

Entwurf und Druck eines technischen und eines organischen
Objekts mit dem Ultimaker 2

T2_3100
Studienarbeit

Bachelor of Engineering

des Studienganges IT Automotive

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Hanna Huber & Jörn Seybold

Juni 2016

Bearbeitungszeitraum:
Kurs, Matrikelnummern:
Ausbildungsfirma:
Betreuer:

Oktober 2015 – Juni 2016
TINF13ITA, 4145264 & 1299140
Robert Bosch GmbH
Rudolf Messer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Technische Grundlagen & Stand der Technik	5
2.1 Drucktechniken	5
2.1.1 Schmelzschichtverfahren	5
2.1.2 Stereolithographie	6
2.1.3 Sintern	6
2.1.4 Binder-Verfahren	7
2.1.5 Schicht-Laminat-Verfahren	7
2.2 Materialien	7
2.2.1 Metalle und deren Legierungen	7
2.2.2 Monomere	7
2.2.3 Thermoplaste	7
2.3 Stabilitätsanalyse	8
2.3.1 Schmelzschichtverfahren	8
2.3.2 Stereolithographie	8
2.3.3 Lasersintering	9
2.3.4 Binder-Verfahren	9
2.3.5 Schicht-Laminat-Verfahren	9
2.4 Computer-Aided Design (CAD)	9
2.4.1 CAD-Programme	10
Solid Edge	10
Blender	10
2.4.2 Slicing	11
Cura	11
Repetierhost	11
2.4.3 Dateiformate	12
Stereolithography (STL)	12
G-Code	13
2.5 Der dreidimensional (3D)-Drucker Ultimaker 2	13
3 Entwicklung eines technischen Objekts	15
3.1 Ist-Analyse	16
3.2 Konzept: Modulare Boxen	17
3.3 Entwurf	17
3.4 Druck des Objekts	19
3.5 Fazit: Eignung für technische Objekte	20
3.5.1 Material	20
3.5.2 Unzureichende Druckgenauigkeit	20

4 Entwicklung eines organischen Objekts	22
4.1 Konzept	22
4.2 Entwurf	23
4.3 Druck des Objekts	24
4.4 Fazit: Eignung für organische Objekte	25
5 Fehler beim Drucken mit dem Ultimaker 2	26
5.1 Hardware-Defekte	26
5.1.1 Verschleiß der PTFE-Kopplung	26
5.1.2 Fehlfunktion des Temperatursensors	27
5.1.3 Reibung in Bowdenzug	28
5.1.4 Gebogene Heizplatte	28
5.1.5 Bollen an Heizblock	28
5.2 Fehler während des Druckens	29
5.2.1 Mangelnde Haftung des Objekts auf der Druckplatte	29
5.2.2 Stringing	30
5.2.3 Zu wenig Material	31
5.2.4 Grinding	31
5.2.5 Verschmutzte Düse	32
5.2.6 Druckergebnisse abhängig von Druckposition	32
5.2.7 keine Haftung der Linien auf anderen Linien	33
5.3 Ungeeignete oder falsche Parameter in Cura gewählt	33
5.3.1 Ungeeignete Supportstrukturen	33
5.3.2 Geschwindigkeit	34
5.3.3 Wanddicke	34
5.3.4 Temperatur	34
5.4 Weitere Fehler	35
5.4.1 Kalibrierung	35
5.4.2 Verschiedene Eigenschaften des Filaments je nach Farbe und Lagerung	36
5.4.3 Elektrische Spannung am Feeder	36
5.4.4 Anpressdruck im Feeder	37
5.4.5 Unsauber aufgerolltes Filament	37
6 Zusammenfassung und Ausblick	38
6.1 Technisches Objekt	38
6.2 Organisches Objekt	38
6.3 Upgrade des Druckers	39
6.4 TODO	39
6.5 Fazit zu Additiven Fertigungsverfahren	39
7 Literaturverzeichnis	41

Abkürzungsverzeichnis

3D dreidimensional

ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol

CAD Computer-Aided Design

DHBW Duale Hochschule Baden-Württemberg

PLA Polyactid

PTFE Polytetrafluorethylen

SD Secure Digital

SMD Surface Mounted Device

STL Stereolithography

USB Universal Serial Bus

UV Ultraviolett

zb zum BSP

1 Einleitung

Bei herkömmlichen Verfahren, um Objekte aus Grundstoffen wie beispielsweise Metallen, Kunststoffen oder Harzen anzufertigen, werden diese oft subtraktiv aus einem großen Block des Grundstoff herausgearbeitet. Dies kann beispielsweise durch Fräsen erfolgen.

Neben diesen Verfahren gibt es auch die sogenannten additiven Verfahren, bei denen ein Objekt nach und nach (meist schichtweise) aus dem Grundstoff hergestellt wird. Die Vorteile dieser Verfahren sind unter anderem, dass weniger Material verbraucht wird und auch komplexere Formen relativ einfach realisiert werden können.

Einige dieser Verfahren werden in der Industrie bereits verwendet, beispielsweise um medizinische Implantate herzustellen. Ein großes Anwendungsgebiet liegt im Bereich des Rapid Prototyping. Dabei geht es darum, möglichst schnell Prototypen herzustellen, beispielsweise um die Eignung eines Designs für das spätere Serienprodukt zu erforschen. Da hier nur geringe Stückzahlen benötigt werden und möglichst keine komplizierten Serienwerkzeuge hergestellt werden sollen, eignen sich additive Verfahren gut für diese Anwendung. In den letzten Jahren wird zunehmend auch der Endkundenmarkt erschlossen. Sogenannte 3D-Drucker, die in der Regel auf dem Extrusionsverfahren basieren, werden inzwischen zu erschwinglichen Preisen angeboten.

Im letzten Jahr hat die Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) einen solchen 3D-Drucker, den Ultimaker 2, angeschafft. In einer vorigen Studienarbeit wurde dieser in Betrieb genommen und erste Objekte gedruckt. Diese Studienarbeit befasst sich mit dem Designen von Objekten und dem anschließenden Drucken mit dem Ultimaker 2.

Das Ziel dieser Studienarbeit ist es, mithilfe verschiedener Programme ein technisches und ein organisches Objekt zu erstellen. Anschließend sollen diese mit dem Ultimaker 2 gedruckt werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen auf einer bereits existierenden Website über den 3D-Drucker dokumentiert werden. Dieser Bericht wird zunächst einen Überblick über verschiedene verbreitete additive Verfahren geben. Anschließend werden der Ultimaker 2, die dazugehörige Toolchain sowie die verwendeten CAD-Programme näher erläutert. Basierend auf diesen Grundlagen wird dann im Hauptteil des Berichts die Erstellung des technischen und organischen Objekts näher beschrieben.

2 Technische Grundlagen & Stand der Technik

Dieses Kapitel umfasst die technischen Grundlagen, die zum Verständnis des Berichts nötig sind sowie den aktuellen Stand der Technik. Inhaltlich werden die aktuellen Drucktechniken und druckbaren Materialien behandelt. Anschließend folgt ein Vergleich der Stabilität der Druckresultate verschiedener Verfahren. Im Abschnitt CAD werden Programme und gängige Dateiformate für den Entwurf eines zu druckenden Objekts vorgestellt. Anschließend folgt ein Abschnitt über den Ultimaker 2, den Drucker, der in dieser Arbeit verwendet wurde.

2.1 Drucktechniken

Dreidimensionale Objekte können mit verschiedenen Verfahren gedruckt werden. Viele werden bereits seit Langem eingesetzt. Die Technologie war folglich schon verfügbar. In den letzten Jahren erreichen die Drucker den Endkundenmarkt. Grund dafür sind eine Vielzahl von günstigen Druckern, die auf dem Markt erhältlich sind. Im Folgenden sind verschiedene Druckverfahren erläutert.

2.1.1 Schmelzschichtverfahren

Das verflüssigte Material wird durch eine Düse, den Extruder, auf eine Druckfläche gepresst. Dort härtet es aus. Durch Bewegen des Druckkopfes über die Druckfläche lässt sich Schicht für Schicht ein Objekt auftragen.

Das im Verhältnis zu anderen Drucktechniken langsame Verfahren eignet sich für die Erstellung von Modellen für das Testen von Passgenauigkeit. Die Auswahl an Materialien ist groß; auch Lebensmitteldrucker wie solche für Schokolade sind möglich. Im Gegensatz zu den meisten anderen Verfahren eignen sich Drucker dieses Verfahrens für den Bürogebrauch. Zudem sind mittlerweile preiswerte Drucker dieses Verfahrens erhältlich.

[8, S.17]

2.1.2 Stereolithographie

Das dreidimensionale Äquivalent zum Rasterdruck baut Objekte aus Schichten von Rasterpunkten auf.

Manche organischen Verbindungen können mittels Ultraviolett (UV)- Licht polymerisiert werden. Dadurch wird aus einem flüssigen Grundstoff ein fester Körper. Dieser Vorgang wird als Photopolymerisation bezeichnet und dient als Grundlage für verschiedene 3D- Druckverfahren.

Für jede Schicht kann eine Photomaske erzeugt werden. Der flüssige Grundstoff wird durch die Maske hindurch von einer UV- Quelle angestrahlt. Dadurch härtet eine Schicht des Grundmaterials entsprechend der Photomaske aus. Die erste Schicht wird auf eine Bodenplatte gedruckt. Diese wird nach Abschließen jeder Schicht weiter in die Flüssigkeit abgesenkt. Dadurch wird die nächste Schicht auf die darunterliegende gedruckt.

Alternativ zur Photomaske mit gleichmäßiger Quelle kann auch ein UV- Laser verwendet werden, der über Spiegel an die auszuhärtenden Rasterpunkte gelenkt wird.

Das erzeugte Objekt wird im Druckverfahren nicht vollständig ausgehärtet. Daher muss es im Anschluss mit UV- Licht nachbehandelt werden. [7, S.3]

2.1.3 Sintern

Sintern beschreibt den Prozess des Verdichtens pulverförmiger Ausgangsstoffe zu einem festen Material. Hierzu kann das Material über den Schmelzpunkt erhitzt werden oder durch hohe Drücke dazu verleitet werden, dass sich die Oberflächen der einzelnen Pulverkörner verbinden. Für den 3D- Druck relevant sind Verfahren, die ein selektives Verbinden der Körner ermöglichen. [2, Bd.20, S.7037]

Ein Verfahren, das dies ermöglicht, ist das Elektronenstrahlschmelzen. Hierbei wird schichtweise das Pulver des Ausgangsmaterials selektiv mit einem Elektronenstrahl geschmolzen. Nach Fertigstellung einer Schicht wird eine weitere Schicht Pulver aufgetragen, die erneut selektiv geschmolzen werden kann. Dadurch können 3D Objekte erzeugt werden. Momentan sind Objekte aus mehreren Titanlegierungen mit diesem Verfahren möglich. Zudem wird an der Eignung von Stahl, verschiedenen Metallen und deren Legierungen geforscht. [10]

Alternativ zum Elektronenstrahl kann auch ein Laser zum Verschweißen des Pulvers eingesetzt werden. Mit diesem Verfahren können auch Kunststoffe verarbeitet werden. [6]

2.1.4 Binder-Verfahren

Im Binderverfahren wird ein Bindemittel in ein pulverförmiges Ausgangsmaterial eingespritzt. Durch selektives Einbringen des Binders können die gewünschten Strukturen erzeugt werden. [7, S.11]

2.1.5 Schicht-Laminat-Verfahren

In jeder Schicht wird ein Metallblech mit einem Laser in Form geschnitten. Die fertigen Schichten werden verpresst, verklebt oder versintert. Dadurch entsteht ein geschichtetes Objekt, dessen Eigenschaften sich in Faserrichtung von denen gegen Faserrichtung unterscheiden. [8, S.33]

2.2 Materialien

Die verschiedenen Druckverfahren erfordern unterschiedliche Grundstoffe für das Drucken. Dieser Abschnitt stellt verschiedene Materialien vor.

2.2.1 Metalle und deren Legierungen

Pulver verschiedener Metalle und Legierungen lassen sich sintern. Bleche können im Schicht-Lamitat-Verfahren 2.1.5 zu einem festen Objekt geformt werden. Im Allgemeinen lassen sich aus Metall per 3D-Druck mechanisch und thermisch belastbare Prototypen erstellen.

2.2.2 Monomere

Im Stereolithographie-Verfahren 2.1.2 werden Monomere selektiv polymerisiert. Monomere sind Moleküle, die mit gleichartigen Molekülen zu größeren Molekülen verschmelzen können. Durch Polymerisation entsteht ein fester Körper aus langkettigen Molekülen. [1]

2.2.3 Thermoplaste

Bereits polymerisierte Kunststoffe unterscheiden sich in der Reaktion auf hohe Temperaturen. Eine dieser Gruppen von Polymeren sind die Thermoplaste. Diese Kunststoffe

verflüssigen sich bei Temperatureinwirkung und erstarren beim anschließenden Auskühlen in einer neuen Form. Wenn die Temperatur zu hoch ist, verschmoren Thermoplaste. Daraus muss beim Drucken eine Temperatur gefunden werden, die das Material in eine verwendbare Liquidität versetzt, allerdings das Material nicht beschädigt. Bekannte Thermoplaste sind Polyactid (PLA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Beim Drucken mit ABS entstehen giftige Dämpfe. Die Menge an ausgeschiedenem Gas ist bei korrekter Druckertemperatur-Einstellung unbedenklich, allerdings sollte der Druckraum trotzdem gut ventiliert werden.

Im Gegensatz zu den Thermoplasten verflüssigen sich Duroplaste nicht; sie verschmieren direkt, wenn die Temperatur zu hoch wird. Dadurch eignen sie sich nicht für das Extrusionsverfahren. [5, S.510ff.] S.510ff

2.3 Stabilitätsanalyse

In diesem Kapitel wird kurz betrachtet, wie stabil die Objekte sind, die mit den in Kapitel 2.1 vorgestellten Verfahren hergestellt werden. Dabei wird unter anderem auch Bezug darauf genommen, wie stabil die Objekte verglichen mit Objekten, die in einem anderen Verfahren hergestellt werden, sind.

2.3.1 Schmelzsichtverfahren

Im Extrusionsverfahren hergestellte Objekte sind mechanisch und thermisch belastbarer als Objekte, die mit Stereolithografie erstellt wurden. [7, S.10]

Es kann allerdings vorkommen, dass manche Bereiche eines Objekts weniger stabil sind als andere Bereiche. [9]

2.3.2 Stereolithographie

Objekte, die mit Stereolithografie hergestellt werden, sind mechanisch und thermisch weniger belastbar als Objekte, die beispielsweise mit Lasersintern oder im Extrusionsverfahren hergestellt wurden. [7, S.4]

Zudem ist unklar, ob diese Objekte stabil genug für einen Dauereinsatz sind. [9]

2.3.3 Lasersintering

Mit diesem Verfahren können sowohl Metalle als auch Kunststoffe verarbeitet werden. Die dabei produzierten Teile können ähnliche Eigenschaften wie mit herkömmlichen Methoden produzierte Teile aufweisen.

Allerdings sind gesinterte Teile porös, was jedoch bei manchen Anwendungsfällen erwünscht sein kann. Die Porosität kann abgeschwächt werden, indem das Pulver mit anderen Materialien versetzt wird. [9]

2.3.4 Binder-Verfahren

Bei diesem Verfahren ist es schwer, eine Aussage über die Eigenschaften des entstehenden Materials zu treffen, da es sich aus Pulver, Bindemittel und dem zur Nachbehandlung genutzten Harz zusammensetzt.

Sofern als Pulver kein Metall, sondern Gips oder Stärke verwendet werden, hält das Objekt keinen starken Belastungen stand. [7, S.12]

2.3.5 Schicht-Laminat-Verfahren

Da bei diesem Verfahren die Objekte aus verschiedenen Schichten aufgebaut sind, die miteinander verpresst oder verklebt wurden, weisen diese Objekte richtungsabhängig verschiedene Eigenschaften auf. [7, S.8]

Zudem wird bei diesem Verfahren oft Papier als Material verwendet. Naturgemäß ist Papier nicht lange haltbar. [9, S.35]

2.4 Computer-Aided Design (CAD)

Der 3D-Druck basiert zum großen Teil auf dem computergestützten Design von Objekten. CAD-Tools helfen beim Entwerfen. Anschließend werden die Objektdateien mithilfe von Slicern in maschinenlesbaren Code umgewandelt. Die Unterkapitel stellen die verwendeten Programme vor.

2.4.1 CAD-Programme

Für das Design von 3D-Dateien gibt es vielerlei Programme. Auf kostenloser Basis wurden in dieser Arbeit Solid Edge und blender verwendet.

Solid Edge

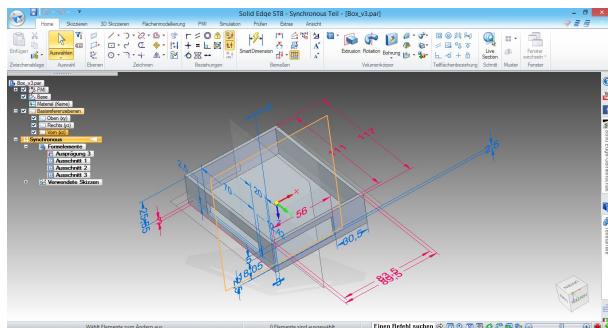


Abbildung 2.1: Screenshot des Programms
blender
der entwickelten Objekte.

Solid Edge von Siemens eignet sich für das Entwerfen von technischen Objekten. Hierbei bietet das Programm eine Vielzahl von Funktionen für die Erstellung von 2D- und 3D-Formen. Für einfache Objekte kann eine 2D-Grundform gezeichnet und anschließend zu einem 3D-Objekt extrahiert werden. Zusätzliche Funktionen von Solid Edge unterstützen bei der Stabilitätsanalyse

Die Entwicklung der Objekte kann entweder auf sequenzieller Basis oder auf paralleler Basis geschehen. Die sequenzielle Entwicklung erfordert ein hohes Maß an Programmkenntnis, da die einzelnen Schritte der Objekterstellung nur in einem definierten Ablauf stattfinden kann. Der parallele Entwicklungsstack erleichtert die nachträgliche Veränderung von Arbeitsschritten wie zum Beispiel die Maße, die während einer Extraktion angegeben wurden. Zusätzlich können bei paralleler Entwicklung die Renderzeiten bei Maßänderungen deutlich reduziert werden. Das zahlt sich bei umfangreichen Objekten aus.

Für die Arbeit wurde die akademische Lizenz verwendet. Objekte, die mit dieser Lizenz erstellt wurden, können nicht mit einer anderen Lizenz geöffnet werden.

Blender

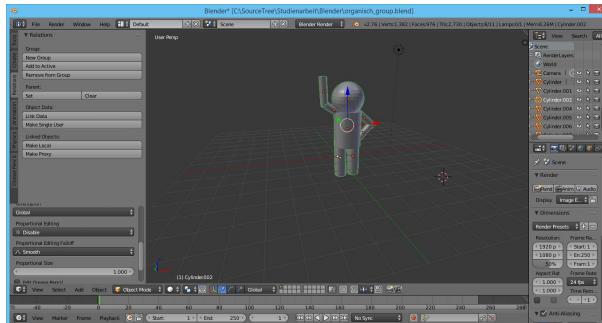


Abbildung 2.2: Screenshot des Programms blender

Objekten, die dann anschließend zu einem Objekt vereinigt werden.

2.4.2 Slicing

Das Slicing ist der Prozess zur Umwandlung eines 3D-Objekts in für den Drucker eindeutige Befehle. Da jeder Drucker unterschiedliche Randbedingungen bietet, empfieilt der jeweilige Hersteller ein für den Drucker geeignetes Programm zum Slicen.

Der 3D-Drucker Ultimaker 2 erhält seine Dateien vom Ultimaker eigenen Programm Cura. Alternativ kann das Programm Repetierhost verwendet werden.

Cura

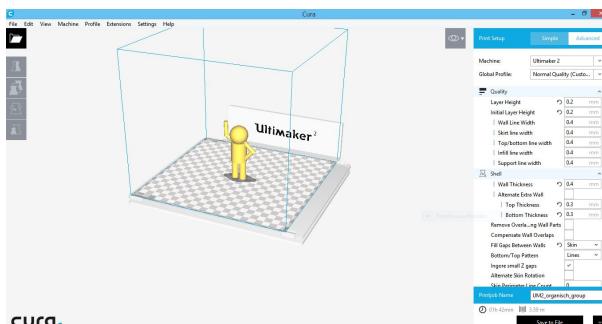


Abbildung 2.3: Screenshot des Programms blender

Einstellmöglichkeit der Drucktemperatur. Der Befehl ist im G-code vorgesehen, allerdings nicht beeinflussbar.

Blender ist ein Open Source Programm, das eine Vielzahl von Computergrafik-Anwendungen bietet. Diese reichen von der Erstellung von Objekten bis hin zum Filmschnitt.

Die CAD-Funktionen zielen vor allem auf die Animation einzelner Objekte ab. Zum Beispiel kann die Beweglichkeit der Finger mit Regeln definiert werden. Das Objekt-Design unterliegt der Manipulation von Basis-

Mit Cura kann man aus Objektdateien im STL-Format G-code für den Ultimaker erstellen. Das Programm erlaubt die Variation zahlreicher Parameter, die den Druck beeinflussen. Die verwendete Programmversion beeinflusst die Ergebnisse des Slicens deutlich. Viele Druckoptionen sind erst mit neueren Versionen möglich. Eine wichtige fehlende Funktion von Cura ist eine

Repetierhost

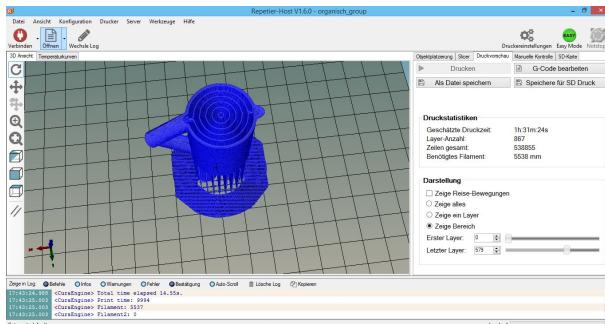


Abbildung 2.4: Screenshot des Programms Repetierhost

Repetierhost ist ein alternatives Programm zur Fernsteuerung von 3D-Druckern. Es visualisiert Druckdateien im STL- und im G-code-Format. Zudem enthält es einen Slicer, mit dem man selbigen erzeugen kann.

Cura liefert mitunter fehlerhaften G-code, in dem Löcher klaffen oder Schichten fehlen. Mithilfe des Repetierhosts können diese Fehler entdeckt werden.

2.4.3 Dateiformate

Für die Darstellung von 3D-Objekten können verschiedene Datentypen verwendet werden. Essenziell für den 3D-Druck mit dem Ultimaker sind die Dateitypen STL und der G-code.

Stereolithography (STL)

Eine STL-Datei ist eine Oberflächendefinition für ein 3D-Objekt. Hierfür werden die dreieckigen orientierten Facetten über ihre Eckpunkte in einem kartesischen Koordinatensystem abgespeichert. Die Dimensionierung(z.B. Zentimeter oder Inch) wird nicht mit abgespeichert und muss vom lesenden Programm eingestellt werden.

Da das STL-Format eine einfache Objektbeschreibung ist, kann es als universelle Schnittstelle zwischen CAD-Designprogrammen und Slicern verwendet werden. Allerdings gehen Zusatzinformationen wie unterschiedlich eingestellte Drucktemperaturen oder Druckfarben verloren. Daher eignet sich das Format nur zur Übergabe von einfachen Formeigenschaften.

Beim Erzeugen der STL-Datei ist auf die korrekten Maße zu achten. Bei zu geringer Auflösung der Facetten können Rundungen oder Bohrungen zu stark diskretisiert werden und als Vielecke mit wenigen Kanten übersetzt werden. Insbesondere ist hierbei auf die Einstellung der Maß-Einheit zu achten. Im STL-Format werden keine Dimensionen abgelegt; diese werden von dem öffnenden Programm gewählt.

G-Code

Aus der Welt der Fräsen kommend ist der G-Code eine Sprache, mit der Maschinen Positionierungs- und Arbeitsanweisungen erhalten können.

Derivate dieser Sprache wurden um die Funktionen zur Steuerung eines 3D-Druckers erweitert. Mithilfe der neuen Befehle können zum Beispiel die Drucktemperatur oder die Lüfter angesteuert werden.

2.5 Der 3D-Drucker Ultimaker 2

Der Ultimaker 2 ist ein 3D-Drucker von der gleichnamigen Firma. Das Bauvolumen umfasst 223x223x205mm. Anfang 2016 wurde der Drucker zum Ultimaker 2+ verbessert. Die hierfür nötigen Upgrades umfassen Verbesserungen des Feeders und ein neuer Druckkopf. Der neu hinzugekommene Olson-Block ermöglicht das Wechseln der Düsen ohne die vollständige Demontage des Druckkopfes.

Die zu druckenden Dateien werden auf einer Secure Digital (SD)-Karte vom Rechner auf den Drucker im G-Code-Format übertragen. Dort wählt man die entsprechende Datei in einem Menü aus und der Druck wird gestartet.

Die X- und Y-Position werden durch Verschieben des Druckkopfes verändert. Die Z-Achse des Druckers wird durch Manipulation der Druckplatte erreicht. Darin unterscheidet sich der Ultimaker 2 vom Ultimaker Original. Das ältere Modell erreichte den Höhenversatz durch Bewegung des

Gedruckt wird auf einer Glasplatte, welche auf einem Heizbett fixiert ist. Für die Höhenkalibrierung des Druckbetts ist seine Neigung mit Schrauben an den vorderen Ecken und an der Gewindestange verstellbar.



Abbildung 2.5: Ultimaker 2+ [3]

Der Feeder befindet sich an der Rückseite des Druckers. Über einen Bowdenzug wird das Druckmaterial zum Druckkopf geleitet. Der Bowdenzug wird über eine Polytetrafluorethylen (PTFE)-Kopplung in die beheizte Düse geleitet.

Mit dem Upgrade zum Ultimaker 2+ wurde der Feeder, dessen Motor zuvor direkt das Material schob, um ein Getriebe erweitert. Außerdem wurde der bisher mit der Düse fest verbundene Heizblock durch einen Olsonblock ersetzt, bei dem die Düse austauschbar ist. Dadurch muss zum Ändern der Düsengröße nicht der komplette Druckkopf auseinandergebaut werden.

Unter Quelle [4] findet sich die Website des Druckerherstellers und zusätzliche Informationen über den Drucker.

3 Entwicklung eines technischen Objekts

Dieses Kapitel handelt vom Entwurf und Druck eines technischen Objekts. Ein technisches Objekt wird dabei als ein Objekt definiert, das entwickelt wurde, um einen bestimmten technischen Zweck zu erfüllen und in erster Linie funktional sein soll. Eine ansprechende oder dekorative Optik des Objekts ist deshalb unwichtig oder zumindest zweitrangig. Wichtig ist es hingegen, dass ein solches Objekt möglichst einfach zu produzieren ist. Solche Objekte besitzen beispielsweise meist glatte Oberflächen, da diese wesentlich einfacher und genauer zu produzieren sind als gewölbte Oberflächen. Zudem muss das Objekt fest definierte Maße haben.

Bei der Produktion eines technischen Objekts ist es wichtig, dass diese Maße mit möglichst geringen Toleranzen eingehalten werden. Wird mehrfach dasselbe Objekt mit denselben Werkzeugen und Prozessen hergestellt, sollten die Ergebnisse vergleichbar sein.

Für die Studienarbeit wird als technisches Objekt exemplarisch ein Aufbewahrungssystem für einen Raspberry Pi gekoppelt mit einem Universal Serial Bus (USB)- Hub und einer externen Festplatte entworfen. Dieses System soll möglichst kompakt und als ein Block transportierbar sein.

Diese Arbeit bezieht sich häufig auf den Ultimaker 2, der im vorhergehenden Kapitel 2.5 vorgestellt wird. In der Arbeit mit einem anderen Drucker können sich Vorgehensweise und Ergebnis deutlich unterscheiden.

Zuerst wird die Analyse der bestehenden Verwahrung beschrieben. Anschließend folgt eine Beschreibung des umzusetzenden Konzepts für das neue Aufbewahrungssystem, das während der Studienarbeit gedruckt werden soll. Folgend wird ein Entwurf des Systems mit einem CAD-Programm und der Druck des Objekts beschrieben. Der darauffolgende Abschnitt beschäftigt sich mit während dem Druck aufgetretenen Fehlern. Zuletzt folgt ein Fazit über die Eignung des Ultimaker 2 zum Drucken von technischen Objekten.

3.1 Ist-Analyse

Zu entwerfen ist eine Verwahrung für einen Heimserver auf einem Raspberry Pi(folgend als Pi bezeichnet) mit angeschlossener externer Festplatte. Der Pi selbst liefert an seinen USB-Ports nicht genug Leistung zum Betreiben der Festplatte, weshalb ein zusätzlicher powered USB-Hub nötig ist.



Zu Beginn der Entwicklung wurde das System durch zu einem Käfig verschraubten Lochblechen zusammengehalten, die Festplatte und Hub umfassten. Abbildung 3.1 Insbesondere der Pi war im alten System nur unzureichend fixiert, da er nur auf den Käfig aufgesetzt war. Eine Hauptanforderung an das neue System soll das sichere Lagern aller Komponenten sein.

Abbildung 3.1: Ursprüngliches Stapelsystem

Die zweite Anforderung ist die Portabilität des Systems. Um den Server sicher und einfach bewegen zu können, soll das System als Ganzes stabil zu einer Einheit verbindbar sein. Das bisherige System sollte die Portabilität ermöglichen, war jedoch aufgrund der oben genannten Instabilität nicht dazu in der Lage.

Die Ausmaße der zu verstauenden Objekte sind folgend aufgeführt.



(a) Bemaßung des Raspberry Pis (b) Bemaßung des USB- Hubs (c) Bemaßung der externen Festplatte

Abbildung 3.2: Bemaßung der einzufassenden Objekte

Zusätzlich zu diesen Maßen kommen beim Pi noch die Positionen der Schraub-Bohrungen

und die Höhe der unter dem Pi herausragenden Lötpunkte und Surface Mounted Device (SMD)-Bauteile hinzu. Die frei zugänglichen Leiterbahnen müssen in der Verwahrung genug Abstand zu anderen Bauteilen haben, da sie sonst beschädigt werden könnten.

Eine Eigenschaft des bisherigen Systems mit den Lochblechen soll für das neue Verwahrungs-System soll übernommen werden. Die Platzierung der Komponenten übereinander ist sehr platzsparend. Zudem kann das System dadurch gut transportiert werden.

3.2 Konzept: Modulare Boxen

Als Ersatz für den oben beschriebenen Rahmen soll ein modulares Stapsystem dienen. Auf einer massiven Grundplatte werden Boxen gestapelt. Jede Box beinhaltet eine Komponente (Box, Hub oder Festplatte). Die Außenmaße der Grundflächen der Boxen sind in Breite und Länge immer gleich. Die Grundfläche wird durch die größte zu befestigende Komponente, hier also die Festplatte, bestimmt. Der Innenraum einer Box ist an die jeweilige Komponente angepasst. Abhängig von der Komponente sind verschiedene Aussparungen in den Seitenwänden der Boxen, durch die Kabel geführt werden können. Im Aufbewahrungssystem werden die Boxen auf der Grundplatte gestapelt.

Zwischen die Boxen werden Rahmen gelegt, die die Box zwischen Gewindestangen fixieren. Diese sind in der Grundplatte festgeschraubt. Dadurch ist das Stapsystem im Ganzen stabilisiert und kann problemlos transportiert werden.

Das System ist zudem einfach um neue Komponenten erweiterbar, sofern diese von der Grundfläche her nicht größer sind als die Grundfläche der Boxen. Für neue Komponenten kann eine eigene Box mit den passenden Außenmaßen und angepasstem Innenraum und Höhe entwickelt werden. Diese Box kann dann wie beschrieben mit Rahmen am System befestigt werden.

3.3 Entwurf

Das Konzept soll für die vorhandenen Komponenten umgesetzt werden. Die zu druckenden Objekte werden mit dem CAD-System Solid Edge entworfen.

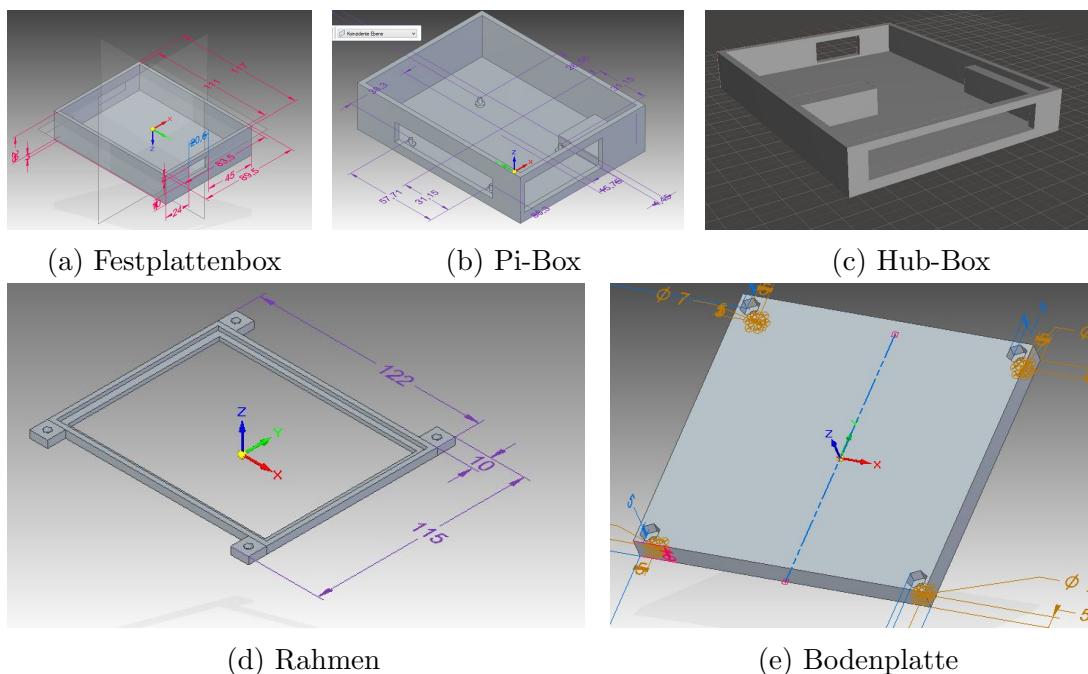


Abbildung 3.3: Entwurf der Objekte

Als erster Schritt wurden die Maße von Festplatte, USB-Hub und Raspberry Pi genommen.

Die Maße definieren die Innengestaltung der jeweiligen Box. Die Grundfläche ist durch die größte Box definiert, während die Höhe der einzelnen Boxen pro Komponente festlegbar ist. Folgend werden die Designs der einzelnen Komponenten vorgestellt.

Die Festplatten-Box als einfachste und größte Komponente des Systems definiert die Außenmaße und Form der quaderförmigen Boxen. An der Position der Schnittstelle ist ein Ausschnitt in Größe der Steckverbindung aus der Wand geschnitten. Da die Box einem großen Gewicht standhalten muss, wurde eine Wandstärke von 3mm gewählt. Abbildung 3.3a zeigt den Entwurf der Box.

Da der USB-Hub kleiner ist als die Festplatte, muss er auf der Grundfläche der Box in Breite und Tiefe fixiert werden. Hierfür werden seitlich und hinter den Hub Blöcke gesetzt, die den Hub an der gewünschten Position fixieren. Die Wand der Box ist wie bei der Festplattenbox auf Höhe der Schnittstellen eingeschnitten. Zusätzlich hat die Box einen Ausschnitt auf der Rückseite der Box, durch die Stromzufuhr und Anschlusskabel für den Raspberry Pi hinausgeführt werden können. Die Box ist in Abbildung 3.3c dargestellt.

Eine Box für den Raspberry Pi fordert einen größeren Design-Aufwand als die vorhergehenden. Auf der Unterseite benötigt der Pi Abstand zum Boden aufgrund seiner

Lötpunkte und SMD-Bauteile. Daher wird er auf Säulen gesetzt, die den Pi in seinen Schraub-Bohrungen fixieren. Die zusätzliche Höhe, die hierbei entsteht, muss bei den Ausschnitten der Schnittstellen miteinbezogen werden. Damit alle Schnittstellen erreichbar sind, ist der Pi in die Ecke der Box platziert. In Abbildung 3.3b ist die Pi-Box dargestellt.

Um die Boxen gegen Verrutschen zu sichern, sind zwischen ihnen Rahmen platziert, die Einschnitte in Größe der Box-Grundfläche haben. Zusätzlich sind an jedem Rahmen vier runde Durchführungen angebracht, mit denen sie auf einer Gewindestange eingefädelt werden können. Das vollständige System kann dann durch vier M4-Muttern fixiert werden. Die Rahmen sind in der Fläche nicht gefüllt; die Stabilität ist schon durch die eingeschossenen Boxen gegeben. Abbildung 3.3d zeigt den Entwurf des Rahmens.

Die Bodenplatte bietet ein Grundgerüst des Systems. Da die Gewindestangen außerhalb der Boxen durch die Durchführungen der Rahmen verlaufen, ist sie um die Größe der Durchführungen breiter und länger als die Boxen. An selber Position wie diese Durchgänge hat auch die Bodenplatte Durchführungen. Zusätzlich sind auf der Unterseite Einschnitte für M4-Muttern. Dadurch können die Gewindestangen durch die Bodenplatte geführt und an der Unterseite der Bodenplatte festgeschraubt werden. Der Entwurf der Bodenplatte ist in Abbildung 3.3e dargestellt.

3.4 Druck des Objekts

Dadurch, dass das Aufbewahrungssystem aus vielen einzelnen Komponenten zusammengesetzt ist, sind auch viele Drucke notwendig. Dazu kommt, dass einige der Komponenten - beispielsweise die Deckel für die Boxen und die Rahmen - in mehrfacher Ausführung benötigt werden.

Zusätzlich zu der hohen Anzahl an Komponenten, die gedruckt werden müssen, kommt, dass einige Fehldrucke auftraten. Außerdem ergab sich beim Drucken der Komponenten, dass manche Maße aufgrund der Ungenauigkeit des Druckers zu gering gewählt waren und die Komponenten neu bemaßt und gedruckt werden mussten. Dadurch war insgesamt ein hoher Zeitaufwand mit dem Druck verbunden.

An den ersten zwei Schichten ließ sich ein fehlerhafter Druck meist frühzeitig erkennen. Einige der aufgetretenen Fehler sind im Kapitel 5 aufgeführt.

3.5 Fazit: Eignung für technische Objekte

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde für diese Studienarbeit der Ultimaker 2 verwendet. Deshalb wird in diesem Fazit auch nur betrachtet, inwiefern sich speziell dieser Drucker eignet, um technische Objekte zu erstellen.

3.5.1 Material

Als Filament für den Druck wurde PLA verwendet. Bei den Drucken fiel auf, dass die Materialeigenschaften, abhängig von der verwendeten Farbe, teilweise deutlich unterschiedlich waren. Am besten gelangen die Drucke mit rotem Filament. Schwarzes Filament dagegen war sehr spröde. Bei durchsichtigem Filament hielten die verschiedenen Linien nicht so stark zusammen wie beispielsweise bei rotem, was insbesondere bei konzentrischen Mustern zu einer Instabilität führte. Dieses Problem wird näher in Kapitel 5.4.2 genauer beschrieben.

Für das Aufbewahrungssystem wurde deshalb vor allem rotes Filament genutzt. Allgemein sollte man beim Ultimaker 2 also vor dem Druck eines größeren Objekts testen, welche Farbe die besten Eigenschaften aufweist.

3.5.2 Unzureichende Druckgenauigkeit

Beim Druck des technischen Objekts war auffallend, dass die in Solid Edge definierten und in Cura noch korrekt dargestellten Maße der Objekte vom Drucker nicht maßgetreu gefertigt wurden. Dies war besonders auffallend bei einem 1cm x 1cm x 1mm - Quader, den wir zum Testen der aktuellen Höhen-Kalibrierung verwendeten. Die Seitenmaße des Quaders maßen anstatt einem Zentimeter nur ca. 8 Millimeter. Bei einer Linienbreite von 0.4mm sind das etwa 4 Linien, die vom Slicer nicht zum Drucken vorgesehen wurden.

Dieses Problem wiederholte sich bei schmalen Strukturen: alle Wände, die nicht über 0.8mm maßen - also eine beidseitige Wand - wurden von Cura ohne Benachrichtigung auf Probleme beseitigt. Mittels Repetierhost kann das Fehlen der Wände aufgezeigt werden. In mancher Situation erzeugte Cura auch Wände, die nicht sein sollten und füllte trotz deaktivierter Funktion klar definierte Hohlräume massiv aus.

Die relativ hohe Ungenauigkeit der Drucke führte teilweise zu Problemen mit den Spaltmaßen. Da oft erhebliche Unterschiede zwischen definierten Maßen und den Maßen des

gedruckten Objekts bestanden, konnten Objekte nicht passend zusammengesetzt werden.

Beispielsweise mussten die Deckeln für die Boxen sowie die Serverhülle des Raspberry Pi mit angepassten Maßen erneut gedruckt werden. Manche Objekte mussten zwar nicht erneut gedruckt, aber nachbearbeitet werden, um miteinander kombinierbar zu sein.

Zu dem Zeitpunkt, zu dem das technische Objekt gedruckt wurde, stand nur eine Nozzle der Größe 0.4mm zur Verfügung. Dadurch war die minimale Breite einer Linie festgelegt. Da für das Aufbewahrungssystems keine Strukturen, die feiner als 0.4mm sind, gedruckt werden mussten, stellte dies in unserem Fall kein Problem dar.

Für das Aufbewahrungssystem war die Genauigkeit des Ultimaker 2 ausreichend, auch wenn einige Objekte erneut mit höheren Toleranzen gedruckt werden mussten. Da technische Objekte im Allgemeinen jedoch mit minimalen Abweichungen angefertigt werden sollten, ist diese Abweichung an sich zu hoch. Sie zeigt, dass der Ultimaker 2 nicht die notwendige Präzision liefern kann, die für technische Objekte in der Regel erforderlich ist.

4 Entwicklung eines organischen Objekts

Das Ziel dieser Studienarbeit ist es, zwei unterschiedliche Objekte zu designen und zu drucken. Im vorherigen Kapitel 3 wird die Entwicklung eines technischen Objekts beschrieben. Bei einem technischen Objekt sind die Ansprüche an genaue Bemaßungen hoch, das Objekt selbst sollte so einfach wie möglich gestaltet sein. Dadurch besteht es oft aus einfachen geometrischen Formen. Allgemein liegt der Fokus auf der Funktionalität des Objekts. Um technische Objekte zu designen, wird in der Regel eine CAD-Software verwendet. In diesem Kapitel wird eine andere Art eines Objekts beschrieben: Das organische Objekt. Im Gegensatz zu einem technischen Objekt steht hier nicht die reine Funktionalität im Vordergrund. Organische Objekte sind Objekte, die in der Natur vorkommen und nicht künstlich vom Menschen gefertigt wurden, beispielsweise Lebewesen oder Pflanzen. In der Regel besitzen diese Objekte kaum Ecken, Kanten oder gerade Flächen.

Im Folgenden werden das Design und der Druck eines solchen Objekts beschrieben, im Anschluss folgt ein Fazit über die generelle Eignung des Ultimaker 2 für den Druck organischer Objekte. Wie bereits im vorigen Kapitel bezieht sich diese Arbeit häufig auf den Ultimaker 2, der im Kapitel 2.5 vorgestellt wird. In der Arbeit mit einem anderen Drucker können sich Vorgehensweise und Ergebnis deutlich unterscheiden.

4.1 Konzept

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, soll das organische Objekt runde, gewölbte Flächen aufweisen. Für diese Studienarbeit wurde ein dreidimensionales Strichmännchen als Objekt gewählt. Dieses kann unter Verwendung mehrerer Zylinder und Kugeln modelliert werden und enthält somit einige gewölbte Flächen. Der Kopf des Strichmännchens wird als Kugel modelliert, der restliche Körper besteht aus sieben Zylindern. Einer davon dient als Körper und je ein Zylinder wird verwendet, um ein Bein zu modellieren. Die Arme werden mit je zwei Zylindern modelliert. Dadurch kann ein Ellbogengelenk simuliert werden und abwechslungsreiche Armhaltungen werden möglich.

4.2 Entwurf

Das im vorigen Abschnitt beschriebene dreidimensionale Strichmännchen wurde mithilfe der Software Blender (Kapitel 2.4.1) modelliert. Es wird modelliert, indem verschiedene geometrische Grundkörper zusammengesetzt werden.

Wie im vorigen Abschnitt 4.1 beschrieben, ist das Männchen aus sieben Zylindern und einer Kugel zusammengesetzt.

Sowohl Zylinder als auch Kugeln sind in Blender bereits als Körper vorhanden. Die Bemaßung der Objekte kann jeweils angepasst werden. Diese Körper werden in den Viewport gezogen und verschoben, bis sie sich an der gewünschten Position befinden. Beim Verschieben ist es möglich, den Körper nur entlang einer Gerade (eindimensional) oder in einer Ebene (zweidimensional) zu verschieben.

Wenn sich alle Körper an der gewünschten Position befinden, markiert man sie und fügt sie zu einer Gruppe - dem Strichmännchen - zusammen. Diese Gruppe kann dann als STL-Datei gespeichert werden.

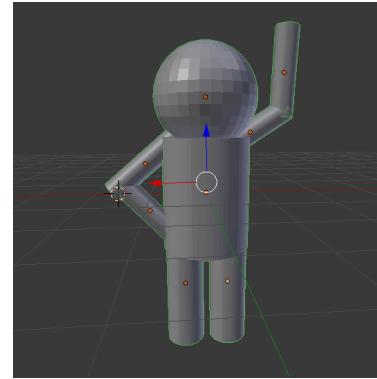


Abbildung 4.1: Design des organischen Objekts

4.3 Druck des Objekts

Im Gegensatz zum technischen Objekt (Kapitel 3), bei dem die Genauigkeit des Drucks sehr wichtig ist, liegt beim organischen Objekt der Fokus darauf, wie gut der Ultimaker 2 gewölbte Flächen drucken kann.

Zu Testzwecken wird das Objekt in zwei verschiedenen Positionen gedruckt. Einmal wird das Männchen liegend auf der Druckplatte positioniert, einmal stehend. Dadurch kann gesehen werden, ob es einen Unterschied macht, wie das Objekt platziert wird.

Das liegende Männchen hat insgesamt mehr Auflagefläche als das stehende Männchen, wodurch es allerdings auch durch mehr Supportstrukturen gestützt werden muss. Dafür muss nicht weit nach oben gedruckt werden und es müssen keine Überhänge gedruckt werden.

Das stehende Männchen hat insgesamt weniger Kontakt mit der Druckplatte, benötigt aber dennoch kaum Supportstrukturen, da es mit den unten glatten Füßen auf der Platte steht. Dafür müssen hier für die Arme und den Kopf teilweise relativ starke Überhänge gedruckt werden.

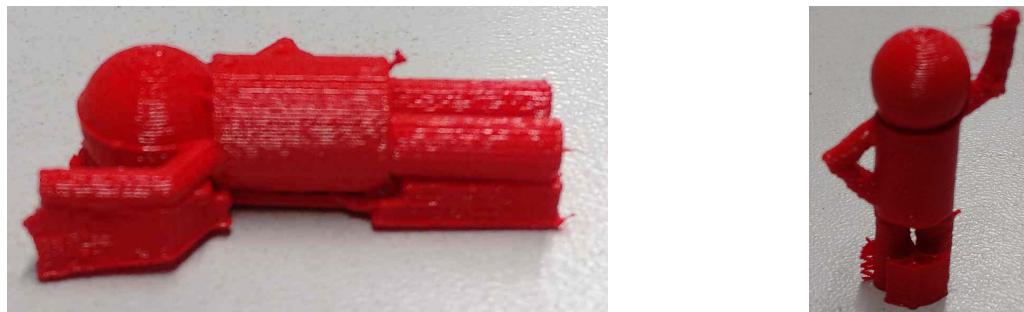


Abbildung 4.2: Drucke des organischen Objektes

Abbildung 4.2 zeigt die beiden gedruckten Männchen.

Die Überhänge des stehenden Männchens sind gut gelungen, sogar ohne durch extra Supportstrukturen abgestützt zu werden. Die vergleichsweise geringe Auflagefläche stellt kein Problem dar, da die Füße einen guten Halt bieten. Auch die Kugel, die den Kopf des Männchens darstellt, ist gut und rund geworden.

Beim liegenden Männchen dagegen sind viele Supportstrukturen nötig, damit es genügend Auflagefläche auf der Druckplatte besitzt. Diese Strukturen lassen sich nur schwer und nicht rückstandslos vom Objekt lösen. Auffällig ist zudem, dass die Kugel, die den Kopf

darstellt, eine starke Kante in der Mitte aufweist.

Allgemein ist das stehende Männchen deutlich besser gelungen als das liegende.

4.4 Fazit: Eignung für organische Objekte

In diesem Kapitel werden das Design und der Druck eines organischen Objekts, also eines Objekts, die viele runde Flächen besitzt, beschrieben. Anhand des Drucks des Testobjekts mit dem Ultimaker 2 lässt sich sagen, dass der Ultimaker 2 prinzipiell geeignet ist, um organische Objekte zu drucken.

Die runden Flächen des dreidimensionalen Strichmännchens, insbesondere die Kugel, die den Kopf darstellt, gelangen gut. Solange sie nicht zu starke Überhänge aufweisen, kann der Ultimaker runde Flächen überzeugend drucken.

Allerdings sollte das zu druckende Objekt genügend gerade Flächen besitzen, mit denen es auf der Druckplatte platziert werden kann. Ein Objekt mit einer abgerundeten Fläche auf der Druckplatte zu platzieren und mit Supportstrukturen abzustützen ist nicht empfehlenswert. Wie sich bei dem liegend gedruckten Männchen gezeigt hat, lassen sich diese Supportstrukturen kaum vom Objekt trennen.

5 Fehler beim Drucken mit dem Ultimaker 2

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Fehler, die beim Drucken mit dem Ultimaker 2 auftreten können. Zudem werden die Fehlerursachen und mögliche Gegenmaßnahmen erläutert. Da es viele mögliche Fehlerquellen gibt, gestaltet sich die Fehlersuche oft schwer. Teilweise beeinflussen sich die Fehler auch gegenseitig oder es gibt mehrere Fehlerquellen, die dasselbe Fehlverhalten verursachen können.

5.1 Hardware-Defekte

Der folgende Abschnitt behandelt Fehler, deren Ursache in Fehlern an der Hardware des Druckers zu finden ist. Die hier beschriebenen Fehler sind schwerwiegend. Oftmals muss zur Behebung der Fehlfunktion ein Bauteil ersetzt werden.

5.1.1 Verschleiß der PTFE-Kopplung

In 2.5 wird der Aufbau des Extruders genauer beschrieben. Die Düse ist zwar aus Metall gefertigt, aber das Filament gelangt durch eine PTFE-Kopplung in die Düse. Dadurch, dass die Kopplung in der Nähe des Heizblocks sitzt, wird sie beim Drucken ebenfalls erhitzt. Das führt dazu, dass die Kopplung sich relativ schnell verformt und zudem an den Stellen, wo sie die Düse oder das Filament berührt, verbrennt.



Abbildung 5.1: Ausgebauter PTFE-Kopplung

5.1.2 Fehlfunktion des Temperatursensors

Im Heizblock ist ein Temperatursensor verbaut, sodass der Heizblock auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt werden kann. Dieser Temperatursensor kann kaputt gehen.

Diese Fehlfunktion wird durch eine Fehlermeldung im Display des Ultimaker 2 angezeigt.

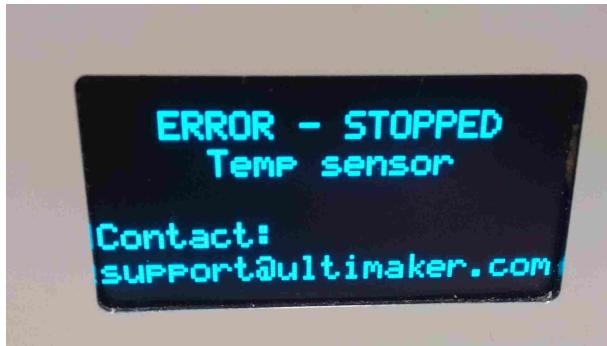


Abbildung 5.2: Fehlermeldung des Temperatursensors

Die Verformung führt dazu, dass das Filament nicht mehr ungehindert durch die Kopplung in die Düse gelangen kann. Wegen dem erhöhten Widerstand wird teilweise zu wenig Filament gefördert und der Druck misslingt.

Deshalb sollte die PTFE-Kopplung regelmäßig ausgetauscht werden.

Tritt die Fehlermeldung einmalig auf, kann es sein, dass sie versehentlich gesendet wurde. In diesem Fall hilft es, den Drucker aus- und wieder einzuschalten und den Druck neu zu starten. Wenn die Meldung oft hintereinander auftritt, muss jedoch der Temperatursensor ausgetauscht werden.

Den Temperatursensor auszutauschen ist relativ aufwändig. Einerseits muss der gesamte Druckkopf auseinander gebaut werden, um an den Heizblock zu gelangen. Die Kapsel mit dem Temperatursensor muss vorsichtig aus dem Heizblock gezogen werden. Zudem muss die Abdeckung der Platine an der Unterseite des Ultimaker entfernt werden, um das Kabel des alten Temperatursensors entfernen zu können und das Kabel des neuen

Sensors anzuschließen.

5.1.3 Reibung in Bowdenzug

Der Bowdenzug, über den das Filament vom Feeder zum Druckkopf befördert wird, besitzt eine gewisse Reibung. Wenn diese Reibung zu stark ist, kann es passieren, dass das Filament vom Feeder nicht gut gefördert werden kann, da dieser zu viel Kraft aufbringen muss. Dadurch gelangt zu wenig Filament zum Druckkopf.

Die Höhe des Widerstands hängt dabei unter anderem davon ab, an welcher Position das Objekt gedruckt wird. Je nachdem, wo sich der Druckkopf befindet, wird der Bowdenzug unterschiedlich stark gekrümmmt. Dadurch herrscht an manchen Positionen eine größere Reibung im Bowdenzug, die das Filament überwinden muss.

5.1.4 Gebogene Heizplatte

Die Glasplatte, auf der die Objekt gedruckt werden, liegt auf einer metallenen Platte auf, über die sie erhitzt wird. Die Glasplatte ist jedoch nicht perfekt gerade gefertigt, sondern ist stellenweise relativ stark durchgebogen. Dadurch liegt sie nicht gleichmäßig auf der Metallplatte auf.

Auffällig ist, dass eine Seite der Glasplatte besser aufliegt als die andere. Wird die Glasplatte mit der schlechter aufliegenden Seite auf die Metallplatte gelegt, wird sie durch den mangelnden Kontakt zur Metallplatte stellenweise deutlich schlechter erhitzt. Dadurch haftet das Objekt an diesen Stellen nicht an der Glasplatte.

5.1.5 Bollen an Heizblock

Wenn die Düse außen verschmutzt ist (5.2.5) kann es in extremen Fällen passieren, dass sich eine dicke Schicht aus Filament um den Heizblock bildet. Dies passiert, wenn das Filament nicht auf der Druckplatte, sondern an Verschmutzungen außen an der Düse haften bleibt. Dadurch wickelt sich das Filament immer weiter in die Düse und kann sogar in den Raum oberhalb der Düse gelangen.

Dadurch, dass eine dicke Schicht aus Kunststoff den Heizblock umgibt, wird bei folgenden Drucken Energie verschwendet, um diese Schicht zu erwärmen. Dadurch kann das Filament an sich nicht mehr genug erhitzt werden, um gut damit drucken zu können.

Es ist nahezu unmöglich, die komplette Schicht wieder zu entfernen. Trotz allem bleiben

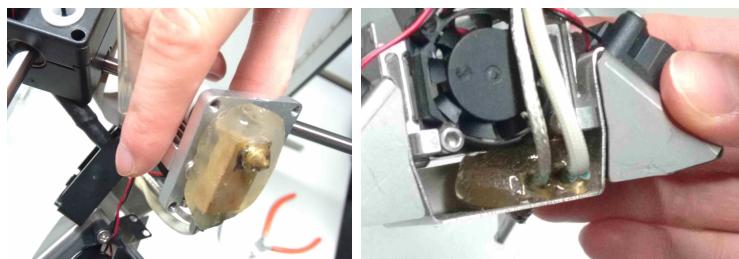


Abbildung 5.3: Filament um Heizblock

Rückstände am Heizblock zurück, die spätere Drucke beeinträchtigen können.



Abbildung 5.4: Ausgebauter Olsson-Block

5.2 Fehler während des Druckens

In diesem Kapitel werden Fehler beschrieben, die häufiger während des Druckens auftreten. Sie sorgen in aller Regel für ein Misslingen des Drucks. Im Gegensatz zu den Fehlern, die in Kapitel 5.1 beschrieben wurden, sind die hier beschriebenen Fehler weniger schwerwiegend.

Zum Beispiel kann durch ein Verändern der Druckparameter verhindert werden, dass diese Fehler bei einem weiteren Druck erneut auftreten. Zudem ist in der Regel kein kompletter Austausch einzelner Hardwareteile nötig.

5.2.1 Mangelnde Haftung des Objekts auf der Druckplatte

Im Idealfall haftet die unterste Schicht des Filaments fest auf der beheizten Druckplatte, um den höheren Schichten einen guten Halt zu geben. Um das zu erreichen, wird die unterste Schicht meistens langsamer gedruckt als höhere Schichten.

Manchmal haftet die untere Schicht jedoch nicht richtig auf der Druckplatte. Das kann einerseits dazu führen, dass der Druck komplett misslingt, da der Druckkopf die nicht haftenden Fäden hinter sich herzieht.

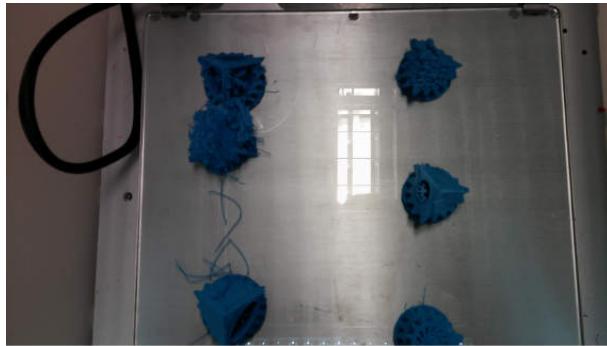


Abbildung 5.5: Beispiel für mangelnde Haftung: Das Objekt links in der Mitte wurde hinter dem Druckkopf hergezogen
Haltung der untersten Filamentschicht auf der Druckplatte auf.

Andererseits kann es passieren, dass das Objekt zwar gedruckt wird, sich die Schichten aber mit zunehmender Höhe gegeneinander verschieben. Da die untere Schicht nicht fest auf der Druckplatte haftet, kann es passieren, dass das Objekt vom Druckkopf leicht verschoben wird. Dadurch sitzen die Schichten nicht exakt aufeinander und sind gegeneinander verschoben.

Dieser Fehler tritt wegen mangelnder Haf-

Als Gegenmaßnahme kann die gläserne Druckplatte mit einer dünnen Schicht Klebstoff bestrichen werden. Dadurch haftet die erste Filamentschicht wieder besser. Zudem bietet Ultimaker inzwischen eine neue Druckplatte an, die speziell beschichtet ist und dadurch eine bessere Haftung ermöglichen soll.

5.2.2 Stringing

Es kann passieren, dass sich beim Drucken unerwünschte Fäden aus Filament bilden. Diese können entweder zwischen einzelnen Strukturen eines gedruckten Objekts oder zwischen mehreren Objekten auftreten. Dieser Fehler wird als Stringing bezeichnet.

Die Ursache für das Stringing ist in der Regel, dass die Retraction zu gering eingestellt ist. Wenn der Druckkopf längere Strecken zurücklegen muss, auf denen kein Filament gedruckt werden soll, wird das Filament zurückgezogen. Dieser Vorgang nennt sich Retraction und soll das Stringing verhindern.

Wird das Filament allerdings nicht stark genug zurückgezogen oder ist die Retraction sogar komplett abgeschaltet, bildet das Filament, das noch an der Düse hängt, einen Faden und wird vom Druckkopf mitgezogen.



(a) Stringing zwischen zwei Objekten (b) Stringing zwischen Strukturen eines Objekts

Abbildung 5.6: Beispiele für Stringing

5.2.3 Zu wenig Material

Ein Grund, warum der Druck von Objekten misslingen kann, ist, dass zu wenig Filament fließt. Dadurch, dass zu wenig Filament zur Verfügung steht, werden die gedruckten Linien zu dünn oder können gar nicht gedruckt werden. Wenn dieser Fehler auftritt, muss der Druck in aller Regel abgebrochen werden; denn selbst wenn in höheren Schichten wieder genug Material fließt, kann dieses auf den fehlenden Linien nicht gut haften.

Es kann verschiedene Gründe dafür geben, dass zu wenig Material fließt. Einerseits kann eine Fehlfunktion des Feeders vorliegen (5.4.3) oder die Reibung im Bowdenzug (5.1.3) ist zu hoch. Möglicherweise ist die Reibung auch wegen einer Verformung der PTFE-Kopplung erhöht (5.1) oder in der Düse befinden sich noch Verschmutzungen, beispielsweise verbrannte Materialreste von früheren Drucken (5.2.5).

Eventuell tritt der Fehler auch wegen schlecht gewählten Parametern (5.3) auf. Dabei kann es sein, dass die Temperatur zu gering gewählt wurde, wodurch das Material nicht flüssig genug für den Druck ist. Ein weiterer Grund kann sein, dass die Druckgeschwindigkeit zu hoch eingestellt wurde und der Drucker nicht in der Lage ist, das Filament schnell genug zu fördern. .

5.2.4 Grinding

Das Grinding ist ein Fehler, der im Feeder auftritt. Es wird durch andere Fehlfunktionen des Druckers ausgelöst und ist somit eigentlich eine Folge dieser Fehler. Das Grinding selbst kann wiederum weitere schwere Fehler auslösen.

Die Ursache für das Grinding ist, dass das Material nicht schnell genug fließt, beispielsweise weil zu hohe Reibung im Bowdenzug (5.1.3) oder Druckkopf vorhanden ist oder weil das Material nicht stark genug erhitzt wird und dadurch zu zähflüssig ist.

Der Feeder versucht jedoch weiterhin, Material zu fördern. Dadurch frisst er sich in immer dieselbe Stelle des nicht mehr fließenden Materials. Dadurch, dass das Material an einer Stelle nun eingefressen ist, kann es dem Feeder auch nicht mehr gelingen, das Material weiterhin zu fördern - selbst, wenn der Materialfluss wieder möglich wäre.

Durch das Ausbleiben von neuem Material wird im Druckkopf nun immer dasselbe Material erhitzt. Dieses kann verbrennen und dadurch Rückstände in der Düse hinterlassen (5.2.5).

5.2.5 Verschmutzte Düse

Sowohl innerhalb als auch außerhalb der Düse können Filamentrückstände von früheren Drucken verbleiben.

In der Düse können unter anderem Reste von verbranntem Filament verbleiben, beispielsweise verursacht durch Grinding (5.2.4). Diese Rückstände behindern den Materialfluss und können dazu führen, dass zu wenig Filament durch die Düse gelangt. Als Gegenmaßnahme kann man mit einer dünnen Nadel in die aufgeheizte Düse stechen.

An äußeren Rückständen kann sich das Filament des nächsten Drucks verfangen. Dadurch wird es nicht mehr ordentlich auf der Druckplatte ausgebracht und der Druck misslingt. Im schlimmsten Fall kann sich dadurch ein Bollen aus Filament am Heizblock bilden. 5.1.5

5.2.6 Druckergebnisse abhängig von Druckposition

Abhängig von der Position auf der Druckplatte, an der dasselbe Objekt zum Drucken platziert wird, ergeben sich teilweise stark unterschiedliche Ergebnisse. An manchen Positionen gelingt der Druck gut, während an anderen Fehler auftreten. Je nach Position haftet das Objekt unterschiedlich stark an der Druckplatte. Auch die Menge an Filament, die gefördert werden kann, hängt von der Position ab.

Die unterschiedlich starke Haftung kann mehrere Ursachen haben: Da die Glasplatte nicht perfekt auf der Heizplatte aufliegt 5.1.4, kann es sein, dass verschiedene Positionen unterschiedlich gut erhitzt werden. An manchen Positionen haftet das Objekt somit

schlechter, da diese nicht so gut beheizt werden. Eine weitere Ursache kann sein, dass der Klebstoff, der die Haftung des Filaments auf der Druckplatte verbessern soll 5.2.1, nicht gleichmäßig aufgetragen wurde.

Dass an manchen Positionen zu wenig Filament gefördert wird 5.2.3 kann daran liegen, dass der Widerstand im Bowdenzug variiert, je nachdem, wie stark der Bowdenzug gekrümmmt ist 5.1.3.

5.2.7 keine Haftung der Linien auf anderen Linien

Ein weiterer Fehler, der auftreten kann, ist, dass das gedruckte Filament sich nicht mit dem Filament der tieferen Schicht verbindet.

Für diesen Fehler sind verschiedene Ursachen denkbar. Entweder ist die Höhe zwischen den Schichten zu groß gewählt, beispielsweise aufgrund schlechter Kalibrierung. Dadurch ist die obere Schicht zu weit von der unteren entfernt und das Filament kann nicht auf den tieferen Schichten haften bleiben. Eine andere Ursache kann sein, dass die Temperatur zu niedrig eingestellt ist. Dadurch schmilzt das Filament nicht so stark und kann sich schlechter mit den unteren Schichten verbinden. Zudem kann dieser Fehler auftreten, wenn zu wenig Material fließt 5.2.3.

5.3 Ungeeignete oder falsche Parameter in Cura gewählt

Die Software Cura, die zum Ultimaker 2 gehört, ermöglicht es, viele Parameter einzustellen. Dabei kann es passieren, dass ungeeignete oder falsche Einstellungen vorgenommen werden, die dazu führen, dass der Druck misslingt. Im Folgenden werden einige dieser Parameter und wie sie zu Fehlern führen können, näher beleuchtet.

5.3.1 Ungeeignete Supportstrukturen

Bei Objekten, die starke Überhänge haben oder keine glatte Standfläche bieten, mit der sie auf der Druckplatte platziert werden können, sind Supportstrukturen nötig. Diese stützen starke Überhänge ab beziehungsweise sorgen dafür, dass das Objekt genügend Auflagefläche auf der Druckplatte hat. Die Supportstruktur sollte nicht zu stark mit dem Objekt verbunden sein und sich nach dem Druck möglichst einfach und ohne Rückstände

vom Objekt lösen lassen.

Starke Überhänge können beispielsweise mithilfe von Säulen oder dünnen Wänden abgestützt werden. Allerdings lassen sich diese wie bei dem in 5.7 gezeigten Objekt teilweise nur schwer vom Objekt trennen. In diesen Fällen muss das Objekt nachbearbeitet werden.

Supportstrukturen, die für eine größere Auflagefläche des Objekts sorgen sollen, sind beispielsweise Raft oder Brim. In 5.7 ist eine ungeeignete Supportstruktur dargestellt. Dadurch, dass das Objekt eine abgerundete Unterseite besitzt, wird es komplett von einer Supportstruktur unterstützt. Diese lässt sich jedoch kaum noch vom Objekt trennen.



Abbildung 5.7: Beispiele für ungeeignete Supportstrukturen

5.3.2 Geschwindigkeit

Eine ungeschickt gewählte Geschwindigkeit kann Fehler beim Drucken verursachen.

Wenn die Geschwindigkeit zu hoch eingestellt ist, kann es passieren, dass der Feeder nicht genügend Material fördern kann (5.2.3). Zudem kann es sein, dass das Material nicht genügend Zeit hat, sich mit den unteren Schichten zu verbinden. Dadurch kann die Stabilität des Objekts leiden. Insbesondere bei kreisförmigen Strecken kann der Druck zudem unsauber werden.

5.3.3 Wanddicke

Allgemein kann der Drucker lediglich Wände drucken, die mindestens so breit sind wie die Größe der Düse. Aber auch schmale Wände, deren Breite kein Vielfaches der Düsengröße ist, können zu Problemen führen.

5.3.4 Temperatur

Die Höhe der Temperatur hängt unter anderem vom Material des Filaments ab. Idealerweise ist die Temperatur so gewählt, dass das Filament gut fließen kann, ohne dabei zu

verbrennen.

Ist die Temperatur zu niedrig eingestellt, fließt das Material nicht gut. Zudem verbindet es sich dann schlechter mit dem bereits gedruckten Filament. Bei niedrigeren Temperaturen verschmelzen die einzelnen Schichten nicht gut miteinander und dem gedruckten Objekt sind die einzelnen Schichten deutlich anzusehen.

Bei zu hoher Temperatur kann es passieren, dass das Filament zu flüssig wird und das Objekt dadurch unsauber gedruckt wird.

5.4 Weitere Fehler

In diesem Kapitel werden sonstige Fehler beschrieben, die nicht eindeutig einem der vorigen Kapitel zuzuordnen sind.

5.4.1 Kalibrierung

Die Position der Druckplatte sollte regelmäßig kalibriert werden. Bei einer schlechten Kalibrierung sind der Abstand zwischen Düse und Druckplatte und die Neigung der Druckplatte nicht optimal eingestellt.

Dies kann zu schlechter Haftung des Materials auf der Druckplatte führen. Außerdem leidet die Genauigkeit der Drucke unter der mangelnden Kalibrierung, da beispielsweise Linien oder Kreise nicht gerade beziehungsweise kreisförmig verlaufen.

Im Menü des Ultimaker 2 kann eine Funktion zur Kalibrierung aufgerufen werden. In einem ersten Schritt findet eine Grobjustierung statt, im zweiten Schritt folgt die Feinjustierung. Im Idealfall werden Messhöhen - also Metallplättchen, deren Höhe exakt bekannt ist - zur Kalibrierung verwendet.

Es gibt drei verschiedene Punkte, an denen justiert werden kann: Zunächst wird die allgemeine Höhe der Druckplatte in Bezug zur Düse eingestellt. Im Anschluss werden die beiden vorderen Ecken der Druckplatte mithilfe von Schrauben verstellt, sodass sie jeweils bezogen zur Düse den idealen Abstand haben.

5.4.2 Verschiedene Eigenschaften des Filaments je nach Farbe und Lagerung

Je nachdem, welche Art von Plastik als Filament verwendet wird, weist es verschiedene Eigenschaften auf. Beispielsweise sind die geeigneten Drucktemperaturen für PLA und ABS unterschiedlich.

Aber auch bei unterschiedlichen Filamentrollen von PLA fallen Unterschiede auf.

Eine Rolle spielt dabei die Lagerung der Filamentrollen. Wenn das Filament längere Zeit an der Luft gelagert wird, wird es zunehmend spröde und bekommt somit schlechtere Druckeigenschaften.

Auch die Farbe des Filaments hat Auswirkungen auf die Eigenschaften des PLA. Das liegt daran, dass die beigemischten Farbstoffe die Materialeigenschaften zusätzlich beeinflussen.

Bei den in dieser Studienarbeit verwendeten Filamenten beispielsweise erwies sich das rote Material als am besten geeignet. Dagegen war das schwarze Filament von Beginn an auffallend spröde - auch ohne lange an der Luft gelagert worden zu sein. Als Plastik wurde PLA verwendet. Bei den Drucken fiel auf, dass die Materialeigenschaften, abhängig von der verwendeten Farbe, teilweise deutlich unterschiedlich waren. Am besten gelangen die Drucke mit rotem Filament. Schwarzes Filament dagegen war sehr spröde.

Abbildung 5.8 verdeutlicht die verschiedenen Eigenschaften von rotem und durchsichtigem Filament. Beide Male wurde dasselbe Objekt mit denselben Druckparametern gedruckt. Während das rote Objekt stabil und gut gedruckt wurde, halten beim durchsichtigen Filament die Linien nicht gut zusammen.

Die Farbe des Filaments beeinflusst also auch, wie stark die Haftung des Materials an sich selbst ist.

5.4.3 Elektrische Spannung am Feeder

Die Spannung, mit der der Feeder-Motor angesteuert wird, kann im Menü des Ultimaker 2 eingestellt werden. Das Drehmoment des Schrittmotors kann dadurch variiert werden. Je nach Einstellung kann das Drehmoment zu gering sein. Die Förderleistung nimmt dadurch ab und kann zu Unterförderung führen.

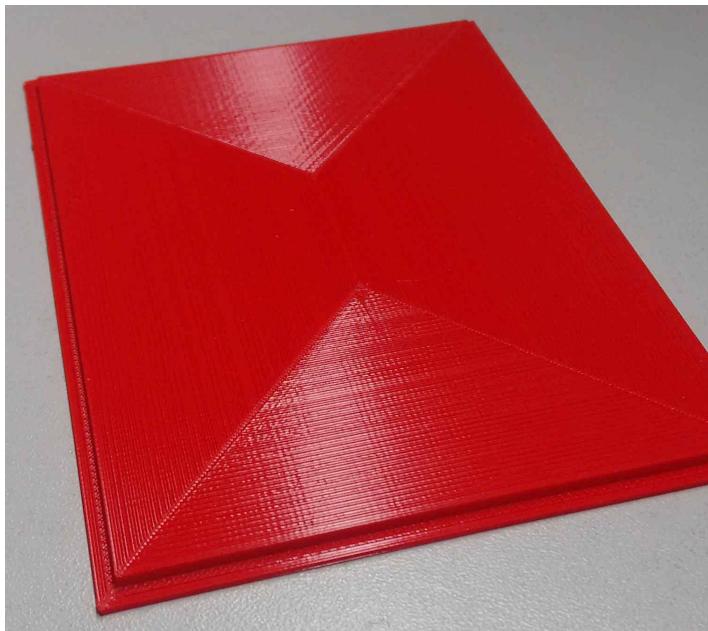


Abbildung 5.8: Dasselbe Objekt mit rotem (links) und durchsichtigem (rechts) Filament

5.4.4 Anpressdruck im Feeder

Mit einer Schraube kann der Anpressdruck im Feeder angepasst werden. Der Druck sollte so gewählt werden, dass der Feeder das Filament gut fördern kann, ohne zu sehr in das Plastik einzudrücken.

Wenn der Druck zu gering gewählt ist, kann der Feeder das Filament nicht fördern. Ist der Druck zu hoch eingestellt, kann es sein, dass zuviel Druck auf das Filament aufgebaut wird. Dadurch wird das nötige Drehmoment erhöht und es kann zur Verformung des Materials kommen. Im Druckkopf kann ein verformtes Material die Heizleistung nicht effizient aufnehmen. Der vom Feeder aufzubringende Druck nimmt zu.

5.4.5 Unsauber aufgerolltes Filament

Manchmal kommt es vor, dass das Filament nicht sauber auf der Rolle aufgewickelt ist. Dadurch wird es schwerer für den Feeder, das Filament von der Rolle abzurollen. Im schlimmsten Fall kann es passieren, dass sich das Filament verknotet und es zum Grinding (Abschnitt 5.2.4) kommt der Druck abgebrochen werden muss.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Studienarbeit, nämlich das Entwerfen und Drucken eines technischen und eines organischen Objekts mit dem Ultimaker 2, wurde erreicht.

Zusätzlich zu diesen in Kapiteln 3 und 4.1 beschriebenen Objekten wurden einige kleinere Objekte gedruckt, die in der Regel nicht selbst designt waren.

Ein Großteil der Arbeitszeit verlor sich in der Fehlersuche -Vermeidung. Ein großer Teil der Drucke scheiterte an sich ähnelnden Fehlern - zu wenig gefördertes Material oder zu geringe Haftung am Druckbett. Beides lässt auf Hardware-/Mechanik-Probleme des Druckers schließen.

6.1 Technisches Objekt

Als technisches Objekt wurde ein Aufbewahrungssystem für einen Raspberry Pi, der mit einer Festplatte und einem USB-Hub gekoppelt ist, entworfen. Dieses System wurde in Solid Edge mit den korrekten Bemaßungen entworfen.

Einige der Komponenten des Aufbewahrungssystems wegen Fehldrucken mehrfach gedruckt werden mussten. Zudem mussten die Bemaßungen angepasst werden, da anfangs die Präzision des Druckers überschätzt wurde und die Komponenten deshalb nicht ineinander passten.

Letztlich gelang es jedoch, sämtliche Komponenten des Aufbewahrungssystems erfolgreich zu drucken. Es wird von einem der Bearbeiter verwendet und stellt eine erhebliche Verbesserung zu dem davor verwendeten Aufbewahrungssystem aus Lochblechen dar.

6.2 Organisches Objekt

Das dreidimensionale Strichmännchen, das als organisches Objekt in Blender entworfen wurde, konnte ebenfalls gedruckt werden. Während des Drucks wurden verschiedene

Positionen des Männchens - liegend und stehend - getestet.

Dies zeigte, dass Objekte möglichst eine gerade Auflagefläche bieten sollen, da die von Cura erstellten Supportstrukturen nur schwer vom Objekt zu lösen sind.

Das Strichmännchen selbst könnte noch feiner designt werden, beispielsweise könnten Merkmale wie Gesichtszüge oder Kleidung hinzugefügt werden.

6.3 Upgrade des Druckers

Zusätzlich zu den beschriebenen Objekten wurde der Olsson-Block in den Ultimaker 2 eingebaut. Dieser ermöglicht es zukünftig, Drucke mit verschiedenen großen, relativ einfach austauschbaren Düsen zu realisieren.

Somit könnten sich weitere Studienarbeiten mit dem Ultimaker 2 insbesondere auf die Arbeit mit dem Olsson-Block und den neuen Möglichkeiten, die dieser bietet, befassen.

6.4 TODO

6.5 Fazit zu Additiven Fertigungsverfahren

Für den Privatgebrauch lohnt sich ein 3D-Drucker des heutigen Entwicklungsstands kaum. Die Drucktechnologie ist nicht ausgereift genug, um wartungsarm betrieben zu werden. Die langen Druckzeiten und die nötigen Vorbereitungen bis zum Druck, ein Objekt zu suchen oder zu designen, die geringen Baugrößen der heutigen kostengünstigen Drucker und die Notwendigkeit von gedruckten Objekten degradieren den Drucker im Heimgebrauch zum Werkzeug für Tüftler, die auch gerne Zeit in die Fehlerbehebung investieren. Falls nicht das Drucken als Hobby im Vordergrund steht, können Drucke in nächster Zukunft auch in den vielzähligen Druck-Shops beauftragt werden.

Da der Ansatz des privaten 3D-Druckers erst allmählich in die Massentauglichkeit übergeht, werden in naher Zukunft möglicherweise Anwendungsfälle für die private Anschaffung

entstehen. Zukünftige Entwicklungen der additiven Fertigung werden diese Möglichkeiten aufzeigen.

Für professionelle Entwicklungen sind additive Fertigungsverfahren schon heute schwer wegzudenken. Entwicklungsabteilungen können mit Druckern erste Prototypen entwerfen, die im Verhältnis zu herkömmlichen Fertigungsverfahren deutlich weniger Arbeitszeit erfordern. Mittlerweile können mit Sinter-Verfahren auch belastbare Prototypen aus Metall erstellt werden.

Additive Herstellungsverfahren bieten zudem bisher unmögliche Konstruktionen. Beispielsweise wurde ein neuartiger Greifarm entwickelt, der in verschiedene Raumrichtungen geneigt werden kann und in diesen mit seiner Klaue Objekte fixieren kann. Die interne Kammerstruktur, die Neigungen ermöglicht, kann nur in einem additiven Verfahren erzeugt werden.

Der Sprung vom Prototypenbau hin zur Serienfertigung mit additiven Verfahren ist vor allem eine Frage der Druckgeschwindigkeit. Momentane Systeme benötigen mehrere Stunden pro Objekt. Kleinserien sind in dieser Geschwindigkeit denkbar, jedoch ist eine Massenproduktion schwer realisierbar. Ein Grund zum Einsatz für Serienproduktionen ist die individuelle Fertigung auf Kundenwunsch. Anstatt mehrere Varianten auf Vorrat zu fertigen, könnten automatisierte Drucksysteme die Individualisierungen direkt im Fertigungsprozess berücksichtigen.

Der 3D-Druck als additives Fertigungsverfahren steckt momentan noch in den Kinderschuhen. Momentane Systeme benötigen einen hohen Zeit- und Wartungsaufwand. Außerhalb des Entwicklungssektors ist der Einsatz noch fraglich, da nur wenige sinnvolle Anwendungen verfügbar sind. Im Privatgebrauch ist ein 3D-Drucker im Moment nur als Hobby anzusehen. Aufgaben, für die der Drucker im eigenen Haus undenkbar wäre, gibt es im Moment nicht. In den nächsten Jahren wird die Technologie möglicherweise weit genug entwickelt sein um sinnvolle Anwendungen zu bieten. In diesem Falle wird möglicherweise auch in unseren Kellern bald ein Drucker zu finden sein.

7 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] ABTS, G. : Polymere Werkstoffe. Version: 2014.
<http://dx.doi.org/10.3139/9783446439290.002>. In: *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. – DOI 10.3139/9783446439290.002. – ISBN 978-3-446-43925-2, S. 65–99
- [2] ANETTE ZWAHR U.A.: *Meyers großes Taschenlexikon*. 2006
- [3] B.V., U. : *Bild des Ultimakers 2+*. <https://ultimaker.com/download/247/Ultimaker%202%20Go%20Press%20kit.zip>,
- [4] B.V., U. : *Ultimaker-Website*. ultimaker.com,
- [5] CHRISTEN, H. R.: *Chemie*. Sauerländer, 1974
- [6] DOMINIK RIETZEL, FLORIAN KÜHNLEIN, DIETMAR DRUMMER: *Selektives Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten*.
<https://www.rtejournal.de/ausgabe6/3113/pdfversion.pdf>, 2009
- [7] GEBHARDT, A. : Grundlagen des Rapid Prototyping. In: *RTejournal* 1 (2004), Nr. 2004
- [8] HAGL, R. : *Das 3D-Druck-Kompendium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. Springer-Verlag, 2014
- [9] HAGL, R. : 3D-Druck-Technologien. In: *Das 3D-Druck-Kompendium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. Springer-Verlag, 2014, S. 15–35
- [10] KLÖDEN, D. B.: *Infoblatt Generative Fertigung-Elektronenstrahlschmelzen*.
http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Infobl%C3%A4tter/generative_fertigung-elektronenstrahlschmelzen_fraunhofer_ifam_dresden.pdf,