.

Wenn die markierten Leckagen nach deren Trocknung (mindestens 24 Stunden) mit Sekundenkleber beträufelt werden, halten diese auch längerem Gebrauch stand. Im Vergleich zu allen anderen getesteten Massen wird der flüssige Kleber am schnellsten von den Räumen zwischen den Schichten absorbiert. Zudem weist die gebildete Klebeschicht eine höhere Festigkeit als Lacke auf. Diese Möglichkeit sollte jedoch nur für Stellen ohne Lebensmittelkontakt und als Lösung für den Notfall gedacht sein.

Anpassung der Prozessparameter

Für die Generierung eines wasserdichten Zylinders wurde auf den Druck eines Füllungsanteils verzichtet. Die entstehenden Hohlräume innerhalb des Modells machen eine dauerhafte Wasserdichtigkeit unmöglich. Dementsprechend wird mit den Ergebnissen aus der soliden Bauteilgenerierung gearbeitet. Dabei wurde die Anzahl der soliden Schichten exakt auf die Bauteilhöhen bis zur Geometrie des Doppelmantels festgelegt.

Die Umwandlung des Doppelmantels wurde mittels der Anpassung der äußeren Schalen und Extrusionsweite solide generiert. Um eine Fehlinterpretation auszuschließen, wurde der Parameter Füllung auf 0 % gesetzt, um entstehende Leerschichten in der virtuellen Druckvorschau identifizieren zu können. Anschließend erfolgte eine Variation ausgewählter Parameter in einer vertretbaren Range. Diese werden in Tabelle 13 (S.63) aufgeführt.

Tabelle 13: Parameter und Range der Prozessparameteranpassung für die Generierung eines wasserdichten Zylinders.

Parameter	Range Anfang	Range Ende	Schrittweite
Schichtdicke	0,1 mm	0,4 mm	0,05 mm
Temperatur	200°C	210°C	5°C
Geschwindigkeit	1200 mm / min	2400 mm / min	200 mm / min

Es zeigte sich, dass durch die Temperaturerhöhung keine Verschmelzung der Schichten garantiert werden kann. Zudem treten bei Temperaturen am Ende der Range Materialverdrängungseffekte und Warping vermehrt auf. Geringe Temperaturen müssen hingegen mit einem mehr an Extrusion ausgeglichen werden. Zudem muss bei niedrigen Temperaturen (200°C sind ca. 5°C vom optimalen Druckbereich für PLAHT entfernt) die Druckgeschwindigkeit verringert werden, um eine gute Haftung des Materials zu erhalten. Dementsprechend kann die Temperatur für PLAHT zwischen 200°C und 205°C variiert werden.

Die Druckgeschwindigkeit beeinflusst die Ausformung der Oberfläche, die Materialverschmelzung und Schichthaftung. Bei deren Variation muss jedoch die Materialeextrusion angepasst werden. Für alle beeinflussten Eigenschaften gilt, dass diese bei einer Reduktion der Geschwindigkeit positiv beeinflusst werden. Da es sich bei dem Zylinder jedoch um ein „großes“ Bauteil handelt, muss dessen Generierung auf eine tragbare Zeit reduziert werden.

Es zeigte sich, dass eine Reduktion ($< 0,2$ mm) der Schichtdicke nicht wie erwartet eine Verbesserung der Dichtigkeit zur Folge hat. Schichtdicken über 0,3 mm wiesen sich als schwierig handhabbar aus, was durch den im Vergleich kleinen Düsendurchmesser begründet ist. Bei zu großen Schichtdicken wird der Kunststoff nicht mehr „angedrückt“ und es entsteht eine „Fadenstruktur“. Dieser Effekt kann schon in kleinem Ausmaß bei 0,3 mm Schichtdicke beobachtet werden. Mit dieser Struktur ist ein wasserdichtes Bauteil ausgeschlossen, weshalb auf die Versuche mit 0,35 und 0,4 mm Layerhöhe verzichtet wurde. Demzufolge wird der Doppelmantelzylinder mit einer Schichtdicke von 0,2 mm gedruckt.

Die gesammelten Ergebnisse konnten erfolgreich in den Druck eines von sich aus wasserdichten Zylinders aus PLAHT (Abbildung 35 S.64) überführt werden.



Abbildung 35: Wasserdichter Zylinder PLAHT, optimiertes Design mit Gewindebohrung. Der Zylinder besitzt eine Schichthöhe von 0,2 mm und wurde mit der großen Fläche (Abbildung unten) auf dem Druckbett stehend gedruckt. Durch die langsame Druckgeschwindigkeit ergab sich eine Druckzeit von rund 70 Stunden. Der Zylinder ist mit eingeschnittenem Gewinde (Abbildung oben) ohne weitere Nachbearbeitung wasserdicht.

4.1.4 Bauteilgenerierung der FoodPrint^{3D} Applikation

Die ursprüngliche Version des FoodPrint^{3D} Extruders bestand aus:

- einer Halterung,
- einem Schrittmotor mit Befestigung und fixiertem Kegelrad,
- einem Doppelmantelzylinder,
- einer Baugruppe bestehend aus Schnecke, Deckel und Kegelrad (siehe Abbildung 36 S.65)
- sowie einer Lochschraube für die Stabilität der Schnecke.

Die Lochschraube diente der Führung eines Thermometers und der Stabilität. Die Stabilität der Schnecke kann über eine kleinere Lochgröße realisiert werden, die gleichzeitig als Thermometerführung dienen kann. Dementsprechend wird dieses Bauteil durch die Anpassung der anderen ersetzt.



**Abbildung 36: Baugruppe
Schnecke, Deckel und Kegelrad.
Design (Franke, 2016).**

Für die neue Auslegung der Applikation wurde die Baugruppe in separate Teile zerlegt, die mittels eines Stecksystems verbunden werden werden (Abbildungen 37, 38, 39 und 40 S.66). Um diese auf eine gleichbleibende Funktion untersuchen zu können, wurde die Baugruppe solide neu aus PLAHT generiert (Abbildung 36 S.65). Es zeigte sich kein Unterschied in der Funktionalität der beiden Baugruppen.

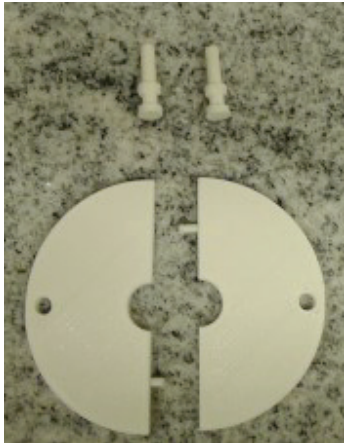


Abbildung 37: Deckel-Stecksystem.



Abbildung 38: Kegelräder links PLAHT, rechts PLA.



Abbildung 39: Deckel komplett.



Abbildung 40: Förderschnecken rechts PLAHT, links PLA.

Um die Bauteile möglichst einfach replizierbar hinterlegen zu können, wurde die Auswirkung verschiedener Schichthöhen (0,15 und 0,2) sowie die Generierung aus PLA und PLAHT untersucht. Es zeigte sich, dass die Bauteile ohne besondere Beanspruchung (alle außer des Doppelmantelzylinders) keinen merklichen Funktionsverlust durch rauere Oberflächenbeschaffenheit aufweisen.

Für die Applikation „Schokoladendruck“ können zudem PLA und PLAHT eingesetzt werden, nachdem die Komponenten keinen Temperaturen über 50°C ausgesetzt werden.

Daraus folgend können die Bauteile „grob“ mit den in Tabelle 14 (S.67) dargestellten Einstellungen gedruckt werden.

Tabelle 14: Druckparameter für den „Grobdruck“ der FoodPrint^{3D} Komponenten.

Parameter	Wert
Primary layer height	0,15 mm bzw. 0,2 mm
First layer height	134 % bzw. 100%
Extrusion multiplier	0,92
Movement speed	2400 mm / min
Temperatur	PLA 200°C bzw. PLAHT 205°C
First Layer Speed	50 %
Bottom- Top solid layer	200
Support	From build platform only

Zusätzlich sollten die Förderschnecken mit dem Stiel auf dem Druckbett gedruckt werden. Durch diese Positionierung wird der obere Schneckenteil besser ausgeformt und Warping verhindert. Die restlichen Einstellungen der Druckparameter können den erstellten Standardprofilen des jeweiligen Kunststoffes entnommen werden.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Generierung und die Änderungen des Doppelmantels erläutert. Zusätzlich wird eine Gewindestange aus Messing (Abbildung 41 S.68) im oberen Teil zur Befestigung der Düse angebracht. Damit können die gleichen Düsen für den Lebensmitteldruck genutzt werden, wie sie am Multirap M420 für Kunststoff zum Einsatz kommen.

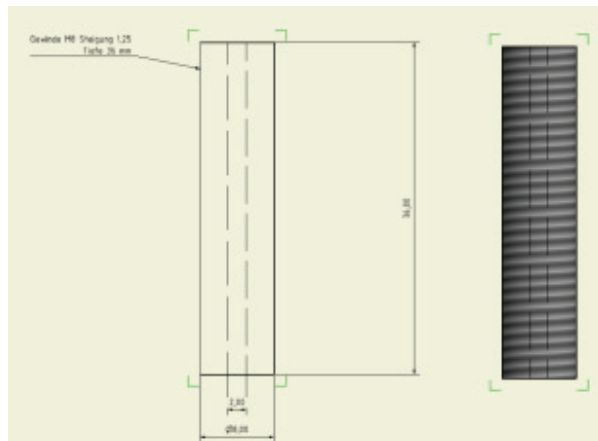


Abbildung 41: Messing-Gewindestange.

Zusätzlich zu den hergestellten Zylindern (Abbildung 42 und Abbildung 43 S.68) wurde für die Extrusion in höheren Temperaturbereichen ein Aluminiumzylinder angeschafft (Abbildung 44 S.69).



Abbildung 42: Zylinderbatterie. Von Links optimiertes Design, Design 1 und eine Kopie des ursprünglichen Designs



Abbildung 43: Zylinderbatterie stehend.

Dieser entspricht in der Bauweise dem neueren Design 1, die stärker an der ursprünglichen Variante angelehnt ist. Auf den Kauf eines Zylinders, der dem optimierten Design entspricht, musste zum Zeitpunkt des Erwerbs verzichtet werden. Da dieser bis zu einem gegebenem Zeitpunkt erfolgen musste, bis zu dem das optimierte Design nicht auf Funktionalität getestet werden konnte.



Abbildung 44: Aluminiumzylinder.

In Versuchen zeigte sich, dass die für Kunststoffdruck ausgelegten Düsen nicht optimal für die Extrusion von Lebensmitteln geeignet sind. Zum einen entsteht ein ca. 2 cm langer Bereich der Materialführung, der nicht beheizt werden kann. Zum anderen weisen diese eine Verbreiterung im Inneren auf, in der es zu Ablagerungen des Lebensmittels kommt. Diese Ablagerungen sind bedingt durch ihre Position schwer zu entfernen. Sie müssen jedoch restlos entfernt werden, um ein Verstopfen der Düse zu verhindern sowie hygienisches Arbeiten zu ermöglichen. Um diese Nachteile der Kombination Gewindestange und Düsenaufsatz zu eliminieren, wurde eine verkürzte, kompakte Version der Kombination designt (siehe [Abbildung 45](#) auf Seite 70).

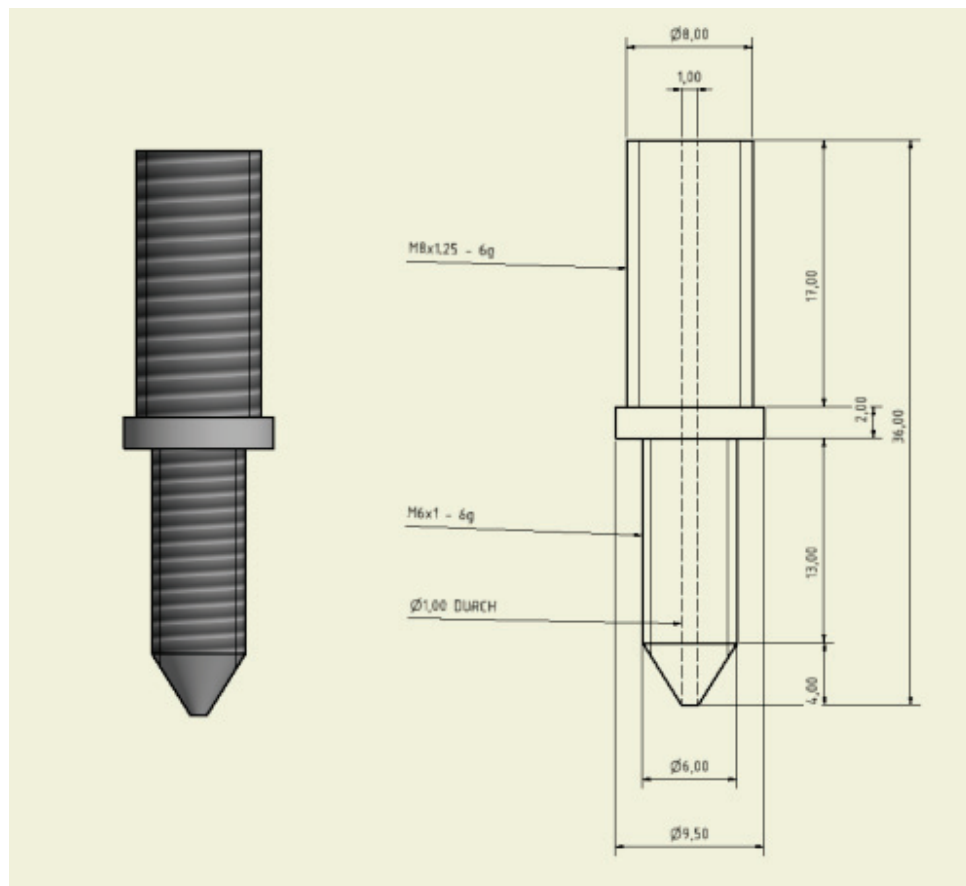


Abbildung 45: Optimierte Düse für den Lebensmitteldruck.

Der dickere Gewindeteil entspricht von der Länge exakt der Gewindebohrung des Zylinders und schließt im Inneren plan ab. Auf dem unteren Teil kann weiterhin der am Multirap M420 eingesetzte Thermistorwürfel angebracht werden. Abweichend von der Zeichnung ist im erstellten Bauteil die innere Bohrung konisch nach unten zulaufend, was eine bessere Materialführung ermöglichen sollte.

4.1.5 Nachbearbeitung

Aus (Pfister, 2016) geht hervor, dass Objekte mit sehr glatten Oberflächen aus PLA bzw. PLAHT durch Nachbehandlung mittels *Tetrahydrofuran* (kurz THF) generiert werden können. Der Einsatz einer chemischen Behandlung wird durch die schwierige Steuerung der Glättung auf verschiedene Geometrien nicht in Betracht gezogen.

Die Bauteile - Deckel sowie Kegelräder und Zylinder - müssen keiner Nachbehandlung unterzogen werden. Werden die Ergebnisse der Versuchsreihe Größenabweichung berücksichtigt (S.45 ff), gilt es nur die Förderschnecke einer Nachbearbeitung zu unterziehen.

Bei den Nachbearbeitungsversuchen zeigte sich, dass größere Materialmengen (ca. 1 mm – 0,5 mm) am besten vorsichtig mittels der Fräse entfernt werden können. Hierbei muss jedoch sehr gleichmäßig und in mehreren Durchgängen gearbeitet werden, um den Kunststoff nicht partiell zu schmelzen. Feilen eignen sich im händischen Einsatz für einen Feinschliff. Diese müssen während der Benutzung jedoch öfter gereinigt werden, da sich Filament schnell auf dem Metall ablagert. Schleifpapier wies vor allem eine oberflächenglättende Wirkung auf. Bei der Benutzung können kleine Filamenttropfen oder Fasern entfernt werden. Für die Entfernung größerer Materialmengen zeigten sich das Schleifpapier und Feilen als wenig wirksam.

Die Förderschnecke muss bezüglich ihrer Lauffähigkeit exakt eingeschliffen werden. Hierbei führte eine Kombination aus Fräsen sowie Schleifpapier und Feilen zum Erfolg. Anfangs wurde gleichmäßig Material von den helixförmigen Ausläufern mittels der Fräse entfernt. Sobald die Schnecke schwergängig lauffähig ist, wird weiter mit feinen Feilen Material abgenommen. Als letztes konnte ein feines Schleifpapier eingesetzt werden, um die Ränder von Bearbeitungsspuren zu befreien. Zusätzlich werden in das sich verjüngende Ende Kuhlen eingearbeitet, um einen Durchfluss in Richtung der Düse zu erleichtern. Auf eine Bearbeitung der Oberfläche (Schichtstruktur) wurde verzichtet, nachdem diese keinen Kontakt zu einem anderen Bauteil hat.

4.2 Ergebnisse und Auswertung FoodPrint^{3D}

4.2.1 Herstellung der Druckmasse

Vorangegangene Projekte konnten die Funktionalität des Lebensmitteldruckers mit verschiedenen Fettsuspensionen und reinem Kokosfett testen (Franke, 2016). Nachdem sich einige Massen nur bedingt für den Druck eigneten, erfolgte die Herstellung einer „kakaohaltigen Überzugsmasse“ (Kaiser, 2016). Das Masterprojekt von Robert Kaiser beschäftigte sich mit der Herstellung einer Masse, welche für den Einsatz im FoodPrint^{3D} Extruder geeignet ist. Auf Basis der hier erzielten Ergebnisse wurden in Kooperation 15 kg der Druckmasse hergestellt. Die Tabelle 15 (S.72) enthält die verwendeten Zutaten sowie den Zeitpunkt der Zugabe.

Tabelle 15: Menge und Zeitpunkt der Zutatenzugabe für die Druckmassenherstellung.

Zutat	Menge %	Zeitpunkt
Puderzucker	43,78 %	Mischer
Entöltes Kakaopulver	19,94 %	Mischer
(11 %) Fett		
Kokosfett	26,28 %	Mischer
	10 %	Kugelmühle

Die Herstellung erfolgte wie in der Ausführung „Development of fast solidifying food mixture for 3D-printing (Fortsetzung)“ beschrieben.

Die ursprüngliche Masse wies jedoch ein schlechtes Fließverhalten auf und konnte nicht im Lebensmittelextruder Verwendung finden. Die Analyse der Viskosität mittels eines Rotationsrheometers zeigte, dass diese im Vergleich zur Referenz (Dr. Oetker „Weiße Kuvertüre“) höher lag. Durch schrittweise Zugabe (0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 Gewichtsprozenten) von Kokosfett konnte eine gute Übereinstimmung mit der Referenzprobe erhalten werden. Abbildung 46 (S.73) zeigt die Schubspannung über der Scherrate für die hergestellte Druckmasse ohne Fettzugabe, die von Robert Kaiser entwickelte Masse (T2) und die Referenzmasse.

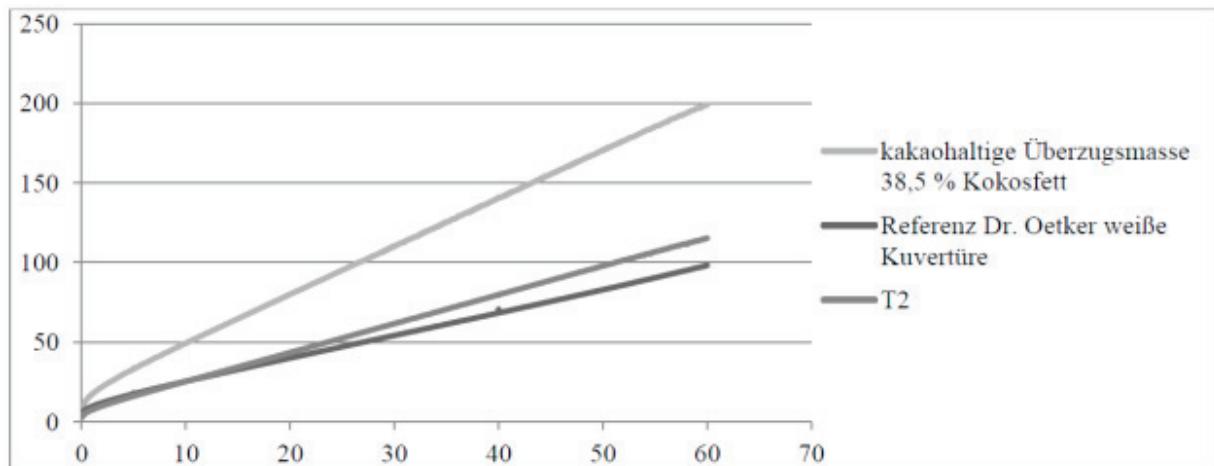


Abbildung 46: Schubspannung über der Scherrate für die Druckmasse (Kaiser, 2016). Die Fettgehalte der Referenzmassen sind 38,3 % für Dr.Oetker weiße Kuvertüre und 38,5 % in T2.

Die Druckmasse wurde mit Hilfe einer Kugelmühle hergestellt. Werden Partikel auf diese Weise vermahlen, ergibt sich eine kugelförmige Partikelform. Nachdem die Masse keine Emulgatoren enthält, welche die Viskosität mit beeinflussen, sollte die Masse durch den höheren Fettgehalt zur Viskositätsanpassung schneller aushärten. Allerdings kommt es innerhalb der Masse zu keiner dauerhaften Emulsion, was zu einem Fettabsatz bei flüssiger Lagerung nach einigen Tagen führt. Der hohe Fettgehalt könnte durch den Einsatz verschiedener Emulgatoren reduziert und gleichzeitig die Stabilität des Gemisches erhöht werden (Kleinert, 1997).

4.2.2 Maximale Viskosität der Druckmasse

Um eine Vorstellung der möglichen Extrusionsrange des FoodPrint^{3D} Extruders zu erhalten, wurde die maximale Viskosität der Druckmasse ermittelt. Nachdem das Verfahren auf der Aushärtung des enthaltenen Fettes basiert und der Druck von reinem Fett möglich ist, erfolgt keine Messung der minimalen Viskosität. Das Minimum wird in diesem Verfahren lediglich durch die Extrusionsgeschwindigkeit und Kühlleistung bestimmt.

Im Vorversuch wurden der nicht aufgefetten Masse in 0,5 % Schritten Kokosfett zugegeben. Es zeigte sich, dass erst eine Zugabe von 2,5 % Kokosfett eine geringe Extrusion ermöglicht. Daraus folgend wurden die Viskosität der Rohmasse sowie der Masse mit 2 %, 2,5 % 3,0 % gemessen.

Um die Fließeigenschaften mit der Arbeit von Robert Kaiser vergleichen zu können, werden in Tabelle 16 (S.74) die Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate (0,05 1/s, 5 1/s und 40 1/s) sowie die Fließgrenze nach Casson und unendliche Viskosität nach Casson dargestellt.

Tabelle 16: Casson Fließgrenze, Casson unendliche Viskosität und die Schubspannung der Massen. Bei Scherraten von 0,05 1/s, 5 1/s und 40 1/s der kakaohaltigen Überzugsmasse mit steigendem Fettgehalt.

Probe	Scherrate $\dot{\gamma}$ [1/s]						Fließgrenze τ_0 [Pa]	Unendliche Viskosität η_{∞} [Pa·s]
	0,05	5	40	0,05	5	40		
	Schubspannung τ [Pa]			Viskosität η [Pa·s]				
Roh- masse	6,04±0,29	37,2±0,39	151,0±0,37	121±5,8	7,43±0,08	3,78±0,01	5,66±0,28	2,07±0,65
+2,0 %	5,97±0,29	24,6±1,04	99,5±3,5	119±5,7	4,92±0,21	2,48±0,86	4,78±0,19	1,48±0,07
+2,5 %	5,12±0,13	23,9±0,25	96,6±0,89	102±2,6	4,78±0,05	2,41±0,02	4,38±0,07	1,47±0,01
+3,0 %	4,58±0,11	22,7±0,32	93,2±1,15	91,4±2,1	4,54±0,07	2,33±0,3	3,94±0,08	1,45±0,02

Es sinken die Viskosität sowie der Punkt an dem die Masse sich wie eine Flüssigkeit benimmt bei steigender Fettzugabe. Es ist davon auszugehen, dass die Kraft die benötigt wird, um die Masse zum Fließen zu bewegen einen entscheidenden Einfluss auf das funktionierende System hat. Reicht die Gewichtskraft nicht, um diese Kraft sowie die Adhäsionskraft der Masse zur Düse zu überwinden, kann leicht eine Agglomeratbildung in den weniger gut beheizten Bereichen des FoodPrint^{3D} Extruders auftreten. Diese Annahme gründet in dem temperaturbedingten Verhalten der Viskosität von Schokoladenerzeugnissen (Beckett, 1999).

Nachdem eine Extrusion erst bei einem zusätzlichen Fettgehalt der Masse von + 2,5 % extrudierbar war, können die Werte für diese Masse als Startpunkt der Viskositätsrange gesehen werden. Ob die Fähigkeit einer Masse extrudiert zu werden, vornehmlich von deren Fließgrenze oder der nachfolgenden Viskosität abhängt, wurde noch nicht untersucht.

Im Vergleich zur Fließgrenze ändert sich die unendliche Viskosität für die Massen mit 2,0 % - 3,0 % nur geringfügig. Daher kann vermutet werden, dass die Reduktion der Fließgrenze einen bedeutenderen Einfluss als die Viskosität des schnell bewegten Mediums hat.

4.2.3 Untergrund Beschichtung

Modelle aus der kakaohaltigen Überzugsmasse sind direkt nach dem Druck leicht plastisch verformbar. Sie härten erst später unter Kühlung vollständig aus. Dementsprechend wurde versucht, Modelle ohne weitere Beschichtung von einer Kunststoff- bzw. Marmorplatte zu lösen ohne die Objekte zu beschädigen. Ferner wurde die Beschichtung mittels Klarsichtfolie, Backpapier und Aluminiumfolie sowie lebensmittelechtem Verpackungsmaterial getestet.

Ausdrucke ohne Beschichtung erweisen sich bezüglich der Justierung als einfacher. Jedoch konnten die Modelle nicht ohne Beschädigung gelöst werden. Durch den Einsatz von Klingen konnte keine auffallende Verbesserung festgestellt werden.

Wird das Bauteil mittels eines Drahtes leicht angelöst, kommt es noch während des Passierens zu erneutem Verkleben des bereits durchlaufenen Teiles. Zusätzlich muss das zum Ablösen verwendete Werkzeug ohne seitliche Bewegung unter dem Modell geführt werden, ansonsten wird die Struktur des gesamten Modells verzogen. Soll das Modell nicht zeitnah entfernt werden, lässt sich ein vollständig auskristallisiertes Modell nach der Kühlung einfacher entfernen.

Bei der Arbeit mit einer zusätzlichen Marmorplatte oder Beschichtung muss der Druck unterschiedlich präpariert werden.

Druckbettbeschichtungen unter einem Millimeter Höhe

Das Druckbett kann bei der Verwendung von Beschichtungen kleiner als 1 mm vor dem Druck mit diesen bezogen und wie bei der Kunststoffvariante justiert werden.

Druckbettbeschichtungen über einem Millimeter Höhe

Bei dieser Variante kann das Druckbett nicht vor dem Druck mit der Beschichtung / Auflage versehen werden. Zusätzlich muss die exakte Höhe der verwendeten Auflage bekannt sein. Diese muss in den Druckprozess als Z-Achsen Offset implementiert werden. Ferner muss sicher gegangen werden, dass diese in kurzer Zeit ohne Höhenveränderung angebracht werden kann. Anschließend muss der Druckjob gestartet werden. Eine Anbringung kann innerhalb des Zeitfensters nach der Messung der Druckbettschiefstellung erfolgen oder durch Pausieren des Druckes.

Die Aufteilung in zwei Varianten wird durch die Funktionsweise des Sensors bedingt. Der Sensor arbeitet nicht mittels einer Druckabtastung sondern reagiert auf das Metall im Druckbett. Dementsprechend werden nicht metallische Materialien nicht erkannt. Bei dem Versuch, das Druckbett mittels Aluminiumfolie zu bespannen, konnte beobachtet werden, dass diese Schicht vom Sensor erkannt wird. Zwar wäre es möglich, die Extrudereinheit für die Verwendung von Aluminiumfolie zu justieren, allerdings würde die Düse dann ca. 1 cm unter den Sensor ragen. Nachdem nicht garantiert werden kann, dass die Abtastung immer gleich verläuft und um Beschädigungen des Druckers bei Nichtüberprüfung der Justierung zu vermeiden, wurde von dieser Methode abgesehen.

Backpapier erwies sich zur Druckbettbeschichtung als nicht optimal. Dieses kann zwar glatt angebracht werden, jedoch ist es schwierig dieses vom Kühlluftstrom abzuschirmen. Dies führt zu minimalen Bewegungen der Untergrundbeschichtung während des Drucks, was die Genauigkeit negativ beeinflusst.

Klarsichtfolie kann für den Druckbereich glatt angebracht werden und durch Anfeuchten der Ränder ein Klebeeffekt erzielt werden, der die Bewegung durch den Kühlluftstrom verhindert. Allerdings weist diese eine hohe Flexibilität auf, was das Entfernen der Folie erschwert. Bei den Versuchen erwies sich das lebensmittelechte Verpackungsmaterial als vielversprechend. Dabei wurde aus einem Einweg-Kunststoffdeckel die gerade Fläche herausgeschnitten. Dieses Material weist ein starres Verhalten auf und kann durch seitliche Fixierung gegen Bewegung abgesichert werden. Durch die Festigkeit kann dieses leicht entfernt werden und nach Präsentation des Druckvorgangs direkt gezeigt werden.

4.2.4 Detailgrad und Bauteilauslegung

Anfangs wurde ein Probedruck mit den verwendeten Einstellungen der Vorprojekte (Franke, 2016) (Kaiser, 2016) vorgenommen. Leider können aus diesen nur die bedingten Prozessparameter wie Düsendurchmesser (1 mm), Extrusionsweite (1 mm), Temperatur) des Doppelmantels (40 °C, Kühlluftzufuhr (17 °C) und Schichtdicke (0,1 mm) übernommen werden.

Bei den Versuchen muss die Extrusionsgeschwindigkeit der Viskosität angepasst werden. Die Fließeigenschaften und Aushärtezeiten der extrudierten Masse, können zudem über die Düsentemperatur beeinflusst werden. Die Fließeigenschaft wird bei der Reduktion der Düsentemperatur verschlechtert, was zu geringerer Extrusion bis zum Verstopfen der Düse führt. Gleichzeitig härtet die kakaohaltige Überzugsmasse bei geringerer Düsentemperatur schneller aus.

Bei der Benutzung von Füllungsstruktur kommt es zu einer säulenartigen Innenstruktur des Objektes. Die hierbei entstehenden Zwischenräume können nachträglich nicht problemfrei überspannt werden. Je nach Düsentemperatur gelingt es lediglich, sehr kleine Räume zu überspannen, und eine geschlossene Oberfläche zu generieren. Aus diesem Grund müssen Bauteile, die nicht nur aus einer äußeren Verschalung bestehen, solide definiert werden. Die Konstruktion eines Körpers ohne Hohlräume erfolgt langsamer und gestaltet sich schwieriger bezüglich Parameterauslegung.

Dementsprechend sollten simple Modelle wie Vasen oder hohle Zylinder für den Test der maximalen erreichbaren Oberflächenwinkel herangezogen werden.

Um eine Vorstellung des verwirklichtbaren Detailgrades zu bekommen, eignen sich zum einen kleine Strukturen wie Schrift (siehe Abbildung 47 S.78). Zum anderen muss der Detailgrad bezogen auf die Verweilzeit der Düse über der jeweiligen Geometrie beurteilt werden, wofür sich kleinere Ebenen eignen. Die Versuche zeigten hierbei, dass durch die Düsentemperatur bedingt die untere Schicht immer eine geringe Verflüssigung aufweist. Demnach heizt der Düsenkopf die direkt umliegenden Schichten mit.



Abbildung 47: Schokoladenchip-Design (Steinke, 2016).

Die abgebildete Schokoladenmünze kann in 15 Minuten, mit den hinterlegten Standardeinstellungen, im selben Detailgrad hergestellt werden. Hierfür wurde eine 1 mm Düse mit einer Temperatur von 28 °C verwendet. Als Beschichtung wurde Klarsichtfolie verwendet. Die „geriffelte“ Struktur der „glatten“ Oberfläche wird durch die Düsenbewegung bedingt, wird etwas zu viel Material extrudiert drückt sich dieses am Rand der Düse nach oben.

Durch geringere Extrusion kann eine glattere Oberfläche geschaffen werden. Allerdings werden beim Einsatz dieses Verfahrens immer Ansätze der Düsenbewegung erkennbar bleiben. Dies wird durch die minimale Schmelzung und der daraus resultierenden Fließbewegung der unteren Schicht bedingt.

Bei genauer Betrachtung kann ein feiner Strich erkannt werden, der auf der Münze nach außen führt. Dieser entsteht am Ende des Druckes, wenn das Druckbett auf die X0 Position fährt. Dieser kann durch Implementierung einer vorher erfolgenden Bewegung in Richtung der Z-Achse in den „Custom G-Code“ am Druckende verhindert werden.

Es zeigt sich kein Unterschied am Modell, egal ob direkt auf dem Druckbett oder einer aufgesetzten Marmorplatte gearbeitet wird. Auch verhalten sich nachträglich aufgebraachte Beschichtungen auf beiden gleich (Abbildung 48 S.79).

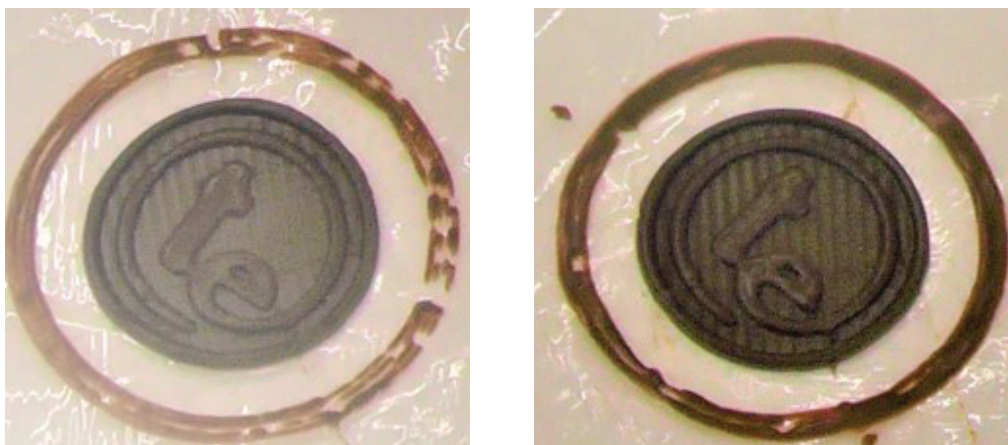


Abbildung 48: Vergleich der Druckqualität in Abhängigkeit der verwendeten Auflage. Von links: Auf dem Druckbett mit Klarsichtfolie, auf der Marmorplatte mit Klarsichtfolie.

Der einzige sichtbare Unterschied besteht in der Ausformung der Bauteilumrahmung (Skirt / Brim). Jedoch dient diese ohnehin nur zur Überprüfung der Justierung, Bewegungs- und Extrusionsgeschwindigkeit.

Wie in den vorherigen Abbildungen ersichtlich können lange Feinstrukturen ausgebildet werden. Jedoch zeigte sich bei der Extrusion kleiner Flächen eine Schwachstelle beim Schichtwechsel.

Durch die „optimierten“ Laufwege der Düse wird beim Schichtwechsel auf die direkt zuvor ausgebildete Fläche eine neue aufgetragen. Durch die düsenbedingte Verflüssigung hat die Überzugsmasse bei kleinen Geometrien daher zu wenig Zeit genügend Stabilität auszubilden. Die Folge ist eine verlaufene Oberfläche, die keine geraden Kanten aufweist. Dieser Effekt konnte eindrucksvoll beim Druck einer kleinen Campusversion beobachtet werden (Abbildung 49 S.80).

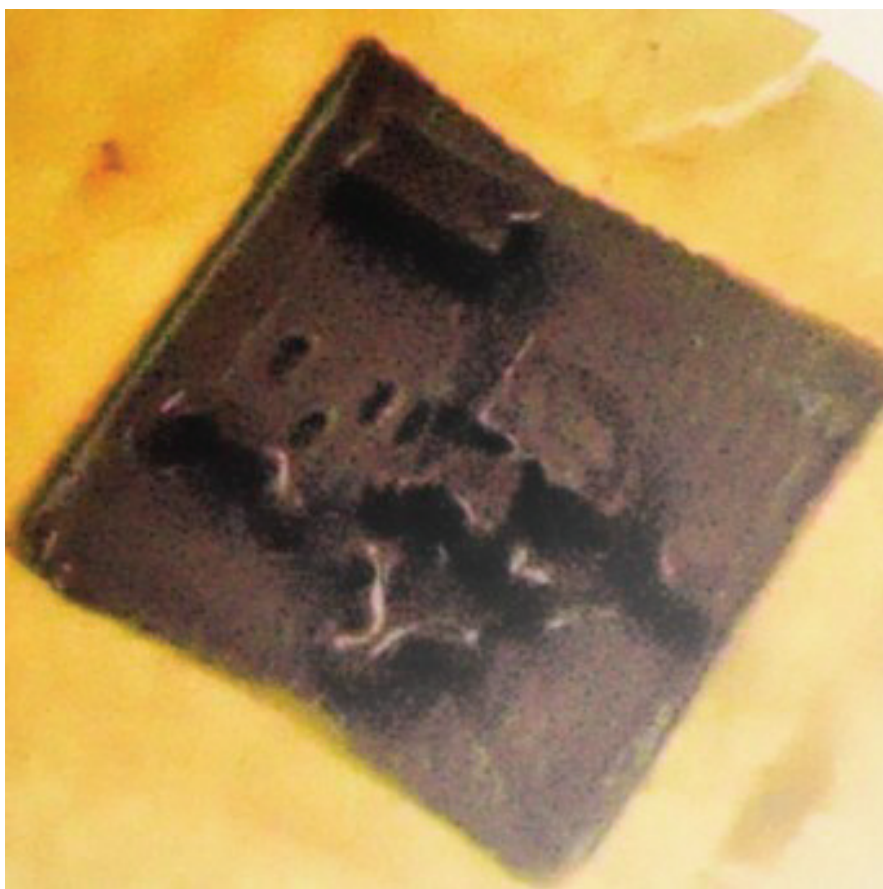


Abbildung 49: Simple Version des Campus der Hochschule Neubrandenburg.
Größe 2 cm x 2 cm x 1 cm (Breite x Länge x Höhe); Beschichtung Backpapier. Vor allem die kleinsten Ebenen (Bild Unterseite) neigen zur Kantenabrundung.

Dieser Schwachpunkt kann möglicherweise über eine neue Definition der Laufwege behoben werden. Hierbei wäre es sinnvoll eine Funktion zu implementieren, die den Startpunkt der neuen Schicht von der Größe der zuletzt extrudierten Geometrie abhängig macht.

4.3 Konstruktion der Raumkühlung

Wie in Material und Methoden beschrieben, soll die Raumkühlung die Extrusion von Fettsuspensionen bei hohen Außentemperaturen verbessern. Die Konstruktion ist in Abbildung 50 (S.81) dargestellt.

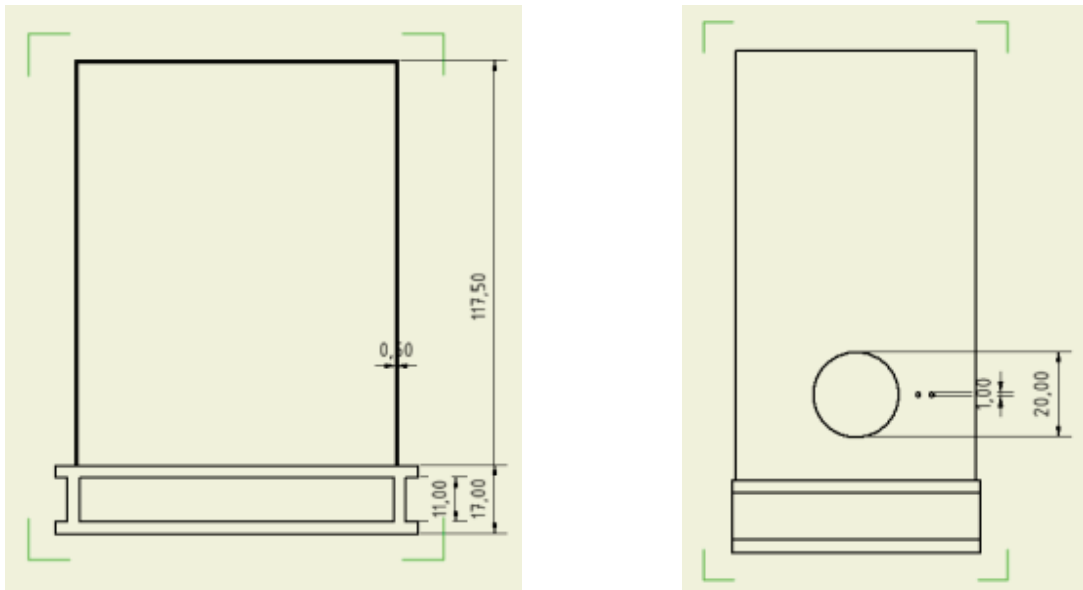


Abbildung 50: Raumkühlung und Bemaßung (in cm).

Auf der linken Seite befindet sich die Frontalansicht und auf der rechten Darstellung die linke Seitenansicht. Die kreisförmigen Aussparungen in der Seitenansicht sind ausschließlich auf einer Seite vorhanden. In die 20 cm breite Aussparung ist eine Kunststoffhalterung eingelassen, in die der Kühlluftstrom mittels eines Schlauches eingespeist werden kann. Die 1 cm breiten Aussparungen dienen der Zu- und Abfuhr des Heizwassers des Doppelmantelzylinders.

Die Schläuche können so gelegt werden, dass sich ein Schlauchübergang zum Thermostat erst außerhalb der Raumkühlung befindet. Die Enden der Schläuche können mittels Schellen und Dichtungsband wasserdicht an den Doppelmantel angeschlossen werden. So wird die Gefahr eines Wassereintrags in das System minimiert.

Die Unterkonstruktion besteht aus Pressholzplatten, die miteinander verschraubt sind. Diese stammen von einem gebrauchten Zeichentisch und besitzen an der schmalen Vorderseite einen Kunststoffschutz. Die Platten wurden aus optischen Gründen an den Schnitten und gebraucht wirkenden Stellen mit einer grauen Lackschicht versehen.

Die obere Konstruktion wird durch Plexiglas (Polystyrol) gebildet. Die Plexiglasscheiben sind mittels Winkeln verschraubt und alle Übergänge bis zu einer Höhe von 60 cm sind mit Silikon abgedichtet. Abweichend davon ist die Frontscheibe (Türfunktion) an Scharnieren aufgehängt und kann mit geringem Aufwand gänzlich von der Konstruktion entfernt werden. Die Plexiglasscheiben sind mit Metallbolzen auf der Holzkonstruktion in X- und Y-Richtung fixiert. Der Deckel wurde an drei Stellen mit Winkeln fixiert und liegt ansonsten lose auf.

In der 11 cm hohen Aussparung der Unterkonstruktion ist die Steuereinheit des Druckers sowie der Stelltrafo des Druckbetts angebracht. Die Kabel (der Elektronik) müssen an der Türseite entlang geführt werden. Hier bietet es sich an, eine Aussparung in die obere Holzplatte zu fräsen. Die gesamte Konstruktion ist auf einem beweglichen Metalltisch untergebracht, an dem sich zwei Dreifach-Steckdosen befinden, die den Anschluss der elektronischen Geräte ermöglichen.

Die Tischabmessungen erlauben es, im unteren Bereich einen Desktop PC unterzubringen. Zusätzlich kann unter dem Kühlluftschlauch ein kleines Thermostat zur Heizung des Doppelmantels angebracht werden. Die Klimaanlage sowie das Computerzubehör müssen auf einem externen Tisch positioniert werden.

Der Drucker hat innerhalb der Plexiglaskonstruktion in der Breite jeweils 1 cm Spiel und kann in der Länge um ca. 10 cm im Gehäuse verschoben werden. Der größere Spielraum in der Länge ist notwendig, um Umbauten im Gehäuse durchführen zu können. Der Drucker ist derzeit nicht an der Unterkonstruktion fixiert. Vor einem Transport bietet es sich an, in den Ecken kleinere Bohrungen und Schrauben einzufügen die ein Rutschen der empfindlichen Komponenten verhindert.

Druckversuche zeigten, dass eine Druckbetttemperatur von 7°C in der Hostsoftware registriert wird. Außerdem wird der Luftstrom so verteilt, dass die Oberfläche der extrudierten Masse keine Wellen wirft. Zudem kann ein Druck der kakaohaltigen Überzugsmasse mit und ohne Türanbringung erfolgen. Es empfiehlt sich jedoch diese nach dem Druckstart anzubringen, um nicht permanent dem kalten Luftstrom ausgesetzt zu sein.

4.4 Anpassung der Firmware

Um ein kleineres Volumen der zu kühlenden Umgebung zu erhalten und um die Raumkühlung handlicher auslegen zu können, wurde das Buildvolumen des Multirap M420 von 400 mm auf 250 mm in Y-Richtung reduziert.

Durch die Verschiebung der Lichtschranke konnte die Bewegung des Druckbetts an die Raumkühlung angepasst werden. Dementsprechend kann das Druckbett nicht mehr über die Aluminiumverstrebung des Druckers hinausfahren.

Für die Reduktion des Bauvolumens mussten die auf dem Mikrocontroller der Steuereinheit hinterlegten Druckbetteigenschaften geändert werden. Zwar können bezüglich der Druckbettmaße Einstellungen in der Hostsoftware vorgenommen werden, diese werden jedoch beim Druckstart von den auf dem Mikrocontroller hinterlegten Eigenschaften überschrieben. Dementsprechend wird bei Änderungen in der Hostsoftware nur die Bauteilpositionierung auf dem virtuellen Druckbett verändert.

Zusätzlich erfordert eine veränderte Druckbettgröße eine Anpassung der Messpunkte zur Messung der Druckbettschiefstellung. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass diese sich nicht über den Befestigungsschrauben des Druckbettes befinden (Multec GmbH, 2016). Auf eine Anpassung des Interpolierungsalgorithmus (Druckbettschiefstellung) wurde verzichtet. Dieser und die Messpunktdefinition arbeiten mit definierten Abständen zum Druckbettrand. Nachdem die Druckbettgröße in X-Richtung nicht verändert wurde, reicht es, die Abstände entlang der Y-Achse anzupassen.

Das Verschieben der Lichtschranke erfordert eine exakte Abmessung der Abstände, um die Messpunkte nicht über zu vermeidende Abschnitte (Befestigungsschrauben) zu legen.

Die Firmware des Mikrocontrollers kann über die Programmierungsumgebung Arduino eingesehen werden. Diese kann sich wie die Druckersteuerung mit dem emulierten „Port“ verbinden und gibt den Status sowie die Aktionen des Druckers wieder. Damit eine Verbindung zustande kommen kann, dürfen keine anderen Programme (z.B. Simplify3D) aktiv auf den Port zugreifen. Vor dem Einfügen einer Änderung wurde die für Tobias Franke angepasste Firmware kopiert. Auf Basis der bereits installierten Firmware wurden die vorher erwähnten Änderung vorgenommen und mit einem Kommentar „# original (Wert)“ versehen. Zusätzlich wurde die Abkühlzeit des Sensors vor der Messung der Druckbettschiefstellung von 90 auf 10 Sekunden reduziert.

Es wird davon ausgegangen, dass sich für die Funktion des Sensors daraus keine Änderungen ergeben. Die Annahme gründet darauf, dass die Kühlfunktion aktiviert wird, wenn das Druckbett wärmer als 20°C ist. Das Druckbett kann aus Sicherheitsgründen bis maximal 108°C erwärmt werden und wird nur in speziellen Fällen wärmer als 50°C gefahren.

Der Sensor befindet sich ca. 1,5 cm vom Thermistorwürfel des rechten Extruders entfernt, der vor Druckbeginn aufgeheizt wird (ca. 200°C). Auf Grund der durch Strahlung übertragen Wärme, sollte durch die Druckbetttemperatur keine merklichen Temperaturschwankungen entstehen. Ferner erfolgt die Abtastung der vier Messpunkte ohne zwischenzeitliche Kühlsequenz nach Abtasten der Druckbettmitte.

Durch die Änderungen kann die Raumkühlung für Lebensmittel und Kunststoffdruck genutzt werden, ohne den Drucker je nach Einsatzgebiet versetzen zu müssen. Der erhöhte Spielraum ermöglicht zudem weiterhin die Nutzung von großen (2 kg) Filamentrollen. Ferner können die Änderungen der Firmware von zukünftigen Nutzern schnell rückgängig gemacht oder angepasst werden, ohne auf einen kommerziell erhältlichen Dienst zurückgreifen zu müssen.

4.5 Troubleshooting

Im Lauf des Projektes wurden verschiedenste Fehler behoben. Diese waren sowohl mechanischer oder elektrischer Natur als auch software- und systembedingt. Wie schon zuvor erwähnt, können hier nur die wichtigsten Fehlerursachen ausgeführt werden.

Fehler auf Software- oder Systemseite

Ein gravierendes Problem stellte zu Anfang vornehmlich das System sowie die Hostsoftware dar. Bei komplexen oder sehr großen Bauteilen kam es zu Abstürzen des Hostprogrammes oder Fehlern des Windowsanzeige-Treibers. Dieser Fehler konnte durch den Einsatz einer neuen Grafikkarte (Geforce 710) teilweise behoben werden. Es zeigte sich zudem, dass bei der Verwendung neuerer Grafikkartentreiber > 359.21 (Stand November 2016) das System, bei Verwendung Grafikintensiver Programme, nicht ausreichend stabil lief. Zwar wird von Windows der Anzeigetreiber bei einem Absturz wieder hergestellt, dies führt jedoch unabhängig davon zu einem Druckabbruch oder Absturz des Hostprogramms. Der Anzeigetreiber produziert durch das Überschreiten einer Rückmeldezeitspanne des Hostprogrammes, bei Sliceprozessen, einen Fehler. Daraus folgend wurde eine Änderung in der Registry vorgenommen, diese erhöht die Zeitspanne, die das System erhält, um eine Rückmeldung zu geben. Die Änderung konnte diesen Fehler nicht beheben.

Daraus folgend wurde der Registry-Eingriff rückgängig gemacht und eine alte Treiberversion (NVIDIA 359.21) installiert. Seit dieser Änderung konnten keine Abstürze des Anzeigetreibers mehr beobachtet werden.

Um dennoch einem Absturz des Hostprogrammes vorzubeugen, wurde der Detailgrad der Druckvorschau auf „Low“ gestellt (Abbildung 51 S.86). Diese Einstellung macht den Slice-Prozess, aber vornehmlich die Vorschau der einzelnen Schichten weniger rechenintensiv. Nachdem diese Änderung ausschließlich die Darstellung im Programm beeinflusst wird der resultierende G-Code nicht verändert.

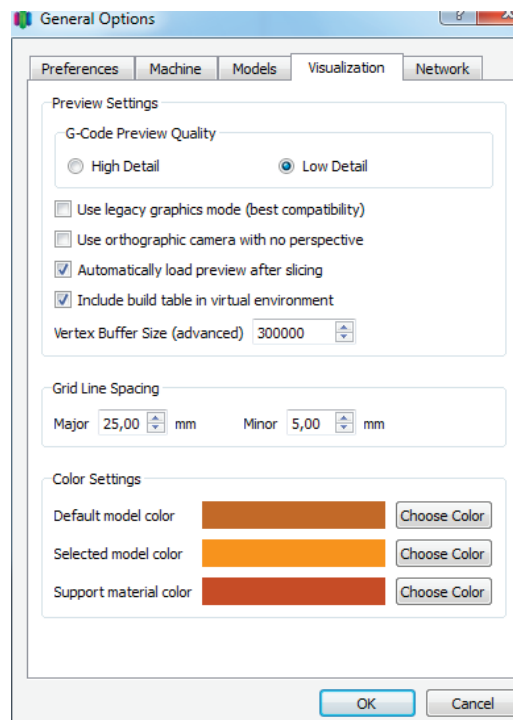


Abbildung 51: Simplify3D Darstellungsoptionen.

Nach einer Neulizensierung der Hostsoftware (Simplify3D) konnte beobachtet werden, dass sich einige zuvor genutzte Druckprofile nicht laden ließen. Beim Versuch diese aufzurufen kam es zu Programmabstürzen. Interessanterweise konnten diese Profile jedoch weiterhin exportiert werden, wobei leider nicht alle Einstellungen übertragen wurden. Im Laufe der Zeit konnte eine „Kettenreaktion“ ausgehend von den korrumpten Profilen beobachtet werden, die das Laden anderer Profile beeinträchtigte.

Um weiter mit Simplify3D arbeiten zu können, wurde die Software auf ihre Standardeinstellungen zurückgesetzt. Bei diesem Prozess werden alle angelegten Profile und Einstellungen gelöscht. Um dennoch die existierenden Druckprofile zu behalten, wurden diese exportiert und von wichtigen Einstellungen Abbilder angefertigt. Nach der Neuauflistung der Software konnten die „alten“ Profile wieder hergestellt werden. Diese sind weiterhin als Sicherheitskopie auf dem angeschlossenen Desktop PC hinterlegt.

Aufgrund der nach einer Neulizensierung aufgetretenen Programmkorruption wird empfohlen, vor einem Programmupdate die neu hinterlegten Standardprofile für verschiedene Kunststoffe sowie Lebensmitteldruck zu exportieren und zu sichern.

Fehler auf Seiten der Elektronik

Im laufenden Betrieb kam es anfangs häufiger zur Abschaltung der Druckersteuerung. Wobei folgender Fehlercode angezeigt wurde „Fehler: Min Temperature triggered T1...“. Demzufolge wurde die Druckersteuerung aus Sicherheitsgründen beendet, weil die minimale Temperatur des linken Extruders (T1) unterschritten wurde. Dieser Fehler wird auch bei einer nicht zustande kommenden Kommunikation mit dem Thermistorwürfel ausgegeben. Es zeigte sich, dass sich die Verkabelung des Thermistorwürfels etwas gelockert hatte und bei starken Bewegungen ein kurzer Kontaktverlust entstand. Durch die Erneuerung der Lötstellen konnte dieses Problem behoben werden.

Die Fehlerursache ist indes in einer Kombination der Anbringung des Thermistorwürfels zu sehen sowie der Verwendung in der FoodPrint^{3D} Applikation. Die Verbindung des linken Würfels läuft direkt hinter dem rechten Heizelement vorbei (Abbildung 52 S.88) und wird demnach permanenten Temperaturschwankungen zwischen 7°C und 240°C ausgesetzt. Wobei der Extremwert 240°C auch über Zeiträume von bis zu 72 Stunden (Zylindergenerierung aus ABS) erreicht wird. Durch die Verwendung des linken Würfels in der Lebensmittelextrusion wird dieser häufig abmontiert. Bei der Montage wird der Würfel mit angebrachtem Kabelstück auf das untere Gewinde der Düse gedreht. Dabei kommt es zu einer Zugbelastung auf die Lötstellen.

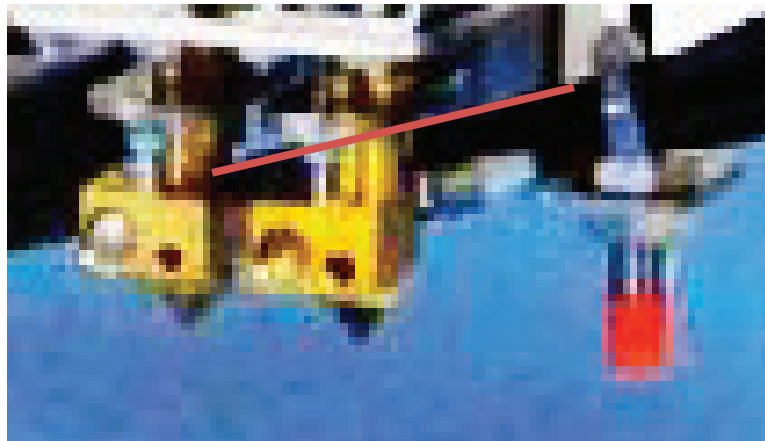


Abbildung 52: Verkabelung Thermistorwürfel am Multec M420.¹³ Die rote Linie kennzeichnet den Kabelverlauf des linken Thermistorwürfels.

Fehler auf Seiten der Mechanik

Der Versatz von Bauteilen (Abbildung 53 S.88) kann einerseits parameterbedingt und andererseits durch Kraftübertragung der Schrittmotoren bedingt sein.



Abbildung 53: Mechanisch bedingter Versatz. Der abgebildete Versatz entstand durch eine gelöste Fixierung, dabei kann sich die Riemenführung bei schnellen Bewegungen um den Fixierungsbolzen drehen.

¹³ (Multec GmbH, Aufbau- und Bedienungsanleitung 3D-Drucker Multirap M420S, 2016)

Kommt es zu einem mechanisch bedingten Versatz, müssen die Riemen der Schrittmotoren überprüft werden. Diese dürfen einerseits nicht zu locker und andererseits nicht zu fest angezogen werden. Außerdem sollte deren Führung (Abbildung 54 S.89) kontrolliert werden, ob sich die Fixierung der „Rolle“ von der eingefrästen Nut gelöst hat.

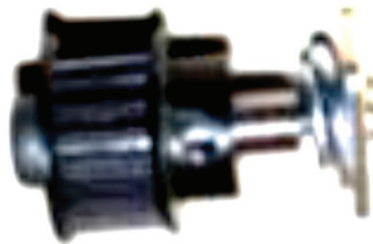


Abbildung 54: Riemenführung der Schrittmotoren.¹⁴

Fehler durch Prozessparameter

Durch falsch definierte Prozessparameter kann es ebenfalls zu einem Versatz in X- Y- Richtung kommen. Dieser tritt im Gegensatz zum mechanischen Versatz eher periodisch und mit geringerer Auswirkung auf (Abbildung 55 S.90).

¹⁴ (Multec GmbH, Aufbau- und Bedienungsanleitung 3D-Drucker Multirap M420S, 2016)

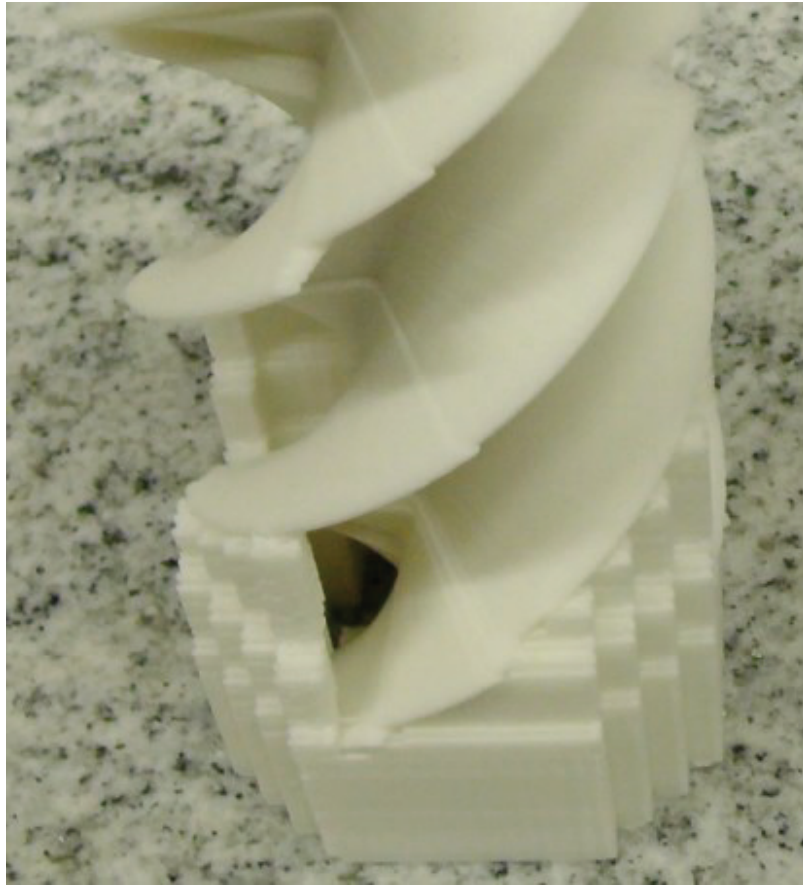


Abbildung 55: Prozessparameterbedingter Versatz.

Die Hostprogramme bedienen sich einer simplen Mechanik der Positionsbestimmung. Hierzu wird der Druckbereich nur zu Beginn des Druckes durch Anfahren der Endstopps ausgemessen. Im weiteren Druckprozess wird die Position anhand der Schritte der Elektromotoren ermittelt. Demzufolge kann es zu gravierenden Abweichungen kommen, wenn ein Motor gegen eine zu große Kraft anfahren muss. Diese kann unter anderem durch Warping des Bauteiles oder zu viel Materialextusion entstehen. In beiden Fällen bleibt die Düse des Extruders an ausgehärtetem Kunststoff hängen. Nachdem immer eine leichte Schmelzung des umgebenden Kunststoffes um die Düse erfolgt, kommt es bei Geschwindigkeitserhöhung leichter zu diesem Fehler.

4.6 Anregungen für zukünftige Arbeiten

4.6.1 Fördersystem

Die Lebensmittelextrusion über eine Förderschnecke kann nur eine „kleine“ Viskositätsrange bearbeiten. Diese kann zudem nur von einer beschränkten Menge an Lebensmitteln erreicht werden, ohne eine Aushärtung stark zu behindern. Die Auswertungen der Fließeigenschaften zeigten, dass weitere Untersuchungen in diesem Feld erforderlich sind. Vornehmlich sollte der Einfluss der Fließgrenze auf die Extrudierbarkeit einer Masse weiter untersucht werden. Hierfür würde sich das Arbeiten mit verschiedenen Emulgatoren anbieten.

Um eine breitere Lebensmittelpalette für den 3D-Druck nutzbar zu machen, sollte daher das Fördersystem überarbeitet werden. Eine simple aber hoch effektive Variante kann über die Nutzung eines Hubkolbens realisiert werden. An den Anforderungen an das ursprüngliche System angelehnt (abzüglich der kontinuierlichen Förderung), kann dieser über die Nutzung gedruckter Teile zum Leben erweckt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen einen ersten Entwurf des Hubkolbens, sowie einer zugehörigen Halterung für den Doppelmantelzylinder und einen Schrittmotor.

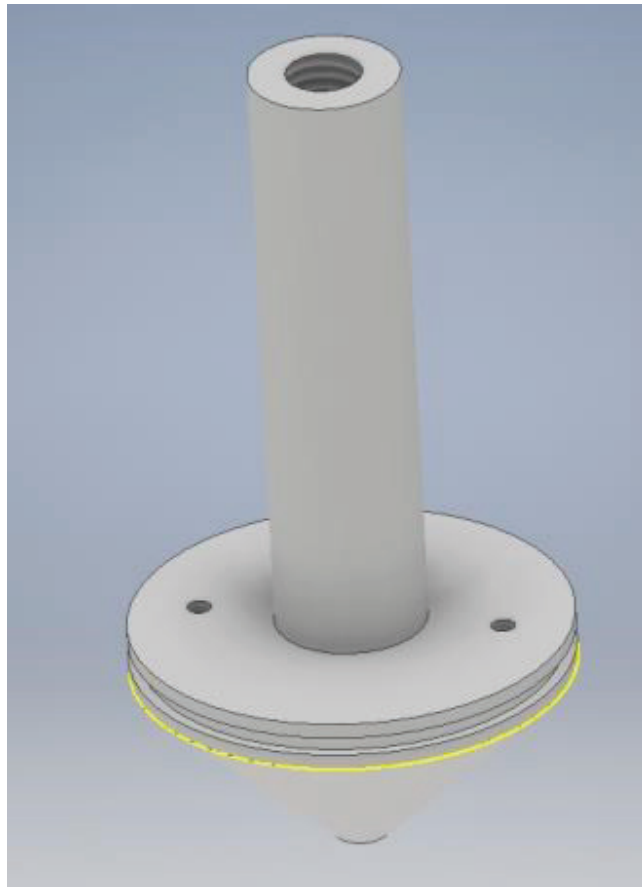


Abbildung 56: Hubkolben.

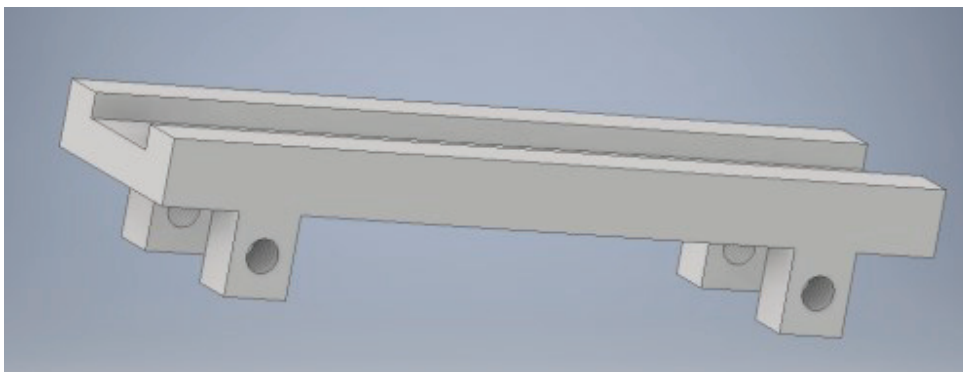


Abbildung 57: Halterung an der Z-Achse.

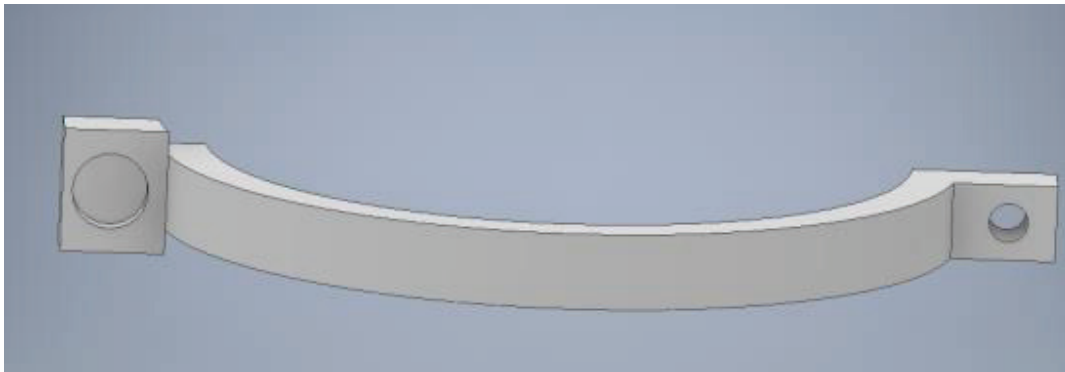


Abbildung 58: Halterungszusatz zur Anbringung des Doppelmantelzylinders.

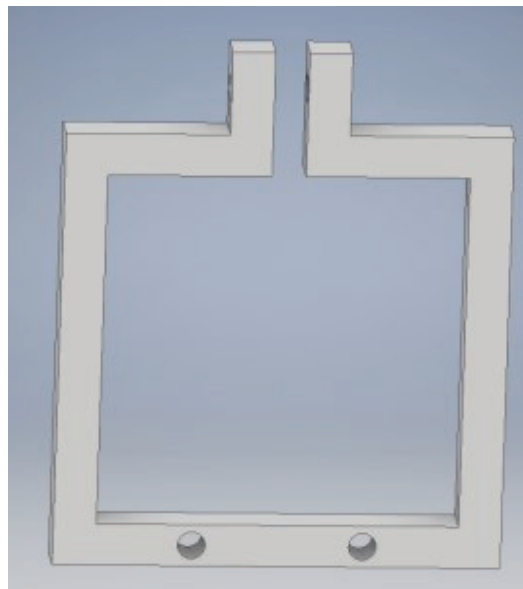


Abbildung 59: Halterung des Schrittmotors.

Die Halterung kann an der Z-Achse des Multirap M420 montiert werden. Sie besitzt vier halbkreisförmige Ausläufer, die über Schraubverbindungen miteinander und der Halterung verbunden werden können. Diese sollen eine leichtere Anpassung sowie die Anbringung des Doppelmantelzylinders vereinfachen.

Der Hubkolben soll in den existierenden Zylinder eingesetzt werden. Über das Einfügen eines Gewindes (oder einer Bohrung und einer Mutter) und Fixierung in X- und Y-Richtung soll dieser entlang einer Gewindestange in Z-Richtung durch einen Schrittmotor bewegt werden.

Ergebnisse und Auswertung

Diese Variante der Steuerung sollte eine feinere Steuerung der Lebensmittelextrusion ermöglichen. Um ein Einfahren des Hubkolbens in den Zylinder zu verhindern, kann die Länge der Gewindestange angepasst werden.

Im Rahmen der Arbeit zeigte sich, dass der Sensor der Z-Achse eine in Bezug auf die verwendeten Schichthöhen (0,1 mm) beim Lebensmitteldruck zu große Ungenauigkeit aufweist. Diese Ungenauigkeit kann zur Verschiebung der Justierung sowie falschen Interpretationen der Schiefstellung des Druckbettes führen. Diese Ungenauigkeit führt dazu, dass eine Justierung je nach Höhe der ersten Schicht nur für einen Teilbereich des Druckbettes gilt. Um eine gleichbleibende Druckqualität zu gewährleisten, sollte demnach ein anderes System, vorzugsweise optische Abstandsmessung, zur Messung des Abstands in Richtung der Z-Achse verwendet werden.

4.6.2 Lebensmittelmodelle

Wie zuvor beschrieben erfolgt der Druck eines Modells mit einem Lebensmittel im Vergleich zu Kunststoff langsam. Die geringe Geschwindigkeit in Kombination mit einer tolerierbaren Druckerlaufzeit führt dazu, dass Modelle vergleichsweise klein ausgelegt werden. Sollen Modelle größer als das zur Verfügung stehende Buildvolumen des Druckers werden, ist es erforderlich diese aufzuteilen. Für den Lebensmitteldruck sollte jedoch erst einmal die Generierung eines Modelles in Angriff genommen werden, das den Abmessungen des Druckraumes entspricht. Die aufteilende Herangehensweise kann die Erschaffung eines großen Modells mit der hergestellten kakaohaltigen Druckmasse möglich machen. Nach dem Druck sollten die separaten Teile durch Anwärmen der Kontaktflächen leicht kombinierbar sein.

Als ein erster Versuch und Aushänger des FoodPrint^{3D} Projektes könnte der Campus der Hochschule Neubrandenburg (Abbildung 60 S.95) herangezogen werden.

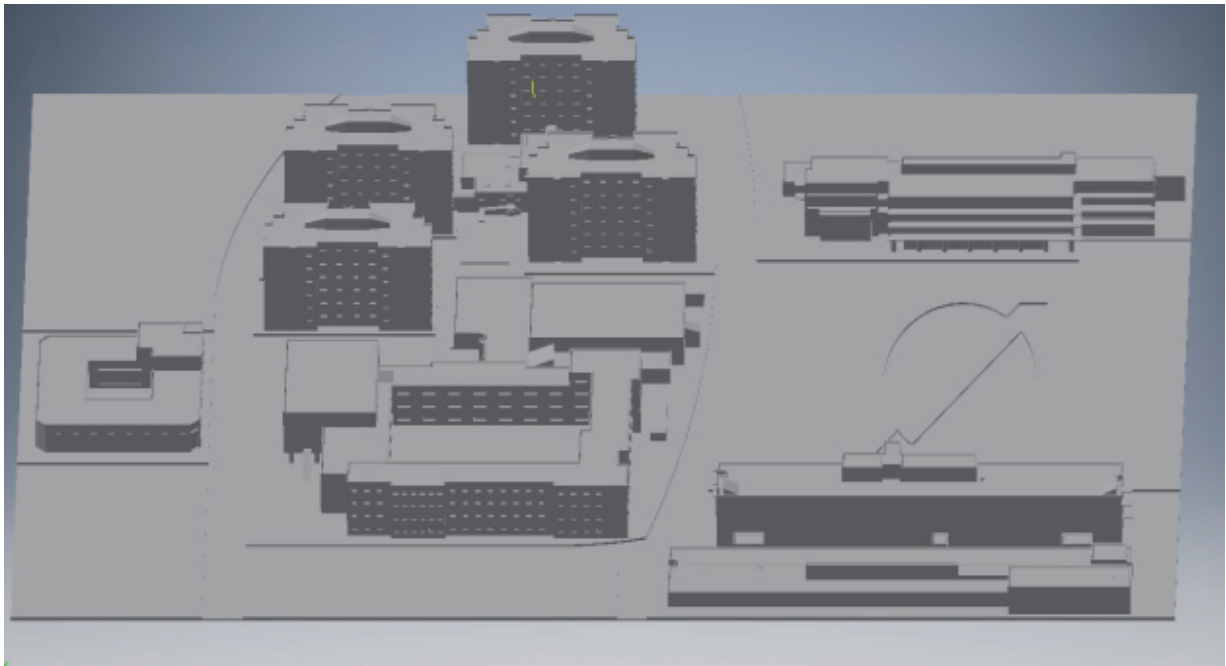


Abbildung 60: Campus der Hochschule Neubrandenburg.

Jedes Gebäude und die Grundplatte liegen als separates Modell vor. So können diese jeweils einzeln oder als Komplex aus der kakaohaltigen Überzugsmasse generiert werden. Auch eine Verwendung als Lebensmittelpuzzle (Marketing) kann in Betracht gezogen werden. Hierfür müsste die Dicke der Grundplatte etwas erhöht werden, um die Vertiefungen der Gebäude besser ausformen zu können.

Die einzelnen Komponenten wurden für den Probedruck aus Kunststoff in Inventor zusammengefügt. Weiterhin wurden einige Komponenten einzeln gedruckt. Diese Testläufe zeigten, dass sich durch die Verschmelzung der verschiedenen Komponenten vor der Generierung des STL-Files keine Nachteile ergeben.

5. Zusammenfassung

3D-Druck bietet eine vergleichsweise neue Herstellungsmethode mit flexiblen Einsatzmöglichkeiten. Neben dem klassischen Prototypenbau geht im Lebensmittelsektor die Entwicklung zu gedruckten Nahrungsmitteln. Derzeitig ist nur eine kleine Auswahl an Nahrungsmitteln wirklich druckfähig. Aus diesem Grund gilt es, die Vielfalt der zur Verfügung stehenden druckbaren Lebensmittel zu erhöhen. Gleichzeitig müssen jedoch die bereits funktionierenden Systeme optimiert und die Schwierigkeiten für die jeweilige Lebensmittelgruppe analysiert werden.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Optimierung eines Lebensmittelextruders, basierend auf dem *Fused Layer Modeling* Verfahrens. Hierbei wurden alle Bereiche von der Bauteilkonstruktion über die Druckmassenherstellung bis zur Druckoptimierung bearbeitet.

Der Fokus lag einerseits auf der Generierung eines Lebensmittelextruders und der Erleichterung der Bedienung. Andererseits wurden die system- und prozessbedingten Schwierigkeiten bearbeitet, um Nutzern eine weiterführende Arbeit zu erleichtern. Zudem wurden die erstellten Komponenten replizierbar hinterlegt, um einen dauerhaften Betrieb zu ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich für Ausdrücke aus Fettsuspensionen nahezu jeder Untergrund eignet. In der Modellauslegung für den Druck mit einem solchen Lebensmittel kann mit Schrägen und Rundungen gearbeitet werden. Allerdings stellten sich gerade Überhänge, größere Hohlräume, Löcher und Füllstrukturen als nicht überspannbar heraus.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass der Druck einer sehr detaillierten Struktur möglich ist. Gleichzeitig hat die Arbeit weitere Problemstellen aufgedeckt, die weiterer Optimierung bedürfen.

6. Abstract

The printing technique of additive manufacturing is currently evolving from its original focus on prototype generation towards providing finished products. The ongoing boom cleared the way for new applications, with printing of edible 3D-objects being one of the most recent areas of active development. This work explores the utility of such methods for printing chocolate-like products, including construction, software adaption, optimization and handling of a food extruder. The construction part consists of designing and producing the necessary parts to equip a commercial fused-filament modeling printer with a food extruder. Therefore the process parameters were optimized for “polylactic acid high temperature” and the printer was equipped with an area cooling device. The food extruder is run with a cacao-containing coat. It was possible to print on various table covers and determine the feasible print detail for the produced coating. In addition this thesis also provides manuals and a troubleshooting guide for the adapted system.

7. Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschied der Oberflächenbeschreibung durch Netz oder volumenbezogene Definition	4
Abbildung 2 STL-Oberfläche	6
Abbildung 3: Durch Eckpunkte bedingte Form eines Kreises.	7
Abbildung 4: Geslicetes Modell	9
Abbildung 5: Das Konzept der Zackenhöhe	10
Abbildung 6: FLM Verfahren mit 2 Druckköpfen	12
Abbildung 7: Nudelextrusion.....	13
Abbildung 8: Prototypengenerierung mittels FDM Verfahren.....	13
Abbildung 9: Barilla Nudeldrucker.	15
Abbildung 10: Käse 3D.	15
Abbildung 11: Pfannkuchendrucker von Teremok.	16
Abbildung 12: Multirap M420 mit Sensor.	19
Abbildung 13: Lichtschranke.....	20
Abbildung 14: Extruderkomplex und Sensor (kreis).....	21
Abbildung 15: FoodPrint ^{3D} Applikation von Tobias Franke (Franke, 2016).....	22
Abbildung 16: Technische Zeichnung Doppelmantelzylinder.	24
Abbildung 17: Technische Zeichnung Förderschnecke.	24
Abbildung 18: Zylinder Design (Franke, 2016) mit der Düsenhalterung oben.	24
Abbildung 19: Schnecke mit Deckel und Kegelrad.	24
Abbildung 20: Testwürfel Größenabweichung.	32
Abbildung 21: Fräse Proxon Micromot System an einem 3D-Drucker.....	38
Abbildung 22: Aufbau Koaxial Rheometer (Römis, 2012).....	40
Abbildung 23: Einkaufschip Design (Steinke, 2016).	42
Abbildung 24: Einfaches Modell des Campus der HS Neubrandenburg.	42
Abbildung 25: FoodPrint ^{3D} Applikation mit direkter Luftströmung.	43
Abbildung 26:Größenabweichung der ersten Schicht 3D Surfaceplot der Temperatur und Verschalung.....	48

Abbildung 27:Größenabweichung der ersten Schicht 3D Surfaceplot der Temperatur und Größe.	49
Abbildung 28: Größenabweichung des Körpers 3D Surfaceplot der Geschwindigkeit und Größe.	52
Abbildung 29: Größenabweichung des Körpers 3D Surfaceplot der Geschwindigkeit und Temperatur.	53
Abbildung 30: Zoom auf eine stark betroffene Stelle.	55
Abbildung 31: Bemaßungen zur Generierung eines soliden Zylinders.	57
Abbildung 32: Zylinder neu Variante 1.....	59
Abbildung 33: Optimiertes Zylinderdesign.	60
Abbildung 34: Kaltglasur und Dichtmassen Versuch.	62
Abbildung 35: Wasserdichter Zylinder PLAHT, optimiertes Design mit Gewindebohrung.	64
Abbildung 36: Baugruppe Schnecke, Deckel und Kegelrad. Design (Franke, 2016).	65
Abbildung 37: Deckel-Stecksystem.	66
Abbildung 38: Kegelräder links PLAHT, rechts PLA.	66
Abbildung 39: Deckel komplett.	66
Abbildung 40: Förderschnecken rechts PLAHT, links PLA.	66
Abbildung 41: Messing-Gewindestange.	68
Abbildung 42: Zylinderbatterie.	68
Abbildung 43: Zylinderbatterie stehend.	68
Abbildung 44: Aluminiumzylinder.....	69
Abbildung 45: Optimierte Düse für den Lebensmitteldruck.....	70
Abbildung 46: Schubspannung über der Scherrate für die Druckmasse.	73
Abbildung 47: Schokoladenchip-Design (Steinke, 2016).	78
Abbildung 48: Vergleich der Druckqualität in Abhängigkeit der verwendeten Auflage... ..	79
Abbildung 49: Simple Version des Campus der Hochschule Neubrandenburg.	80
Abbildung 50: Raumkühlung und Bemaßung (in cm).	81
Abbildung 51: Simplify3D Darstellungsoptionen.	86
Abbildung 52: Verkabelung Thermistorwürfel am Multec M420.....	88
Abbildung 53: Mechanisch bedingter Versatz.....	88
Abbildung 54: Riemenführung der Schrittmotoren	89
	99

Abbildung 55: Prozessparameterbedingter Versatz.	90
Abbildung 56: Hubkolben.....	92
Abbildung 57: Halterung an der Z-Achse.....	92
Abbildung 58: Halterungszusatz zur Anbringung des Doppelmantelzylinders.	93
Abbildung 59: Halterung des Schrittmotors.	93
Abbildung 60: Campus der Hochschule Neubrandenburg.....	95

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:CAD-Programme	5
Tabelle 2: In vorangegangenen Projekten verwendete Software.	27
Tabelle 3 Range der untersuchten Parameter zur Bestimmung der Größenabweichung	32
Tabelle 4 Versuchsplan Größenabweichung	33
Tabelle 5: Parameter Bauteil solidieren.	34
Tabelle 6: Versuchsplanung Bauteile solide generieren.....	35
Tabelle 7: Nachbehandlung der Zylinder mit Lacken, Harzen und Klebern.....	36
Tabelle 8: Versuche Detailgrad und Bauteilauslegung	41
Tabelle 9: Messwerte der Größenabweichung in mm.	45
Tabelle 10: Auswertung der relativen Größenabweichung der ersten Schicht.	46
Tabelle 11: Auswertung der relativen Größenabweichung des Körpers	50
Tabelle 12: Kalkulierbare Größenabweichung bei der Arbeit mit Standardprofilen.....	54
Tabelle 13: Parameter und Range der Prozessparameteranpassung für die Generierung eines wasserdichten Zylinders.....	63
Tabelle 14: Druckparameter für den „Grobdruck“ der FoodPrint ^{3D} Komponenten	67
Tabelle 15: Menge und Zeitpunkt der Zutatenzugabe für die Druckmassenherstellung	72
Tabelle 16: Casson Fließgrenze, Casson unendliche Viskosität und die Schubspannung der Massen.....	74

7.3 Quellen

- 3D Systems Inc. (1988). *3dsystems.com*. Abgerufen am 2. April 2017 von <https://de.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>
- Barilla G. e R. Fratelli S.P.A. (09. Mai 2016). LA PASTA DEL FUTURO? È STAMPATA IN 3D A CIBUS 2016, BARILLA PRESENTA IL PROTOTIPO IN ANTEPRIMA. Parma, Italien.
- Beckett, S. (1999). *Industrial Chocolate Manufacture and Use (Third Edition)*. York, UK: Blackwell Science Ltd.
- Cisse, T. (2016). Entwicklung einer schnell-härtenden Lebensmittel-Rezeptur für den 3D-Drucker. Neubrandenburg.
- Danforth, M. K. (1996). Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyping Journal*, S. 4 - 19 Vol. 2 Iss 4.
- Dolenc, A., & . Mäkelä, I. (Februar 1994). Slicing procedures for layered manufacturing techniques. *Computer-Aided Design*, S. 119-126. Volume 26, Issue 2,.
- Espalin, D., Albert, J., Medina, F. R., & Wicker, R. (2014). Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. *Rapid Prototyping Journal*, S. 236 - 244. Vol. 20 Iss 3.
- Fasterman, P. (2012). *3D Druck / Rapid prototyping Eine Zukunftstechnologie kompakt erklärt*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.
- Fasterman, P. (2014). *3D-Drucken Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Franke, T. (2016). *3D-Druck Systemauswahl und Adaption für die Lebensmittel-Produktentwicklung*. Neubrandenburg.
- Gröneweg, S. (20. 05 2016). *computerwoche*. Abgerufen am 12. April 2017 von <http://www.computerwoche.de/a/so-revolutioniert-der-3d-druck-die-medizin,3214496>
- Grund, M. (2015). *Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.
- Gubbels, C., & van der Zalm, E. (23. November 2015). Reprap firmware based on Sprinter and grbl. Multec GmbH.
- Heinze-Wallmeyer, S. (19. Oktober 2016). *3D-GRENZENLOS*. Abgerufen am 04. April 2017 von Das 3D-Drucker Online-Magazin: <https://www.3d->

- grenzenlos.de/magazin/zubehoer-zusatzgeraete/colorpod-suessigkeiten-drucken-27195373/
- Helmholz, D. (2015). Electing a suitable software for a 3D-Printer. Neubrandenburg.
- Kaiser, R. (2016). *Development of fast solidifying food mixture for 3D-printing*. Neubrandenburg: Hochschule Neubrandenburg.
- Kaiser, R. (2016). *Development of fast solidifying food mixture for 3D-printing (Fortsetzung)*. Neubrandenburg: Hochschule Neubrandenburg.
- Kleinert, J. (1997). *Handbuch der Kakaoverarbeitung und Schokoladenherstellung*. Hamburg: Behr's Verlag.
- Krämer, A. (08. Dezember 2016). *3D-Grenzenlos*. Abgerufen am 12. April 2017 von Das online 3D-Druck Magazin: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/wacker-kaugummi-aus-3d-drucker-27210123/>
- Krämer, A. (27. Mai 2016). *3D-GRENZENLOS*. Abgerufen am 12. April 2017 von Das 3D-Drucker Onlinemagazin: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-drucker/xoco-schokoladendrucker-27175663/>
- Krämer, A. (01. März 2017). *3D GRENZENLOS Das 3D-Drucker Online-Magazin*. Abgerufen am 13. April 2017 von <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/teremok-pfannkuchen-mit-3d-drucker-27237353/>
- Le Tohic, C., O'Sullivan, J. J., Drapala, P. K., Chartrin, V., Chan, T., Morrison, P. A., et al. (08. Februar 2017). *Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese*. Abgerufen am 12. April 2017 von <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417300420>
- Multec GmbH. (2014). MULTIRAP von MULTEC Das 3D Druckersystem "Made in Germany". *Multirap Datenblatt*.
- Multec GmbH. (2016). *Aufbau- und Bedienungsanleitung 3D-Drucker Multirap M420S*.
- Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing a review. *Rapid Prototyping Journal*, S. 274–288. Vol. 9 Num. 5.
- Pfister, R. (20. Juli 2016). Improved conditioning of 3D-printed food casting molds for higher consumer acceptance. Neubrandenburg.
- Physica Messtechnik GmbH. (1995). Bedienungsanleitung: Rheolab UDS 200. Stuttgart, Deutschland.

- Pluta, W. (3. 6 2016). *Golem*. Abgerufen am 12. 04 2017 von IT-News für Profis: <https://www.golem.de/news/luftfahrt-drohnen-schwereelosigkeit-und-ein-flieger-aus-dem-3d-drucker-1606-121282.html>
- Print2Taste GmbH. (2016). *Print2Taste*. Abgerufen am 12. 04 2017 von printing food naturally: <https://www.print2taste.de/de/bocusini-pro-das-system/>
- Römisch, J. (2012). Physikalische und sensorische Eigenschaften von Schokoladen unterschiedlicher Herstellungsmethoden. Neubrandenburg.
- Sabourin, E., Houser, S. A., & Bohn, J. H. (1997). Accurate exterior, fast interior layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, S. 44-52. Vol. 3. No. 2.
- Steinke, J. (2016). *FOODPRINT3D - Erstellen einer Gussform für Lebensmittel sowie eines Handbuchs zur Durchführung*. Neubrandenburg.
- Upcraft, S., & Fletcher, R. (2003). The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation*, S. 318 -330. Vol. 23 Iss 4.
- voxeljet AG. (2017). *Voxeljet*. Abgerufen am 12. 04 2017 von <http://www.voxeljet.com/de/branchen/automotive/>
- Wiegmann, D. (16. 09 2015). *manager magazin*. Abgerufen am 12. 04 2017 von <http://www.manager-magazin.de/lifestyle/genuss/3d-drucker-fuer-lebensmittel-im-kommen-a-1052531.html>

7.4 Bildquellen

Alle hier nicht aufgeführten Abbildungen sind selbst erstellt. Onlinequellen zuletzt abgerufen 10.06.2017.

Abbildung 5: Das Konzept der Zackenhöhe	10
(Dolenc & . Mäkelä, 1994)	
Abbildung 6: FLM Verfahren mit 2 Druckköpfen.	12
http://www.protec3d.de/3d-drucken/vor-und-nachteile/	
Abbildung 7: Nudelextrusion.....	13
http://www.italgi.it/de/maschinen-fur-kombinierte-nudeln-Multipla-Kombiniert-mit-Pressen_c4_p70.html	
Abbildung 8: Prototypengenerierung mittels FDM Verfahren.....	13
http://www.chemieundmore.com/archive/844594/Entwicklung-biobasierter-Kunststofffilamente-fuer-den-3D-Druck-im-Schmelzschichtverfahren-(FDM).html	
Abbildung 9: Barilla Nudeldrucker.	15
https://3druck.com/wp-content/uploads/2016/05/barilla_3d_printer_pasta.jpg	
Abbildung 10: Käse 3D.	15
https://www.google.de/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwi8xfGttaHTAhUjSJoKHTbtDPQQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fwww.wamungo.de%2FImages%2FRaum-Kaese-41cc7b78970281690f34b73&psig=AFQjCNGqE1vpzW3aqQU8GBHZ5wcfRSQgZw&ust=1492172323598303&cad=rjt	
Abbildung 11: Pfannkuchendrucker von Teremok.	16
https://www.3d-grenzenlos.de/wp/wp-content/uploads/2017/03/teremok-pfannkuchendrucker.jpg	
Abbildung 12: Multirap M420 mit Sensor.	19
(Multec GmbH, 2016)	
Abbildung 13: Lichtschranke.....	20
(Multec GmbH, 2016)	
Abbildung 14: Extruderkomplex und Sensor (Kreis).	21
(Multec GmbH, 2016)	

Abbildung 21: Fräse Proxon Micromot System an einem 3D-Drucker.....	38
(Multec GmbH, 2014)	
Abbildung 22: Aufbau Koaxial Rheometer	40
(Römis, 2012)	
Abbildung 52: Verkabelung Thermistorwürfel am Multec M420.....	88
(Multec GmbH, 2016)	
Abbildung 54: Riemenführung der Schrittmotoren	89
(Multec GmbH, 2016)	

Anhang:

I. Maßabweichung gemessene Relativabweichung

Trial	Messung 1 1-Schicht	Messung 2 1-Schicht	Messung 3 1-Schicht	Messung 1 Körper	Messung 2 Körper	Messung 3 Körper
12	3.33	3.67	2.33	2.33	1.67	2.33
1I	4.50	4.50	4.50	3.00	3.50	3.00
1	2.00	2.25	2.25	1.50	1.75	1.75
8	6.50	6.50	6.50	3.50	3.00	3.50
2	3.75	4.00	3.75	2.00	1.75	1.75
2I	4.00	3.75	3.75	1.75	2.00	2.00
3	3.50	3.25	3.50	1.75	2.00	2.00
3I	7.00	7.50	7.00	3.50	4.00	4.00
4	6.50	6.50	6.50	3.00	3.00	2.50
4I	6.50	6.50	7.00	2.50	2.50	3.00
20	3.00	2.25	2.75	1.00	0.75	0.75
17	3.75	3.50	3.50	1.50	1.50	1.50
14	3.50	3.50	3.25	1.00	1.50	1.25
7	4.00	4.33	4.00	2.00	2.33	2.00
10	2.50	2.75	2.75	1.50	1.25	1.50
5	3.33	2.67	3.00	2.00	1.67	1.67
5I	4.50	4.50	5.00	2.50	2.50	3.00
13	7.50	7.00	8.00	2.50	3.50	2.50
11	7.00	7.50	7.00	2.50	3.50	3.50
6	6.50	7.00	7.00	2.00	3.00	3.00
9	4.00	4.00	3.75	2.50	2.50	1.75
19	1.75	2.00	1.75	1.75	2.00	1.75
18	4.00	4.50	4.00	4.00	3.50	3.00
16	5.00	4.00	2.50	3.00	1.50	1.50
15	5.33	5.00	5.00	2.00	2.00	1.67

