

Hochschule Luzern

Technik und Architektur

Abteilung Maschinentchnik

Betreuender Dozent: Marco De Angelis

Experte: Giovanni Mastrogiacomo

# **Extruder für Schokoladendrucker**

**Bachelor-Thesis, Herbstsemester 2018**

7. Januar 2019

Dominik Schüpbach

# Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

<b>Titel</b>	<b>Extruder für Schokoladendrucker</b>
<b>Diplomandin/Diplomand</b>	<b>Schüpbach, Dominik</b>
<b>Bachelor-Studiengang</b>	<b>Bachelor Maschinentechnik</b>
<b>Semester</b>	<b>HS18</b>
<b>Dozentin/Dozent</b>	<b>De Angelis, Marco</b>
<b>Expertin/Experte</b>	<b>Mastrogiacomo, Giovanni</b>

## Abstract Deutsch

Wenn man von 3D-Druckern spricht, denken viele Leute an Teile aus Kunststoff, die in unterschiedlichen Bereichen der Industrie verwendet werden. Dass aber auch Lebensmittel wie Schokolade mit einem Drucker verarbeitet werden können, überrascht die meisten.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Konstruktion eines Extruders für Schokoladendrucker, welcher mit Pulver als Ausgangsstoff arbeiten kann, um den Schritt des vorgängigen Schmelzens der Schokolade zu umgehen. Damit das feste Pulver gefördert werden kann, wird eine Pumpe verwendet, die mittels 3D Druck hergestellt werden kann. Es handelt sich dabei um eine exzentrische Schneckenpumpe mit einem Hypozykloidenquerschnitt. Das Schmelzen der Schokolade soll während dem Fördervorgang in der Pumpe selber passieren.

Die Machbarkeit des genannten Funktionsprinzips soll bewiesen werden. Um dies zu erreichen, wird ein Funktionsdemonstrator konstruiert und in mehreren Iterationen verbessert.

Im Verlaufe der Arbeit stellte sich heraus, dass die mechanischen und festigkeitsbezogenen Anforderungen an den Funktionsdemonstrator sehr komplex sind. Auf Grund dessen konnte lediglich bewiesen werden, dass das Fördern von Pulver mit der besagten Pumpe möglich ist, obwohl auch die Möglichkeit an Werkstoffen sehr beschränkt war.

Um ein Extruder zu erhalten, der alle gewünschten Funktionen umsetzen kann, sollte auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aufgebaut werden.

## Abstract Englisch

When it comes to 3D printers many people think of plastic parts used in various sectors of today's industry. The fact that even foods like chocolate can be processed with a printer surprises most people.

This thesis contains the development of an extruder for chocolate printers, that is able to use powder as a raw material to avoid the step of pre-melting chocolate. To convey the solid powder, a pump, that can be produced by means of 3D printing, is used. It is an eccentric screw pump with a cross section based on a hypocycloid. The melting of the chocolate should happen during the transport process in the pump itself.

This should prove the feasibility of the mentioned principle of operation. To achieve this, a function demonstrator is constructed and improved in several iterations.

In the course of this thesis, it became clear, that the mechanical and strength-related requirements of the function demonstrator are very complex. Due to this, it could only be proved, that it is possible to convey the solid powder with said pump, although the possibility of materials was very limited.

In order to obtain an extruder, which can implement all desired functions, the next steps should be based on the knowledge acquired during this thesis.

Ort, Datum

Horw, 7. Januar 2019

© Dominik Schüpbach, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

## Danksagung

Der Dank des Autors geht an all jene Personen, die mit ihrem Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein grosses Dankeschön für die angenehme Zusammenarbeit, die grosse Begeisterung und den stets freundlichen und respektvollen Umgang.

Ein besonders grosser Dank geht an Marco De Angelis, für die Bereitschaft, diese Diplomarbeit über das gesamte Semester zu betreuen und das Ausarbeiten der Aufgabenstellung.

Vielen Dank an Stefan Lustenberger und Philipp Schütz für die grossartige Unterstützung in CAD-Fragen und für das Herstellen sämtlicher Teile auf dem 3D-Drucker innert kürzester Zeit.

Danke auch an Pius Portmann für die Hilfe in Sachen Werkstoffe und Oberflächenbehandlungen.

## Inhalt

Bezeichnungen und Abkürzungen.....	4
1 Einleitung .....	5
2 Aufgabenstellung und Ausganglage.....	6
2.1 Das alte und das neue Konzept.....	6
2.2 Zielsetzungen.....	8
3 Der Sweetin Lebensmitteldrucker von Wüboox .....	9
4 Exzentrerschneckenpumpen und Hypozykloidenquerschnitt .....	10
4.1 Funktionsweise und Anwendungsbereiche von Exzentrerschneckenpumpen.....	10
4.2 Der Hypozykloidenquerschnitt.....	11
4.3 Zusammenspiel von Rotor- und Statorgrößen.....	13
4.3.1 Einstellen des Spiels zwischen Rotor und Statorquerschnitt.....	13
4.3.2 Verdichtender Abschnitt.....	15
5 Grobauslegung von Volumenstrom und Drehzahl .....	16
6 Funktionsdemonstrator Version 1 .....	19
6.1 Gerätebeschrieb .....	19
6.2 Komponentenbeschrieb .....	25
6.3 Funktionsbeschrieb.....	30
6.3.1 Vom Motor zur Pumpe.....	30
6.3.2 Vom Pulver zur flüssigen Schokolade.....	31
6.4 Tests und Ergebnisse .....	32
6.4.1 Vorgehen und Ziele .....	32
6.4.2 Beobachtungen und Erkenntnisse.....	32
6.4.3 Massnahmen.....	33
6.5 Nacharbeit - Sofortmassnahmen.....	33
7 Funktionsdemonstrator Version 2 .....	36
7.1 Gerätebeschrieb .....	36
7.2 Überarbeitete Komponenten.....	39
7.3 Tests und Ergebnisse .....	41
7.3.1 Vorgehen und Ziele .....	41
7.3.2 Beobachtungen und Erkenntnisse.....	41
7.4 Nacharbeit .....	43
8 Funktionsdemonstrator Version 3 .....	45
8.1 Geänderte Komponenten .....	47
8.2 Tests und Ergebnisse .....	48
8.2.1 Vorgehen und Ziele .....	48
8.2.2 Beobachtungen und Erkenntnisse.....	48
9 Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen .....	49
9.1 Erkenntnisse .....	49
9.1.1 Mechanik .....	49
9.1.2 Werkstoffe .....	49

---

9.1.3 Betrieb .....	50
9.2 Handlungsempfehlungen .....	50
9.2.1 Konzeptvorschlag .....	50
10 Fazit .....	52
Literaturverzeichnis .....	53
Abbildungsverzeichnis .....	53
Tabellenverzeichnis .....	54

## Bezeichnungen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschrieb
a	mm	Abstand zwischen P und dem Mittelpunkt des Rollkreises
$A_{\text{Rotor}}$	mm <sup>2</sup>	Profilfläche Rotor
$A_{\text{Stator}}$	mm <sup>2</sup>	Profilfläche Stator
$A_{\text{Zwischen}}$	mm <sup>2</sup>	Freie Fläche zwischen Rotor- und Statorquerschnitt
e	mm	Mass der Exzentrizität
N	-	Anzahl Zähne / Anzahl Gänge
n	min <sup>-1</sup>	Drehzahl Getriebemotor
$N_{\text{Rotor}}$	-	Anzahl Zähne Rotor
$N_{\text{Stator}}$	-	Anzahl Zähne Stator
P	mm	Steigung
$P_{\text{Rotor}}$	mm	Steigung Rotor
$P_{\text{Stator}}$	mm	Steigung Stator
R	mm	Radius Grundkreis
r	mm	Radius Rollkreis
$R_{\text{Rotor}}$	mm	Radius Grundkreis Rotor
$r_{\text{Rotor}}$	mm	Radius Rollkreis Rotor
rs	mm	Versatz des tatsächlichen Rotorprofils
$R_{\text{Stator}}$	mm	Radius Grundkreis des Stators
$r_{\text{Stator}}$	mm	Radius Rollkreis des Stators
s	mm	Spiel
U	mm	Umfang des Profils
$U_{\text{Rotor}}$	mm	Umfang Rotorprofil
$U_{\text{Stator}}$	mm	Umfang Statorprofil
v	-	Faktor für die Skalierung des Rotorquerschnittes im verdichtenden Abschnitt
$\alpha$	rad	Steigungswinkel von Rotor und Stator
$\varphi$	rad	Laufvariable für das Zeichnen von Hypozykloiden

Abkürzung	Beschrieb
ABS	Der Werkstoff Acrylnitril-Butadien-Styrol wird im Schmelzschichtungsverfahren eingesetzt, indem er einen fast flüssigen Aggregatzustand erreicht und somit durch feine Düsen gepresst wird. [1]
SLA	Stereolithografie ist ein Rapid Prototyping Verfahren, bei dem sich das Werkstück in einem Flüssigbad aus Photopolymer befindet, in das es nach und nach tiefer abgesenkt wird. Ein Laser fährt bei jedem Schritt über den Ausgangsstoff, um die gewünschte Form zu schaffen. [2]

## 1 Einleitung

In der heutigen Industrie ist das Herstellen von Bauteilen mit einem 3D-Drucker bereits weit verbreitet. Egal ob Funktionsmuster, Prototypen, Funktionsbauteile oder Designstudien, ein 3D-Drucker findet in vielen Gebieten seine Verwendung. Dass dabei immer mehr Materialien verwendet werden können, überrascht heutzutage fast keinen mehr.

Durch die Vielfalt an Materialien können 3D-Drucker auch in komplett anderen Bereichen eingesetzt werden, zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie. Schokolade bietet sich dabei als Material an, da es gut verflüssigt werden kann. Ausserdem sind Figuren aus Schokolade schöne Verzierungen, unter anderem auf Torten.

Schon heute gibt es Geräte, die aus der süssen, braunen Masse komplexe Figuren erzeugen kann. Die Bedingung ist jedoch, dass die Schokolade in flüssiger Form dem Drucker zugeführt wird. Dieser vorgelagerte Prozessschritt bietet dabei viel Spielraum, etwas falsch zu machen.

Ein neuartiges Konzept sieht vor, dass auf diesen vorgelagerten Schritt verzichtet werden kann. Das soll erreicht werden, indem die Schokolade als Pulver in den Drucker gegeben wird und dieses während des Prozesses gefördert, verdichtet und geschmolzen wird, ehe die Schokolade die Düse passiert. Dafür wird eine spezielle Pumpe eingesetzt, die in der Lage ist, festes Pulver zu fördern. Diese Arbeit sieht nun vor, das vorliegende Konzept umzusetzen. Das Ziel ist das Konstruieren und Herstellen eines Aufbaus, der nach dem genannten Prinzip arbeitet.

Als erstes soll der Volumenstrom am Ausgang der Düse bestimmt werden, um danach die Pumpe entsprechend auszulegen. Nach dem Konstruieren eines Funktionsdemonstrators soll die Pumpe in mehreren Iterationen angepasst werden, um die idealen Parameter zu finden.

## 2 Aufgabenstellung und Ausganglage

Bekannte Schokoladendrucker arbeiten mit bereits verflüssigter Schokolade, welche durch einen Kolben ausgedrückt wird. Die Maschine ist einfach, hat aber einige Nachteile, weil ein heikler Verarbeitungsschritt vorgelagert werden muss. Auch die Flexibilität ist eingeschränkt, weil immer die richtige Menge an Schokolade für einen Druckauftrag vorbereitet werden muss.

Ein neues Konzept geht davon aus, dass der Drucker mit Schokoladenpulver als Ausgangsmaterial arbeitet, welches in einer besonderen volumetrischen Pumpe verflüssigt wird und dem Druckkopf zur Verfügung gestellt wird. Die volumetrische Pumpe besteht im Wesentlichen aus zwei coaxialen Körpern, wobei die Drehung des Inneren, dem Rotor, eine Taumelbewegung erzeugt, welche zur Förderung dient. Dessen Funktion ist bekannt und wird unter anderem in einer Patentschrift US1,892,217 beschrieben.

Nach einem ersten Pumpenabschnitt zur Pulverförderung, kommt ein verdichtender Abschnitt, der sich mit dem allmählichen Reduzieren des Pumpendurchmessers erreichen lässt, in dem die Schokolade unter Einwirkung externer Hitze, zum Beispiel in Form eines Wasserbades, aufgeschmolzen wird. In einem letzten Abschnitt wird die flüssige Schokolade weitergefördert und homogenisiert.

Der beschriebene Vorgang entspricht dem Wunschenken des Erfinders. Ziel der Arbeit ist es, dessen Machbarkeit zu beweisen.

Ziel der Arbeit ist also die Konstruktion und Herstellung eines Funktionsdemonstrators, welcher die Machbarkeit dieser neuen Technologie beweist. Sowohl die Pulverförderung als auch deren Verdichtung zur Schokoladenmasse werden angestrebt und sollen demonstriert werden.

Um die Vielzahl an Versuchen, die nötig sind, um diese Aufgabe seriös zu bewältigen, durchführen zu können, hat man sich im Vorfeld dieser Arbeit dazu entschieden, die Pumpe aus 3D-Druck-Kunststoff herzustellen. Da die Hochschule Luzern über einen solchen Drucker verfügt, lassen sich kurze Herstellzeiten und tiefe Kosten erzielen. Dies lässt mehrere Iterationen zu und umgeht weite Versandwege.

### 2.1 Das alte und das neue Konzept

Schokoladendrucker sind an sich nichts Neues. Ihre Funktionsweise ist in wenigen Schritten erklärt. Die Schokolade muss vorgängig geschmolzen werden und wird dann in den Drucker eingefüllt. Ein Kolben erzeugt den Druck, mit dem die flüssige Schokolade durch die Düse gedrückt wird. Es ist also im Prinzip nichts anderes als eine Spritze mit einem beweglichen Tisch.

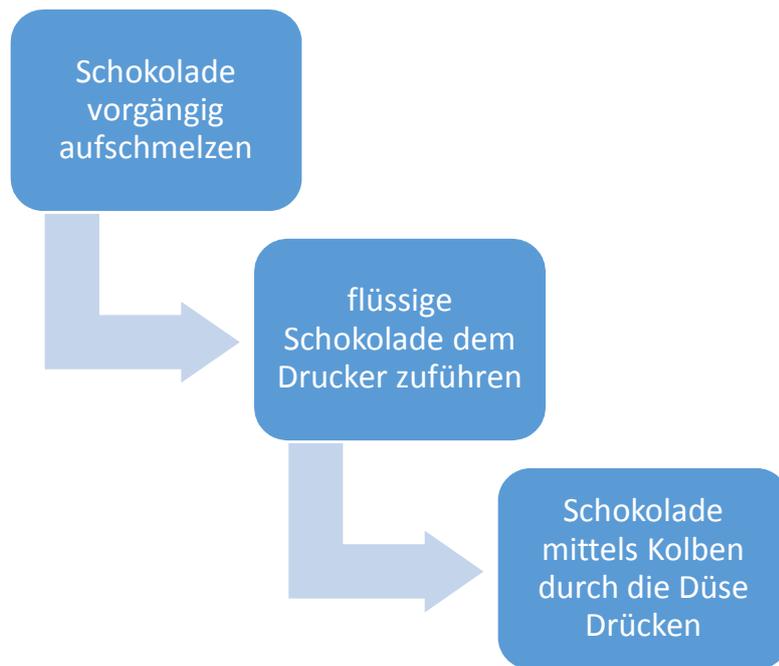


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines bereits bestehenden Funktionsprinzips

Es gibt auch Drucker, die die Schokolade selber aufschmelzen. Dabei werden im eigentlichen Sinne nur die ersten beiden Schritte vertauscht und die Schokolade wird im Drucker direkt geschmolzen, bevor der Kolben eingesetzt wird.

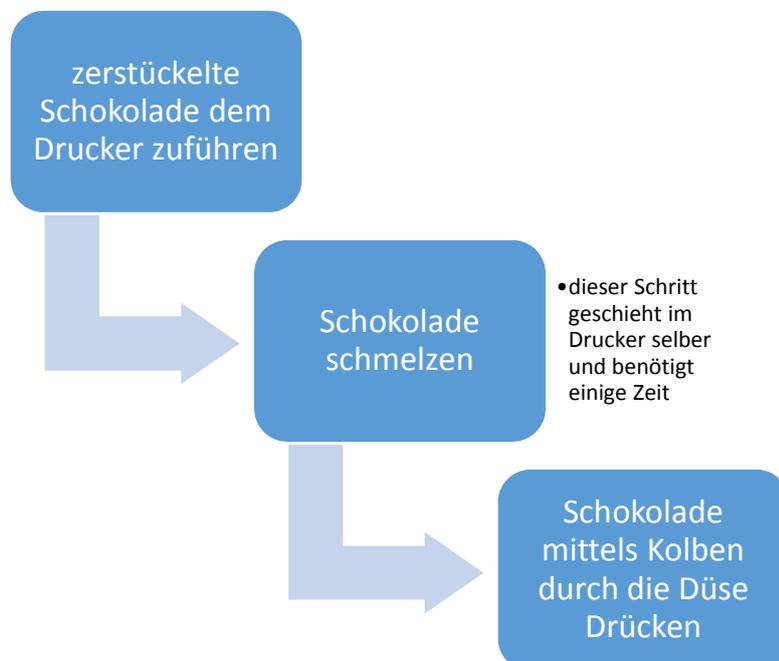


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines weiteren bereits bestehenden Funktionsprinzips

Ein Drucker, der nach dem zweiten Prinzip arbeitet, ist zum Beispiel der Sweetin von der Firma Wiiibox. Er wird im Kapitel 3 auf der Seite 9 beschrieben und dient als Grundlage für die grobe Auslegung der ersten Version des Funktionsdemonstrators.

Das neue Konzept arbeitet nun nicht mehr mit flüssiger oder zerstückelter Schokolade als Ausgangsstoff, sondern mit Pulver. Es wird zuerst als Feststoff gefördert, und verdichtet, ehe es unter Einfluss von externer Wärme geschmolzen wird und dann seinen Weg durch die Düse findet.

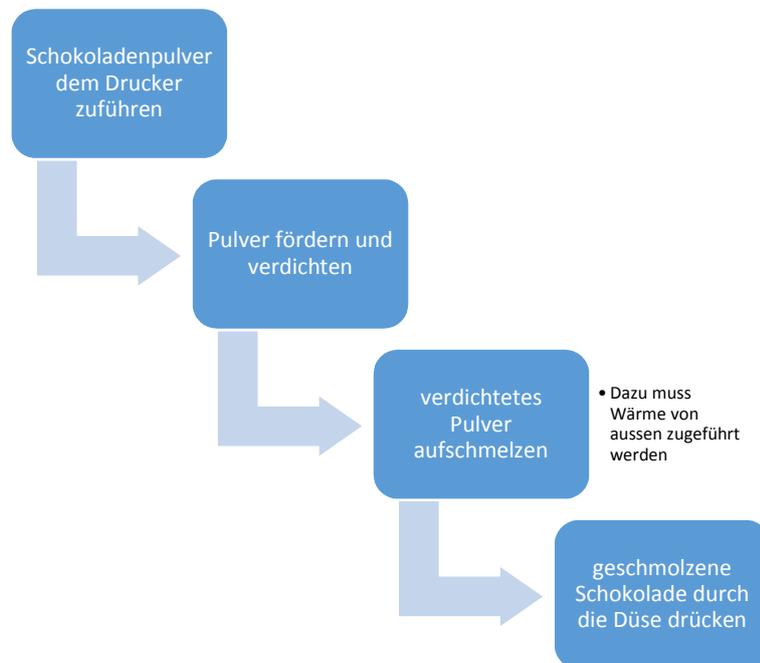


Abbildung 3: Schematische Darstellung des neuen Funktionsprinzips

Aus dem neuen Konzept entstehen zwei grosse Vorteile:

- Ein vorgängiges Schmelzen der Schokolade kann umgangen werden. Dieser Schritt erfordert ständiges Beobachten und Umrühren, sowie die entsprechende Infrastruktur.
- Es ist nicht mehr nötig, die Schokolade genau zu portionieren. Sieht man, dass zu Beginn zu wenig Pulver eingefüllt wurde, kann man während des Druckprozesses noch mehr Pulver einfüllen. Überschüssiges Pulver kann wiederverwendet werden.

## 2.2 Zielsetzungen

Mit der Umsetzung dieses Konzeptes wird Neuland betreten. Das oberste Ziel ist die Umsetzung und der Beweis der Machbarkeit:

- Das Ziel ist es, das beschriebene Konzept umzusetzen und dessen Machbarkeit zu beweisen. Um das zu erreichen, soll ein Funktionsdemonstrator konstruiert werden. Dies mit Hilfe der an der Hochschule vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten.
- Das Ziel ist es, den besagten Funktionsdemonstrator in mehreren Iterationen zu optimieren. Durch das Ausprobieren von unterschiedlichen Pumpenkonfigurationen soll der Einfluss von verschiedenen geometrischen Grössen bestimmt werden.
- Das Ziel ist es, die besten Parameter für eine optimale Funktionalität zu finden.

### 3 Der Sweetin Lebensmitteldrucker von Wiiboox

Der Sweetin von der Firma Wiiboox ist ein Food-3D-Drucker, der neben heller und dunkler Schokolade unter anderem auch Marmelade oder Sahne verarbeiten kann. Der Drucker arbeitet nach dem in Abbildung 2 gezeigten Prinzip, was bedeutet, er schmelzt die Schokolade selber auf.



Abbildung 4: Wiiboox Lebensmitteldrucker [3]

Die technischen Daten des Sweetin geben Anhaltspunkte zur groben Auslegung des Funktionsdemonstrators, die in Kapitel 5 näher beschrieben wird.

Dimensionen	192mm x 380mm x 420mm		
Gewicht	10kg		
Leistung	50W		
Bauraum	90mm x 90mm x 70mm 110mm x 110mm x 75mm		
Düsendurchmesser	0.4mm – 1.55mm		
Druckgeschwindigkeit	15mm/s – 70mm/s		
Schnittstelle	STL / G-code		
Zutat	Verarbeitungstemperatur [°C]	Standard Geschwindigkeit [%]	Rückzugsgeschwindigkeit [%]
Dunkle Schokolade	37	100	50
Weisse Schokolade	33	100	50

Tabelle 1: Technische Daten des Wiiboox Lebensmitteldrucker [3]

## 4 Exzentrerschneckenpumpen und Hypozykloidenquerschnitt

### 4.1 Funktionsweise und Anwendungsbereiche von Exzentrerschneckenpumpen

Exzentrerschneckenpumpen werden zur Förderung von viskoser und hochviskoser Fluide, pastöser Fluide und von Flüssigkeits- Feststoffgemischen gebaut. Sie werden auch zur Förderung von Flüssigkeiten mit langfaserigen Bestandteilen verwendet und demzufolge in der Abwasser- und Klärtechnik, in der Umwelttechnik, in der Textilindustrie, in Vakuumverdampfungsanlagen, in der verfahrenstechnischen und pharmazeutischen Industrie und in der Lebensmitteltechnik eingesetzt. Sie werden bei Drehzahlen von 10 bis  $1'450\text{min}^{-1}$  in Abhängigkeit der Viskosität des Fördermediums gebaut. Exzentrerschneckenpumpen sind bis zu einer gewissen Saughöhe selbstansaugend.

In Exzentrerschneckenpumpen rotiert eine ein- oder mehrgängige kreisrunde oder elliptische Spindel als Verdränger mit einem Kordelgewinde in einem schraubenförmig ausgebildeten Gehäuse mit grosser Gewindesteigung.

In einem feststehenden Stator, der meist aus einem Elastomer wie zum Beispiel Naturgummi mit verschiedenen Shorehärten, synthetischen Gummisorten, Neopren, Nitrilkautschuk, Perbunan, Ethylenpropen, Hypalon, Viton, Polyurethan, Butyl, Silicon oder ähnlichen Kunststoffen wie PTFE, Polyamid, Polypropylen, Polyethylen und Hartgewebe besteht und der mit einem schraubenförmigen Hohlraum mit großer Steigung, großer Gewindetiefe und mit einem Langlochquerschnitt versehen ist, dreht sich exzentrisch ein aus Edelstahl, Titan oder mit Hartchromauflage versehener Rotor, der als Schraube mit gleicher Gewindetiefe wie der Stator ausgerüstet ist.

Um einen abgeschlossenen Arbeitsraum zwischen Rotor und Stator zu erhalten, muss der Stator mit grösserer Steigungshöhe als die des Rotors ausgeführt werden. Der Rotor führt dabei eine Rotation um die eigene Körperachse, sowie auch eine Drehung in entgegengesetzter Richtung um die Statorachse aus. Durch die unterschiedlichen Gangzahlen und Steigungshöhen von Rotor und Stator entstehen bei exzentrischer Rotation der Spindel Hohlräume im Stator, die sich bei der exzentrischen Drehung des Rotors am Statorbeginn öffnen und schließen und als geschlossene Räume spiralförmig in der Längsachse bewegt werden. Die in Längsrichtung durch die Pumpe laufende Berührungslinie zwischen Rotor und Stator sorgt für die Abdichtung zwischen der Saug- und Druckseite. Der Volumenstrom der Pumpe wird also von der Größe des Förderraumes, dem Rotor- und Gehäusedurchmesser, der Exzentrizität des Rotors, der Steigungshöhe des Rotorgewindes und der Drehzahl bestimmt.

Der erreichbare Förderdruck und die Saugfähigkeit der Exzentrerschneckenpumpe wird von der Dichtheit der Berührungslinie von Rotor und Stator bestimmt und beträgt bis 25 MPa für einstufige Pumpen, in Abhängigkeit der Pumpenlänge.

Die Oberfläche des Rotors wird durch die Funktion der Hypozykloide beschrieben, die sich in der Längsachse über die Steigungshöhe erstreckt. Die Berührungslinie zwischen Rotor und Stator läuft bei Rotation entlang der Hypozykloide und trennt damit den Saug- vom Druckraum. Damit arbeitet die Pumpe rein volumetrisch und ist theoretisch in der Druckerhöhung nur durch die Dichtheit begrenzt.

[4]

## 4.2 Der Hypozykloidenquerschnitt

Die Querschnittsgeometrie von Rotor und Stator wird mittels einer Hypozykloide konstruiert.

Hypozykloiden sind spezielle Rollkurven mit den folgenden Parametern:

- $r$ : Radius des rollenden Kreises
- $a$ : der Abstand des Punktes  $P$  zum Mittelpunkt des rollenden Kreises
- $R$ : Radius des festen Kreises (Grundkreis)

Zum besseren Verständnis wird in diesem Kapitel ein Querschnitt konstruiert, bei dem  $R=40\text{mm}$  und  $r=8\text{mm}$  betragen.

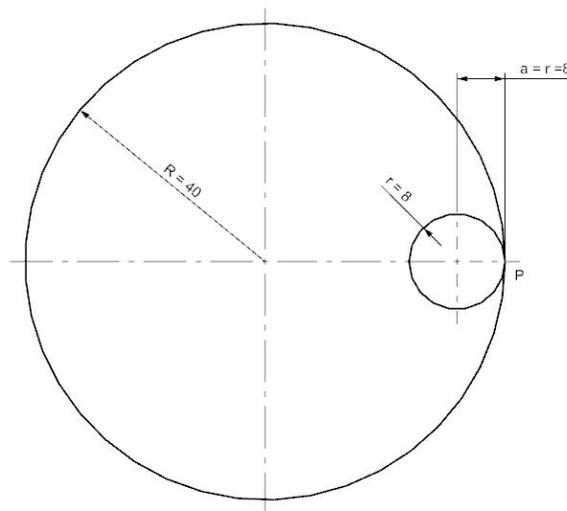


Abbildung 5: Grund- und Rollkreis

Folgt man nun einem Punkt  $P$ , während der Rollkreis auf dem Grundkreis abrollt, so entsteht die besagte Hypozykloide, wie in Abbildung 7 gezeigt.

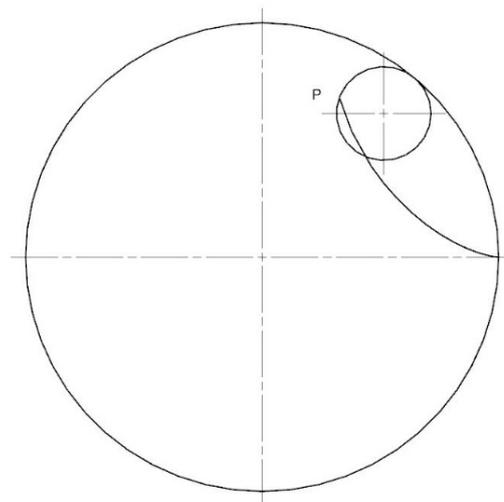


Abbildung 6: Entstehende Hypozykloide

Die Hypozykloidenkurve lässt sich mathematisch durch die zwei Gleichungen 4.1 und 4.2 beschreiben. Die Laufvariabel  $\varphi$  ist der Winkel zwischen der horizontal liegenden X-Achse und der Linie, die die beiden Mittelpunkte verbindet.

$$x(\varphi) = (R - r) \cdot \cos(\varphi) + a \cdot \cos\left(\varphi \cdot \frac{R - r}{r}\right) \quad (4.1)$$

$$y(\varphi) = (R - r) \cdot \sin(\varphi) - a \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{R - r}{r}\right) \quad (4.2)$$

«Die gemeine Hypozykloide ergibt sich für den Fall, dass  $a=r$  ist. Für  $a>r$  ergibt sich eine verlängerte Hypozykloide, bei  $a<r$  entsteht eine verkürzte Hypozykloide. Für das Konstruieren des Querschnittes muss immer  $a=r$  gelten.» [5]

Das Verhältnis  $R/r$  muss eine ganze Zahl sein, damit sich eine periodische Kurve ergibt mit der einer Periode von  $2\pi$ , sprich einer kompletten Umdrehung. Die Anzahl Spitzen, später auch Anzahl Zähne, ergibt sich durch

$$N = \frac{R}{r} \quad (4.3)$$

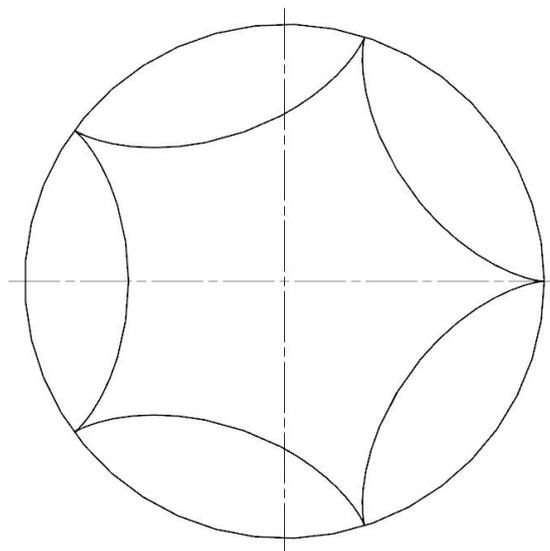


Abbildung 7: Hypozykloide mit fünf Zähnen

Um den Rotor- oder Statorquerschnitt zu erhalten, wird die Hypozykloide um den Wert von  $r$  versetzt, wodurch auch die Verrundungen der einzelnen Zähne entstehen. [6]

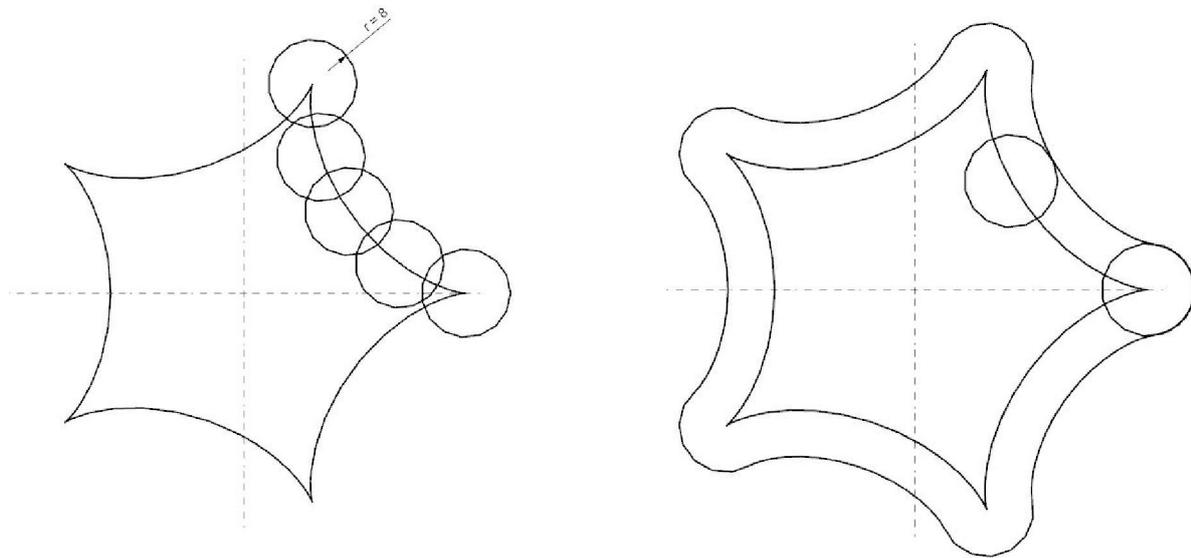


Abbildung 8: Versatz der Hypozykloide um  $r$  (links) und fertiger Querschnitt (rechts)

### 4.3 Zusammenspiel von Rotor- und Statorgrößen

Bekanntermassen hat der Rotor einen Gang oder Zahn weniger als der Stator. Die Taumelbewegung des Rotors wird durch die Distanz der beiden Achsen, sprich durch die Exzentrizität, erreicht. Diese Exzentrizität muss den gleichen Wert haben wie der Radius des Rollkreises  $r$ , somit:

$$e = r_{Rotor} = r_{Stator} \quad (4.4)$$

$$N_{Stator} = N_{Rotor} + 1 \quad (4.5)$$

Es muss ebenfalls gelten, dass die Rollkreise von Rotor und Stator gleich gross sind. [6]

#### 4.3.1 Einstellen des Spiels zwischen Rotor und Statorquerschnitt

Konstruiert man beide Querschnitte, den vom Rotor und den vom Stator, nach dem beschriebenen Ablauf, gibt es kein Spiel zwischen den beiden Teilen. Da ein möglichst geringer Widerstand zwischen Rotor und Stator angestrebt wird, ist Spielraum zwischen den Teilen jedoch notwendig. Dieser Spielraum wird erreicht, indem der Rotorquerschnitt kleiner gestaltet wird.

Anstatt wie in Abbildung 8 gezeigt die Hypozykloidenkurve um den Betrag von  $r$  zu versetzen, wird ein Mass verwendet, das kleiner ist als  $r$ . Das Spiel wird mit  $s$  bezeichnet und ist die Differenz zwischen  $r$  und  $r_s$ .

$$s = r - r_s \quad (4.6)$$

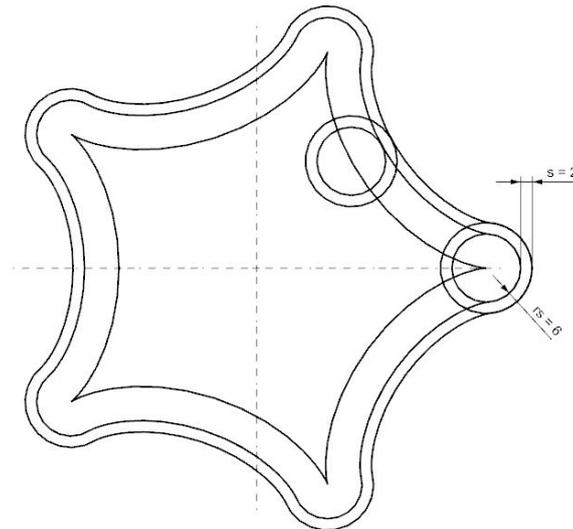


Abbildung 9: Versatz des Querschnittes, um Spiel zu erzeugen

Mit Spiel zwischen Rotor und Stator wird zwar die Dichtheit der Pumpe aufgegeben, jedoch ist es ohne Spiel nicht möglich. Konstruiert man die beiden Bauteile ohne oder mit zu wenig Spiel, weisen sie einen zu grossen Widerstand auf. Durch die Herstellung im 3D-Drucker ist ausserdem die Mass- und Formhaltigkeit begrenzt. Die Oberflächen werden ebenfalls sehr rau.

Aus Versuchen ging hervor, dass ein Mindestspiel von  $s=0.4\text{mm}$  zwingend notwendig ist. Bei geringerem Spiel konnte der Rotor nicht mehr von Hand in den Stator eingeführt werden. Es war Werkzeug und Gewalt notwendig, um den Rotor nach dem Einführen wieder zu entfernen.

Damit die Gänge von Rotor und Stator ineinandergreifen, muss ihr Steigungswinkel gleich sein. Zeichnet man das Steigungsdreieck, analog zu metrischen Gewinden, von beiden Teilen, erhält man die folgenden geometrischen Zusammenhänge:

$$\tan(\alpha) = \frac{P}{U} \quad (4.7)$$

Nimmt man an, dass der Umfang von Rotor und Stator nach Gleichung 4.8 definiert wird, kann man dies in Gleichung 4.7 einsetzen. Somit ergibt sich ein Verhältnis von Rotor- und Statorsteigung nach Gleichung 4.10.

$$U = 2R\pi = 2Nr\pi \quad (4.8)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{P_{Rotor}}{2N_{Rotor}r\pi} = \frac{P_{Stator}}{2N_{Stator}r\pi} \quad (4.9)$$

$$\frac{P_{Rotor}}{P_{Stator}} = \frac{N_{Rotor}}{N_{Stator}} \quad (4.10)$$

### 4.3.2 Verdichtender Abschnitt

Indem der Stator am Ende von einem zylindrischen in einen konischen Abschnitt übergeht, soll das Schokoladenpulver später verdichtet werden. Um einen konischen Abschnitt im Rotor zu erhalten, wird der Querschnitt mit einem Faktor skaliert. Diesen Faktor wird mit  $v$  bezeichnet. In Abbildung 10 ist zu sehen, wie der Rotor aufgebaut wird.

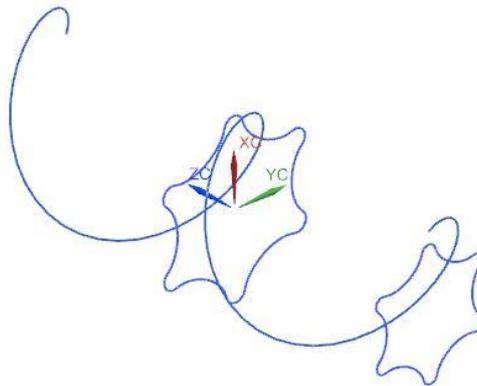


Abbildung 10: Kurven zur Erzeugung eines Rotors

Der grössere Querschnitt, nahe dem Koordinatensystem, ist der konstante Querschnitt im nicht verdichtenden Abschnitt. Dieser Querschnitt wird entlang der linken Helix extrudiert. Um den verdichtenden Abschnitt zu konstruieren, wird der Querschnitt dann entlang der rechten Helix extrudiert, und konstant skaliert, bis am Ende der kleine Querschnitt auf der rechten Seite erreicht ist. Wie bereits erklärt, ist dieser Querschnitt um den Faktor  $v$  skaliert. Welches geeignete Werte für  $v$  sind, soll im Verlaufe der Arbeit herausgefunden werden.

Auf Abbildung 11 ist zu sehen, wie der Rotor schlussendlich aussehen soll. Deutlich zu erkennen sind die beiden Kurven aus Abbildung 10 und ein Knick in der blauen Linie, was zeigt, dass von einem zylindrischen in einen konischen Abschnitt übergegangen wird.

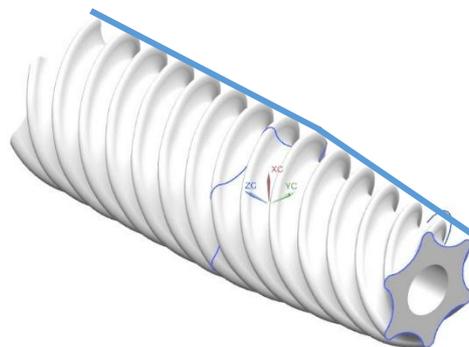


Abbildung 11: Fertiger Rotor

## 5 Grobauslegung von Volumenstrom und Drehzahl

Zur Bestimmung der wichtigsten Dimensionen wurde die Grobauslegung unter der Berücksichtigung der Eckdaten des auf Seite 9 beschriebenen Schokoladendruckers durchgeführt.

Eine wichtige Grösse ist der Schokoladen-Volumenstrom. Der Volumenstrom des Vergleichsobjektes ist 0.141 l/h. Dieser ergibt sich durch das Zusammenspiel von Düsendurchmesser und Druckgeschwindigkeit:

$$\dot{V} = \frac{d_{Düse}^2 \cdot \pi}{4} \cdot v \quad (5.1)$$

Mit den gemittelten Werten für Durchmesser und Geschwindigkeit wird daraus:

$$\dot{V} = \frac{(1mm)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 50mm/s = 39.27mm^3/s = 0.141l/h \quad (5.2)$$

Der Volumenstrom für den Funktionsdemonstrator soll 0.15-0.2 l/h betragen.

Der Volumenstrom ist auch eine Funktion von der Rotor-, bzw. Statorgeometrie und der Motorendrehzahl.

$$\dot{V} = f(A_{Rotor}, A_{Stator}, P_{Stator}, n, ) \quad (5.3)$$

Somit kann die Motorendrehzahl wie folgt abgeschätzt werden:

$$n = f(\dot{V}, A_{Rotor}, A_{Stator}, P_{Stator}) = \frac{\dot{V}}{(A_{Stator} - A_{Rotor}) \cdot P_{Stator}} \quad (5.4)$$

Die Querschnittsflächen von Rotor und Stator sind abhängig von R und r.

Um Rotor und Stator für die ersten Funktionstests zu gestalten wurden diverse Kombinationen von R, r und P durchgerechnet. In der Tabelle 2 sind einige Möglichkeiten ersichtlich. Um eine grobe Abschätzung zu erhalten, wurden zuerst nur die Hypozykloidenkurven betrachtet, ehe das definitive Profil konstruiert und erneut vermessen wurde.

Je grösser die Anzahl der Zähne, desto weniger Zwischenraum bleibt zwischen den beiden Querschnitten. Da so auch mehr Scherkräfte auf die Schokolade wirken, wird ein Profil mit vielen Zähnen angestrebt.

Das Volumen zwischen Rotor und Stator soll gering gehalten werden. Dadurch kann die Drehzahl des Motors erhöht werden und es muss weniger Schokolade auf einmal geschmolzen werden.

Aus diesen Gründen wurden für die erste Version des Funktionsdemonstrators folgende Parameter gewählt:

$$N_{\text{Rotor}} / N_{\text{Stator}} = 6 / 7$$

$$R_{\text{Rotor}} / R_{\text{Stator}} = 12\text{mm} / 14\text{mm}$$

$$r = 2\text{mm}$$

$$P_{\text{Rotor}} / P_{\text{Stator}} = 36\text{mm} / 42\text{mm}$$

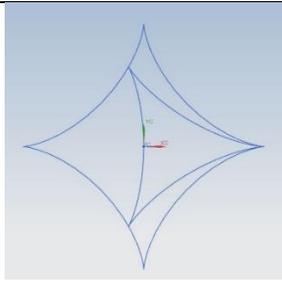
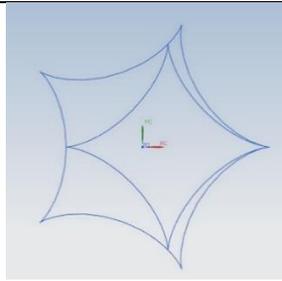
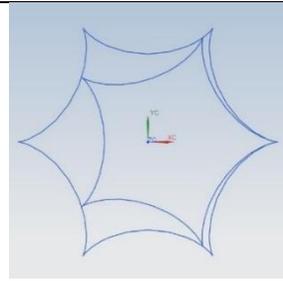
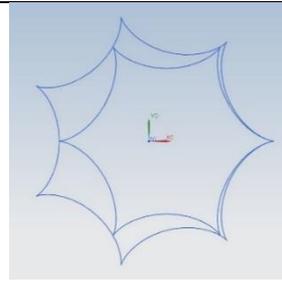
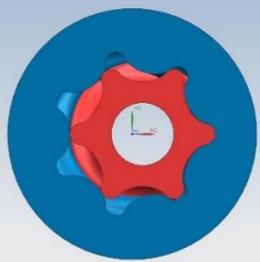
		Hypozykloidenkurven								Tatsächliches Profil	
											
$n_{Rotor}$	-	3	4	5	6			6			
$n_{Stator}$	-	4	5	6	7			7			
$R_{Rotor}$	mm	15	7.5	20	10	25	12.5	30	15	15	12
$R_{Stator}$	mm	20	10	25	12.5	30	15	35	17.5	17.5	14
$r=e$	mm	5	2.5	5	2.5	5	2.5	5	2.5	2.5	2
$A_{Rotor}$	mm <sup>2</sup>	157.1	39.3	471.2	117.8	942.5	235.6	1570.8	392.7	662.7	405.5
$A_{Stator}$	mm <sup>2</sup>	471,2	117,8	942,5	235,6	1570,8	392,7	2356,2	589,0	908,7	581,5
$A_{Zwischen}$	mm <sup>2</sup>	314,1	78,5	471,3	117,8	628,3	157,1	785,4	196,3	246,0	176,0
$P_{Rotor}$	mm	30	30	30	30	30	30	30	30	30	36
$P_{Stator}$	mm	40	40	37.5	37.5	36	36	35	35	35	42
$V$	mm <sup>3</sup>	12564	3140	17674	4418	22619	5656	27489	6871	8610	7392
$\dot{V}$	l/h	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2
$\dot{V}$	mm <sup>3</sup> /min	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	3333	3333
$n$	min <sup>-1</sup>	0,199	0,796	0,141	0,566	0,111	0,442	0,091	0,364	0,387	0,451

Tabelle 2: Auslegungstabelle

## 6 Funktionsdemonstrator Version 1

Mit der ersten Version des Funktionsdemonstrators sollen möglichst viele Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie sich Rotor und Stator zueinander verhalten, wenn sie von einem Motor angetrieben werden. Auch das Wasserbad soll bereits angeschlossen werden, um zu sehen, ob der Hohlraum zwischen Düse und Stator, der in Kapitel 6.1 erklärt wird, dicht ist. Sollten sich die ersten beiden Punkte Erfolg bringen, das heisst, der Rotor taumelt und der ganze Aufbau ist dicht, wird zum ersten Mal überprüft, ob das Schokoladenpulver auch tatsächlich gefördert und geschmolzen wird. Die Pumpe, die in der ersten Version des Funktionsdemonstrators verwendet wird, hat folgende Parameter:

	Rotor	Stator
N	6	7
R	14	12
r = e	2	
P	36	42
s	0.4	
v	0.7	

Tabelle 3: Konfigurationen Funktionsdemonstrator Version 1

### 6.1 Gerätebescrieb

Die erste Version des Funktionsdemonstrators besteht aus den in Kapitel 6.2 beschriebenen Teilen. Ergänzt durch Verbindungselemente ergibt sich die Stückliste nach Tabelle 4.

Position	Menge	Bezeichnung	Bemerkung
10	1	Stator	N7/R14/r2/P42
20	1	Rotor	N6/R12/r2/P36
30	1	Rotorachse	
40	1	Motorwelle	
50	1	Sockel	
60	1	Lagerplatte	
70	1	Düse	
80	3	Stange	
90	3	Distanzbolzen	
100	1	Trichter	
110	1	Getriebemotor	
120	2	Gleitbüchse	14/12x20
130	1	Gleitbüchse mit Bund	14/12x17/1
140	1	O-Ring	31x2
150	1	O-Ring	46x2

160	1	Zylinderschraube	M4x6
170	6	Zylinderschraube	M3x16
180	5	Zylinderschraube	M3x12
190	6	Zylinderschraube	M3x6
200	6	Sechskantmutter	M3
210	1	U-Scheibe	5
220	23	U-Scheibe	3
230	1	Gewindestift	M3x3

Tabelle 4: Stückliste Funktionsdemonstrator Version 1

Auf Abbildung 12 bis Abbildung 14 auf den kommenden Seiten ist zu sehen, wie die Teile zusammengebaut werden. Um die Montage zu vereinfachen, sollten zuerst die unteren Teile, dies sind der Sockel, die Distanzbolzen, die Düse und der Stator, sowie die Stangen und der Trichter zusammengebaut werden. Dann werden die rotierenden Teile, also Motorwelle, Rotorachse, und Rotor mit dem Motor verbunden. Dazu muss dieser natürlich zuerst an der Lagerplatte montiert werden. Nach diesen Schritten, kann die Lagerplatte mit ihren angrenzenden Teilen mit den unteren Teilen zusammengeführt werden.

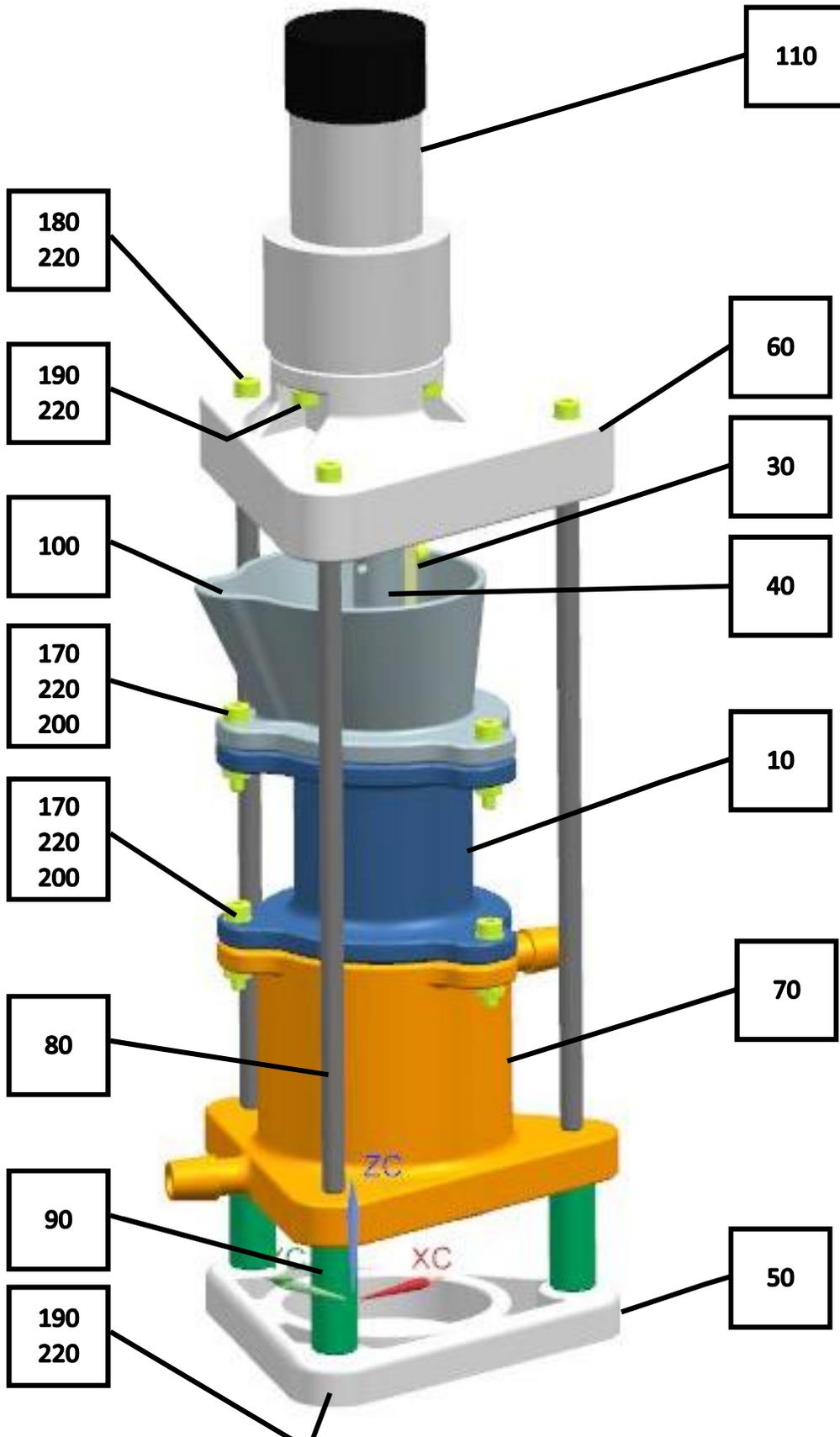


Abbildung 12: CAD Modell des Funktionsdemonstrators Version 1

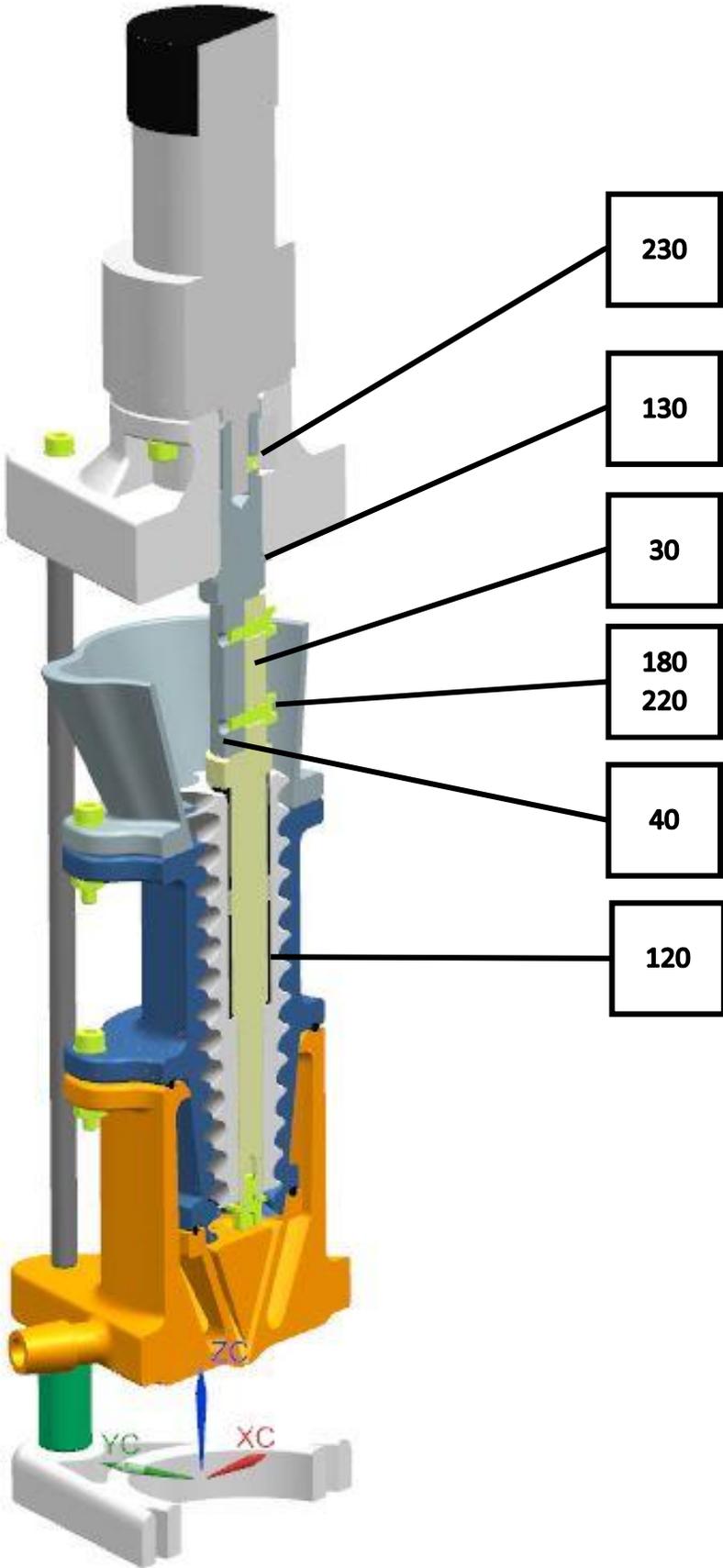


Abbildung 13: CAD Modell des Funktionsdemonstrators Version 1 im Schnitt

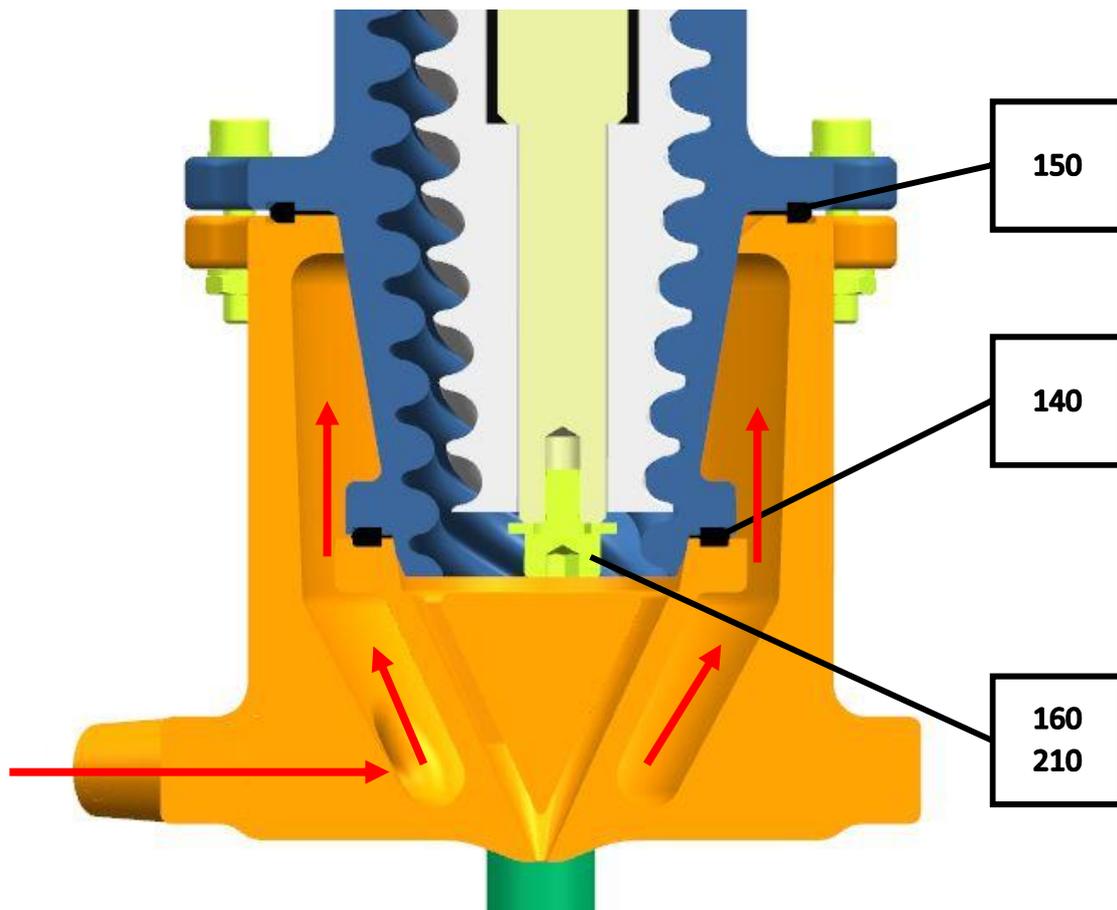


Abbildung 14: Hohlraum des Funktionsdemonstrators Version 1 im Schnitt

Die Abbildung 14 zeigt den Hohlraum, der mit warmem Wasser gefüllt wird. Er wird begrenzt durch die orangefarbige Düse und den blauen Stator. Die O-Ringe, die dazwischen verbaut sind, dienen zur Abdichtung des Hohlraums. Dieser Teil des Funktionsdemonstrators ist so gestaltet, dass das Wasser direkt um den Stator fließt und somit nur eine Wand zwischen Schokolade und Warmwasser ist. Das warme Wasser fließt über den unteren Stutzen in den Hohlraum rein und über den oberen Stutzen wieder raus.

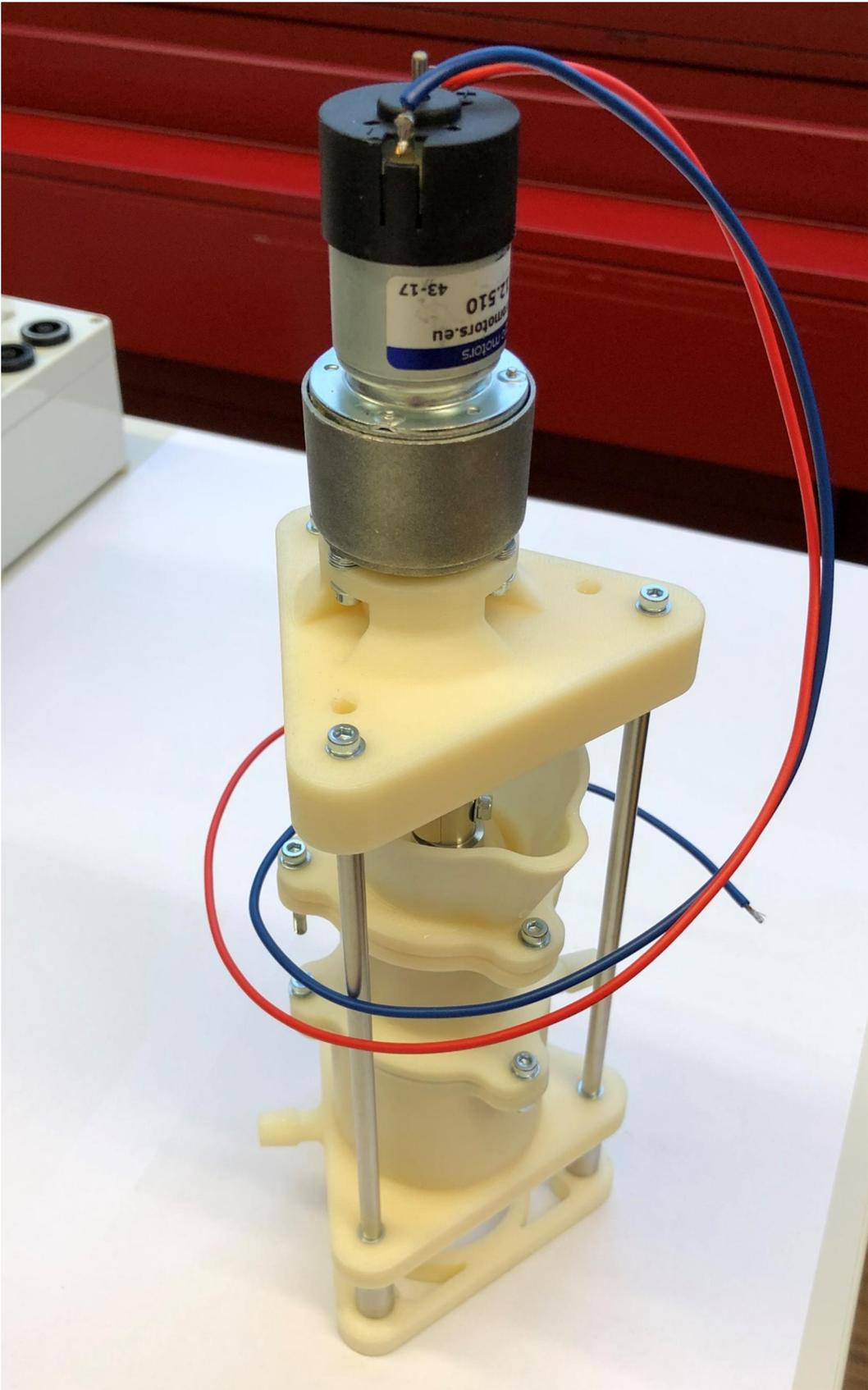


Abbildung 15: Fertiger Funktionsdemonstrator Version 1

## 6.2 Komponentenbeschreibung

In den nächsten Abschnitten wird auf die einzelnen Komponenten eingegangen. Ihre Funktion wird erläutert, sowie die Materialwahl und Herstellung genannt. Es wurde darauf geachtet, dass alle Komponenten mit den Möglichkeiten, die die Hochschule Luzern zu Verfügung hat, hergestellt werden kann. Wie in der Aufgabenstellung beschrieben, beinhaltet dies eine Menge Teile aus dem 3D-Drucker.

### Stator

Funktion	Der Stator ist der stehende Teil der Pumpe. Der untere, konische Teil des Stators, bildet zusammen mit der Düse einen Hohlraum, der mit Wasser durchström wird. Dies soll helfen, die Schokolade zu schmelzen.
Material / Herstellverfahren	ABS / 3D Druck



Abbildung 16: Stator Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

### Rotor

Funktion	Der Rotor bewegt sich auf einer Kreisbahn, die durch die beiden Teile Rotorachse und Motorwelle erzeugt wird. Er kann sich frei um die eigene Körperachse drehen. Zusammen mit dem Stator bildet der Rotor die Pumpe.
Material / Herstellverfahren	ABS / 3D Druck



Abbildung 17: Rotor Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

### Rotorachse

Funktion	Die Rotorachse erzeugt zusammen mit der Motorwelle die Exzentrizität, die die Kreisbahn des Rotors beschreibt. Rotorachse und Rotor drehen frei zueinander.
Material / Herstellverfahren	Rostfreier Stahl 1.4301 / Drehen und Fräsen

### Motorwelle

Funktion	Zusammen mit der Rotorachse erzeugt die Motorwelle die Exzentrizität. Sie überträgt zudem die Bewegung vom Getriebemotor an die Rotorachse.
Material / Herstellverfahren	Rostfreier Stahl 1.4301 / Drehen und Fräsen



Abbildung 18: CAD Modelle von Rotorachse (links) und Motorwelle (rechts)

### Sockel

Funktion	Der Sockel trägt den Funktionsdemonstrator und dient als Standfläche.
Material / Herstellverfahren	ABS / 3D Druck

### Lagerplatte

Funktion	In der Lagerplatte wird die Motorwelle gelagert und der Getriebemotor fixiert.
Material / Herstellverfahren	ABS / 3D Druck



Abbildung 19: CAD Modelle von Sockel (links) und Lagerplatte (rechts)

## Düse

Funktion	Die Düse stellt mit dem Stator den Hohlraum für das warme Wasser, dass die Schokolade aufschmelzen soll. Dazu verfügt sie über Stütze, an denen die Schläuche vom Wasserbad angeschlossen werden können. Die flüssige Schokolade fließt von der Pumpe in die Düse und wird dann ausgedrückt.
Material / Herstellverfahren	ABS / 3D Druck

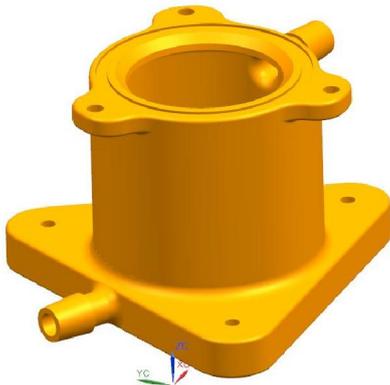


Abbildung 20: Düse Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

## Stangen

Funktion	Die Stangen verbinden die Düse mit der Lagerplatte und definieren ihren Abstand. Dadurch sollen auch Rotor und Stator zueinander ausgerichtet sein.
Material / Herstellverfahren	1.4301 / Drehen

## Distanzbolzen

Funktion	Die Distanzbolzen dienen lediglich dazu, den Abstand zwischen Düse und Sockel, respektive dem Boden, auf dem der Funktionsdemonstrator steht, zu definieren.
Material / Herstellverfahren	1.4301 / Drehen



Abbildung 21: CAD Model von Stange (links) und Distanzbolzen (rechts)



Abbildung 22: Drehteile aus Stahl

## Trichter

Funktion

Der Trichter wird auf den Stator geschraubt und ist das Reservoir für das Schokoladenpulver. Durch seine Form wird das Einfüllen des Pulvers erleichtert.

Material / Herstellverfahren

ABS / 3D Druck

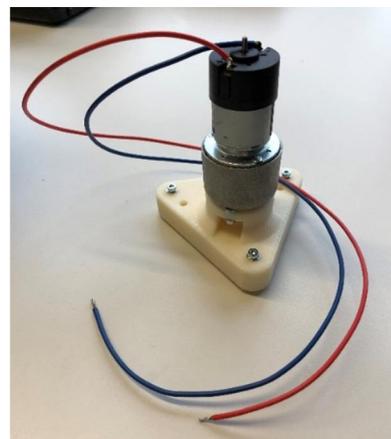


Abbildung 23: CAD Model vom Trichter (links) und Getriebemotor mit Lagerplatte (rechts)

### Getriebemotor

**Funktion** Angeschlossen an eine Spannungsquelle treibt der Motor den Funktionsdemonstrator an.

**Technische Daten**

- Nennspannung: 12V
- Untersetzung: 1:512
- Drehmoment: 1Nm
- Leerlaufdrehzahl:  $12\text{min}^{-1}$
- Lastdrehzahl (maximale Last):  $10.5\text{min}^{-1}$
- Leerlaufstrom:  $<140\text{mA}$
- Laststrom (maximale Last):  $300\text{mA}$

### Wasserbad

**Funktion** Das Wasserbad stellt das warme Wasser zur Verfügung, mit dessen Hilfe das Schmelzen der Schokolade stattfinden soll. Im Wasserbad kann die Temperatur des Wassers geregelt werden. Damit das Wasser zirkuliert ist eine Pumpe im Wasserbad eingebaut.

**Technische Daten**

- Wassertemperatur:  $25^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$
- Leistung: 1.5kW
- Pumpendruck: 300mbar
- Volumenstrom:  $12.5\text{l}/\text{min}$
- Badvolumen: 5l

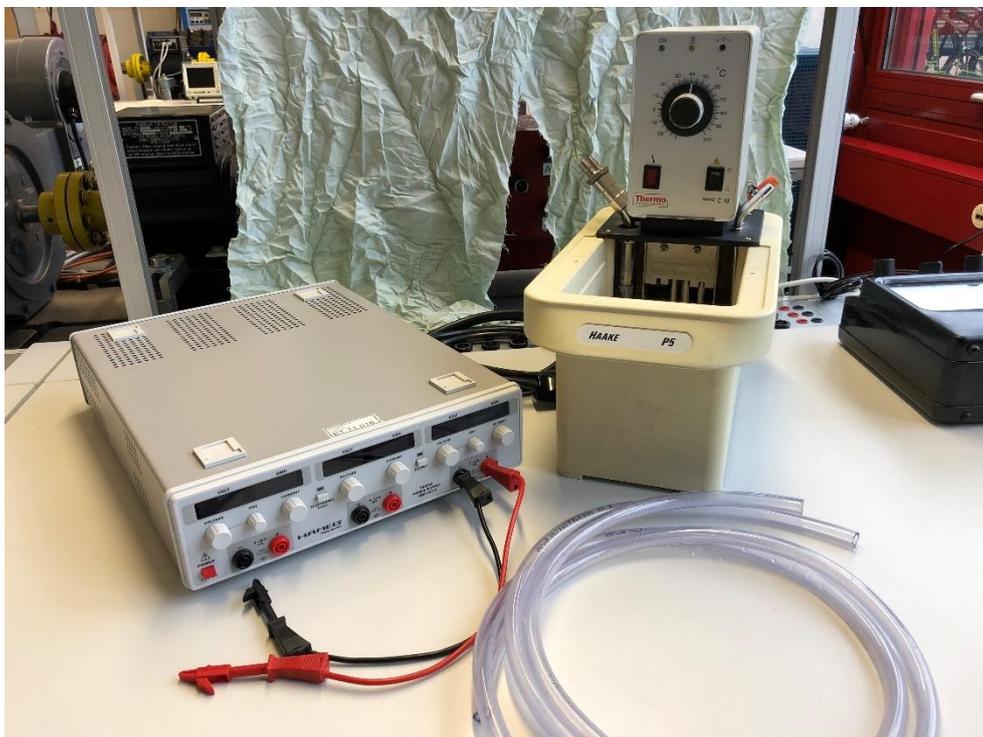


Abbildung 24: Peripheriegeräte

## 6.3 Funktionsbeschreibung

### 6.3.1 Vom Motor zur Pumpe

Da die Achse des Rotors zu derjenigen des Stators versetzt ist, und die Statorachse mit der des Motors fluchtet, muss ein Versatz erzeugt werden. Dadurch, dass die ebenen Flächen der Motorwelle und der Rotorachse ihre Körperachse nicht schneiden, entsteht ein Versatz zwischen diesen. Das hat zur Folge, dass die Motorwelle sich um ihre Körperachse dreht, und die Rotorachse eine Kreisbewegung um ebenfalls diese Achse durchläuft. Der Rotor kann frei um die Rotorachse drehen. Diese Drehung wird durch die Geometrie von Rotor und Stator erzeugt.

Im Prinzip muss eine der beiden Achsen angetrieben werden, während um die andere eine freie Rotation möglich sein muss. Um die Herstellung und Montage einfach zu halten, entschied man sich, die beschriebene Variante umzusetzen und die Achse der Motorwelle anzutreiben.

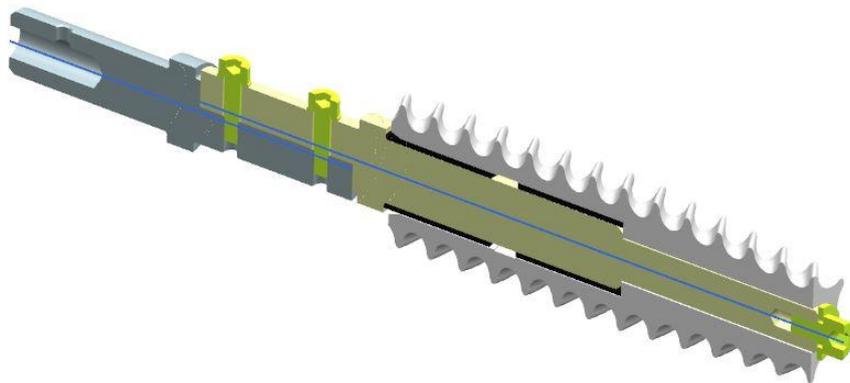


Abbildung 25: CAD Model der rotierenden Teile im Schnitt



Abbildung 26: Rotierende Teile

### 6.3.2 Vom Pulver zur flüssigen Schokolade

Die ideale Funktionsweise lässt sich in drei Schritte unterteilen:

- Schokoladenpulver fördern (gelber Bereich)
- Schokoladenpulver verdichten und aufschmelzen (grüner Bereich)
- Schokolade ausdrücken (blauer Bereich)

Die Schokolade wird als Pulver in den Trichter gefüllt. Durch die Pumpe, bestehend aus Rotor und Stator, wird das Pulver in einem ersten Abschnitt gefördert.

Nach diesem ersten, fördernden Abschnitt wird das Pulver verdichtet, indem sich der Querschnitt der Pumpe verringert. In diesem Abschnitt der Pumpe wird dann auch von aussen Wärme an die Schokolade zugeführt. Durch den Hohlraum, der von Stator und Düse erzeugt wird, fließt warmer Wasser. Das Wasser wird vom Wasserbad bereitgestellt und die Temperatur kann direkt im Wasserbad geregelt werden. Die Pumpe, die das Wasser fördert, ist im Wasserbad integriert.

Wenn die Schokolade geschmolzen ist, wird sie über ein kleines Loch ausgedrückt. Die Pumpe erzeugt dazu den nötigen Druck.

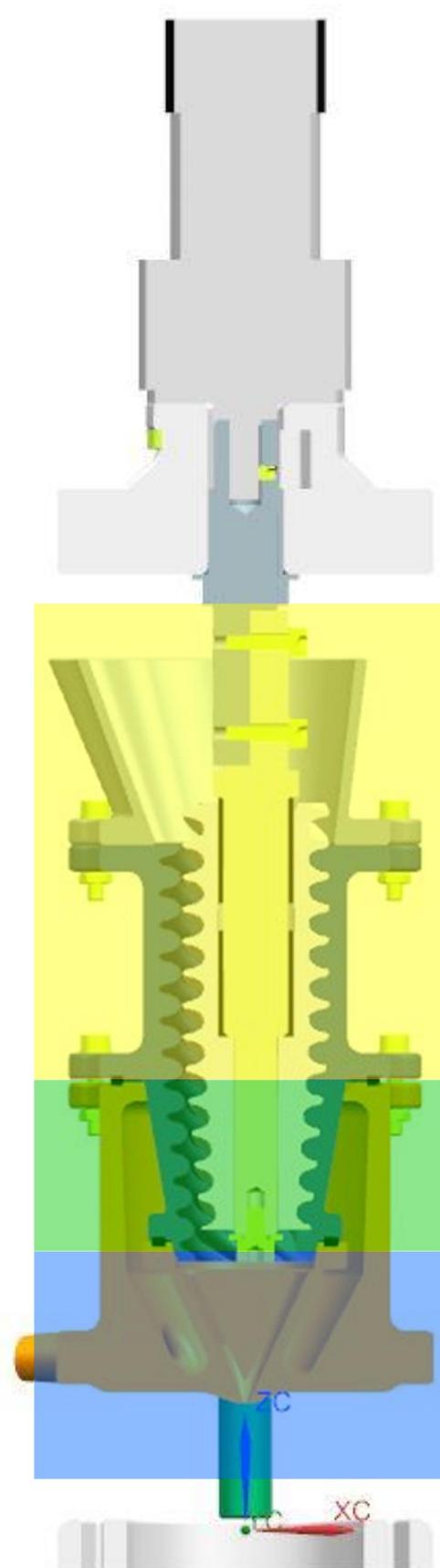


Abbildung 27: Die drei Stufen der Schokoladenverarbeitung

## 6.4 Tests und Ergebnisse

### 6.4.1 Vorgehen und Ziele

Nach der Montage soll die Spannungsquelle angeschlossen werden und der Rotor erstmals angetrieben im Rotor taumeln. Dies geschieht erstmal ohne Schokolade.

Als nächstes wird der Hohlraum auf seine Dichtheit getestet. Dies geschieht, indem an beiden Stutzen der Düse ein Schlauch angeschlossen und anschliessend Wasser durchgepumpt wird.

Sollten die ersten beiden Schritte ohne Probleme durchgeführt werden können, kann das Schokoladenpulver benutzt werden. Es soll ersichtlich werden, ob die Pumpe das Pulver fördern kann. Es ergaben sich also folgende Ziele für den ersten Versuch:

- Inbetriebnahme des Funktionsdemonstrators im Trockenbetrieb. Das heisst, ohne Schokolade und ohne Wasserkreislauf.
- Im Trockenbetrieb soll das Taumeln des Rotors beobachtet werden und Problem- sowie Schwachstellen sollen ausfindig gemacht werden.
- Durch erstmaliges Einfüllen von Schokoladenpulver soll eine Aussage gemacht werden können, ob die Pumpe aus dem 3D-Drucker fähig ist, das Pulver zu fördern.

### 6.4.2 Beobachtungen und Erkenntnisse

Das Ergebnis der ersten Versuche war nur wenig erfolgreich. Im Trockenlauf taumelte der Rotor kein Bisschen im Stator. Grund dafür war, dass das Gerüst rund um die Pumpe nicht ausreichend steif gestaltet war. Denn nicht der Rotor taumelte im Stator, sondern die Lagerplatte samt Motor drehte sich um die Rotorachse, während der Rotor an Ort und Stelle klemmte. Die Videos, sie befinden sich im Anhang, zeigen dies sehr deutlich. Um dies zu verhindern muss eine bessere Verbindung zwischen Lagerplatte und Düse konstruiert werden.

Auch der Hohlraum entsprach nicht den Anforderungen. Die Düse wies einige undichte Stellen auf. Diese waren vor allem da, wo nur dünne Wände sind. Die undichten Stellen sind in Abbildung 29 markiert. Die Undichtheiten entstehen dadurch, dass die gedruckten Teile nicht aus Vollmaterial bestehen, sondern im Inneren eine Gitterstruktur haben, die Hohlräume generiert. Da auch der Mantel schichtweise aufgebaut wird, kann das Wasser durch die Wände fließen, die von aussen massiv erscheinen.

Aufgrund der erwähnten Mängel wurde auf den Einsatz von Schokolade vorerst verzichtet.

Auch aus montagetechnischer Hinsicht gab es noch einiges zu verbessern. So passte der untere O-Ring aufgrund eines Rechenfehlers beim Konstruieren nicht optimal in die vorgesehene Nut. Da er sich durch Quetschen und Drücken trotzdem montieren liess, wurde auf eine Anpassung verzichtet. Auch wegen eines Rechenfehlers, konnte der Motor nicht wunschgemäss montiert werden. Der Motor

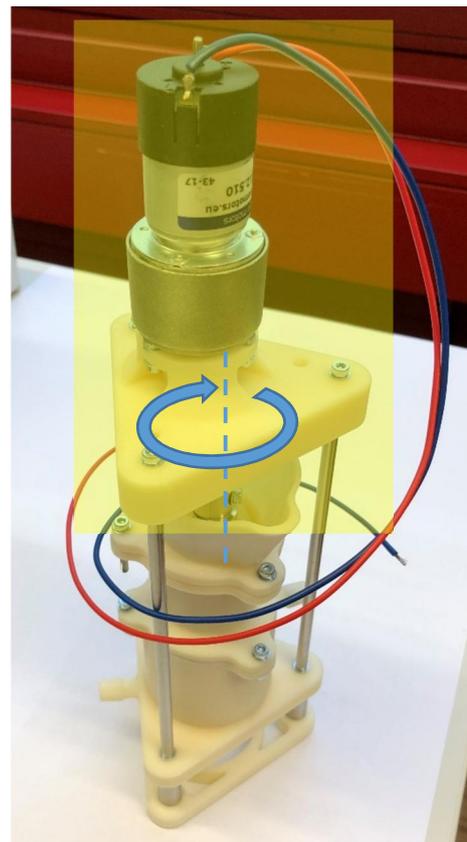


Abbildung 28: Taumelnde Elemente

musste mit Unterlagscheiben an der Lagerplatte festgeschraubt werden, wie es in Abbildung 15 ersichtlich ist. Auch der Zugang für das Werkzeug, mit dem die Schrauben für den Motor angezogen werden, war schlecht.

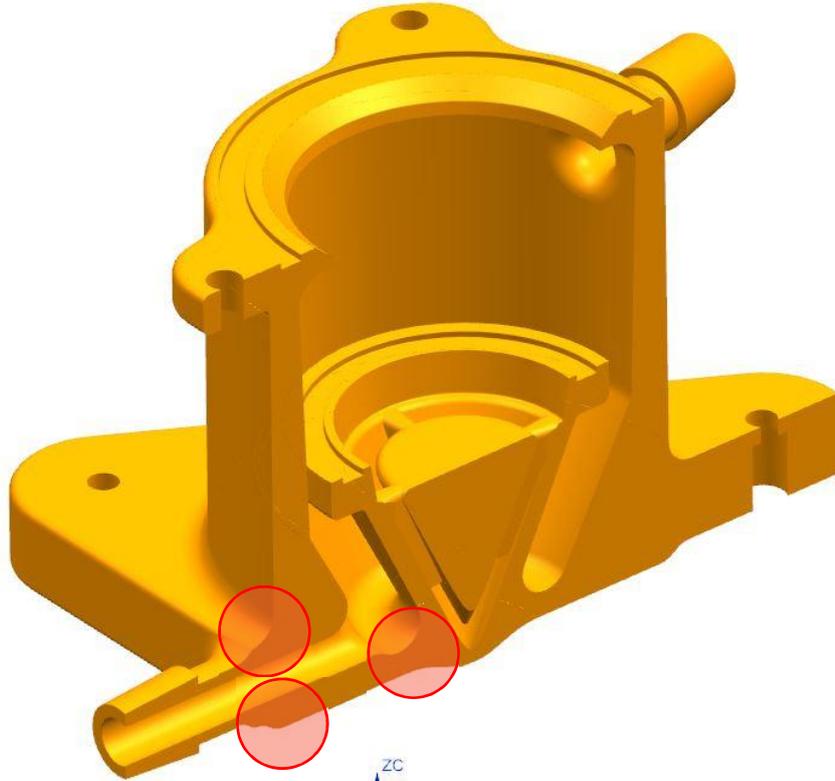


Abbildung 29: Undichte Stellen der Düse

### 6.4.3 Massnahmen

Um trotzdem die Förderung des Pulvers testen zu können, wurden Sofortmassnahmen definiert, die am bestehenden Objekt umgesetzt werden können. Diese beinhalten die Versteifung des Funktionsdemonstrators und sind im Kapitel 6.5 beschrieben.

Massnahmen, die erst bei der Überarbeitung auf die nächste Version umgesetzt wurden, sind folgende:

- Der Widerstand zwischen Rotor und Stator sollte verringert werden. Dies, indem das Spiel s erneut erhöht wurde. Auch eine Anpassung der Steigung wurde umgesetzt.
- Damit die Düse besser abdichtet, musste an den rot markierten Stellen die Wandstärke vergrössert werden.
- Nach Umsetzen der Sofortmassnahmen, wurde die Steifigkeit erhöht. Welche Massnahmen genau getroffen wurden, wird in Kapitel 7.1 erläutert.

### 6.5 Nacharbeit - Sofortmassnahmen

In einem ersten Schritt wurden drei Platten aus MDF gelasert, die an den Seiten des Funktionsdemonstrators angebracht wurden. Die Platten besaßen eine Dicke von sechs Millimetern. Die Düse und die Lagerplatte werden damit zueinander ausgerichtet. Die Platten wurden mit Kabelbinder an den Stangen festgezogen. So sollte das Taumeln der Lagerplatte vermieden werden.

Zwar taumelt die Lagerplatte nicht mehr, jedoch blieb auch nach diesen Nachbesserungen der Erfolg aus. Nach wie vor liess sich der Rotor nicht im Stator bewegen. Die Lagerplatte blieb an Ort und Stelle, jedoch fing nun der Trichter, der Stator und der obere Teil der Düse an zu taumeln.

Deswegen wurden erneut Massnahmen zur Verbesserung der Steifigkeit definiert und umgesetzt.

Um auch den Stator zu fixieren wurden zwei weitere MDF Platten hergestellt. Sie wurden am Stator angeschraubt und mit Stellringen an den Stangen positioniert.

Mit den beschriebenen Massnahmen entstand ein Funktionsdemonstrator wie in Abbildung 30.

Die Steifigkeit konnte deutlich verbessert werden. Der Rotor taumelt schon fast wie gewünscht. An gewissen Stellen jedoch, steht der Rotor wieder still und das Gerüst fängt an, sich zu bewegen. Ist eine gewisse Verformung erreicht, springt der Rotor einen Zahn weiter und das Gerüst kehrt in seine ursprüngliche Position zurück.

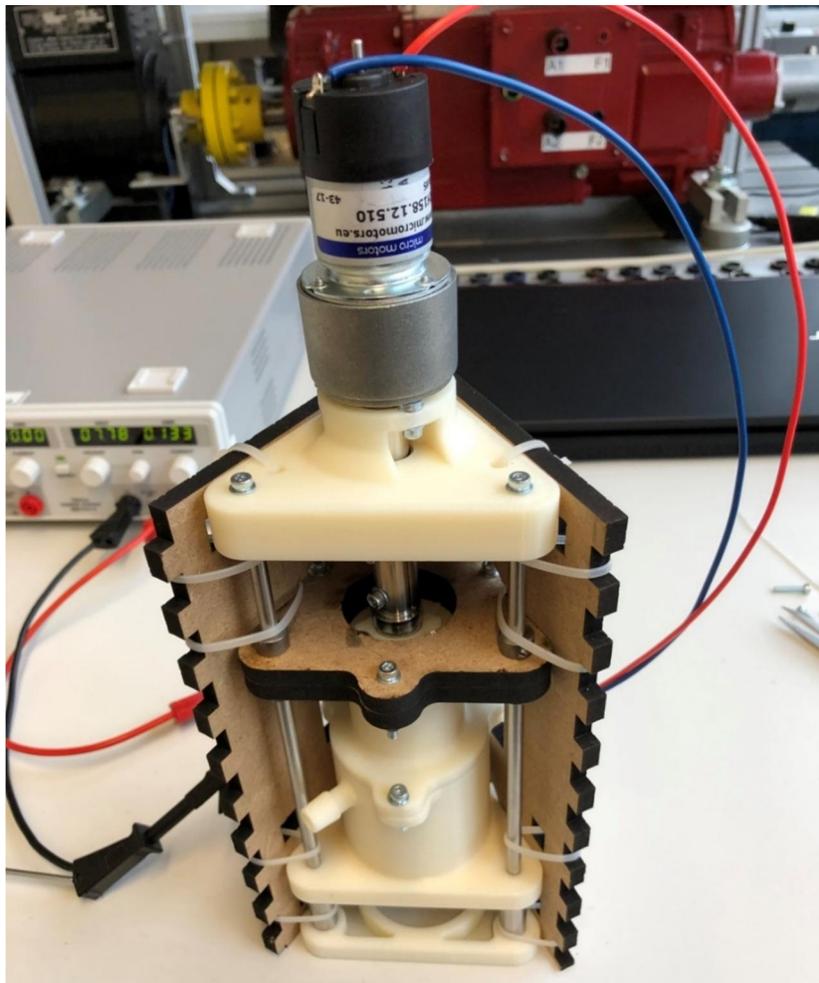


Abbildung 30: Nacharbeit am Funktionsdemonstrator Version 1

Trotz der un stetigen Taumelbewegung, hat man sich dazu entschlossen, erstmals Schokoladenpulver einzufüllen. Der Trichter wurde zwar entfernt, jedoch konnte mit den beiden MDF Platten ein kleiner Einfüllbereich erzeugt werden.

Obwohl der nachbearbeitete Funktionsdemonstrator eher improvisiert aussieht, konnten erste Erfolge mit Schokoladenpulver erzielt werden. Sobald der Rotor in Bewegung versetzt wird, fällt das Schokoladenpulver in die Freiräume und wird somit angesogen. Danach taumelt der Rotor eine Weile

lang sehr sauber. Gleichzeitig ist aber sehr gut zu sehen, wie sich die MDF-Platten verschieben. Also geht immer noch ein Teil der Motorenleistung in Verformung über. Dies passiert wieder so lange, bis der Rotor zum Stehen kommt und der Strom einen gewissen Höchstwert erreicht. Danach hüpft der Rotor und alles springt in seine Ursprungsposition zurück. Die Stromspitzen liegen zwischen 300 und 400mA. Im Trockenlauf lag der Strom bei ungefähr 100mA.

Da man nicht ins Innere der Pumpe sehen kann, wurde der Rotor nach den Versuchen sorgfältig entfernt. Dabei war festzustellen, dass sich in den Gängen des Rotors das Schokoladenpulver ziemlich schön verteilt hat, wie in Abbildung 31 ersichtlich ist. Also konnte man durchaus sagen, dass das Prinzip der Pulverförderung mit einer solchen Pumpe möglich ist.



Abbildung 31: Rotor nach Betrieb mit Schokoladenpulver

Aufgrund dieser ersten Erfolge wurde beschlossen, den ersten Funktionsdemonstrator zu überarbeiten und erneut Komponenten herstellen zu lassen. In diesem Zuge sollten sowohl die funktionellen, wie auch die montagetechnischen Schwachstellen korrigiert werden.

## 7 Funktionsdemonstrator Version 2

Die zweite, überarbeitete Version des Funktionsdemonstrators wurde in zwei Ausführungen hergestellt. Die eine Pumpenkonfiguration hatte die gleiche Steigung wie in der ersten Version, die zweite hatte eine höhere Steigung (Rotor 54 und Stator 63).

	Rotor	Stator
N	6	7
R	14	12
r = e	2	
P	54 (36)	63 (42)
s	0.6	
v	0.7	

Tabelle 5: Konfigurationen Funktionsdemonstrator Version 2

### 7.1 Gerätebeschreibung

Die einzelnen Komponenten sind immer noch die exakt selben, wie in Tabelle 4 festgehalten. Vor allem die Form von Düse, Stator, Trichter und Lagerplatte wurden angepasst, um sie zueinander zu versteifen. Am Innenleben, sprich am Funktionsprinzip der Schokoladenförderung und des Schmelzens wurden keine Veränderungen vorgenommen.

Zur Verbesserung der Steifigkeit wurden Düse, Stator, Trichter und Lagerplatte miteinander verbunden. Dies geschieht über die Zapfen, die ineinandergreifen und so die gegenseitige Verdrehung verhindern. Die Stange hat somit nur noch die Funktion, diese vier Teile zu klemmen.

Da während des Herstellprozesses Probleme mit dem ABS 3D-Drucker auftraten, kam es zu Verzögerungen und Fehler in der Produktion. Der Stator mit der Steigung 42mm wies zu viel Stützmaterial in seinem Profil auf, das nicht sauber entfernt wurde. Es wurde darauf verzichtet, dieses Teil erneut herzustellen. Darum wurde nur die Pumpenkonfiguration mit der grösseren Steigung verwendet und getestet.

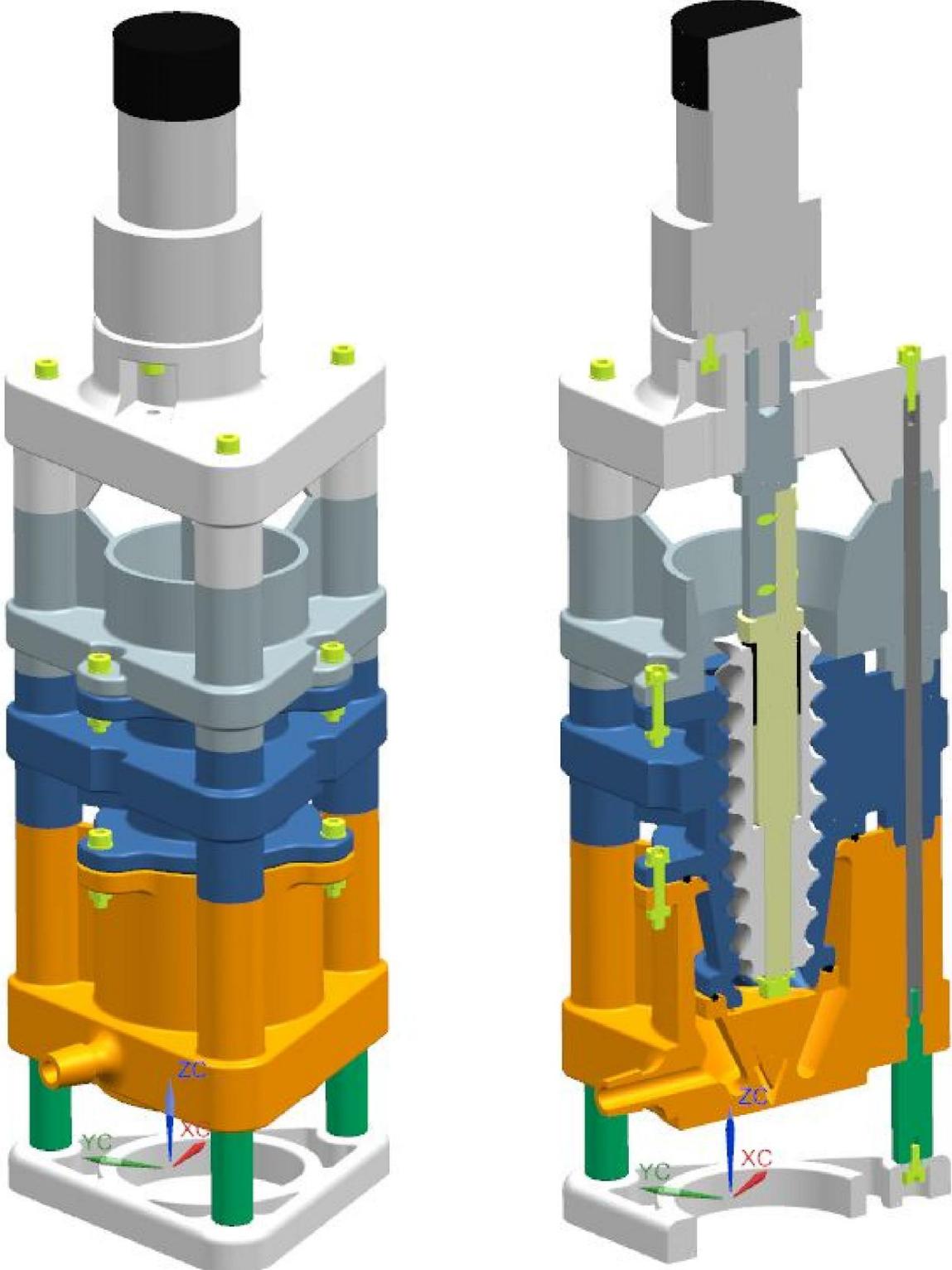


Abbildung 32: CAD Model des Funktionsdemonstrators Version 2 (links) und im Schnitt (rechts)

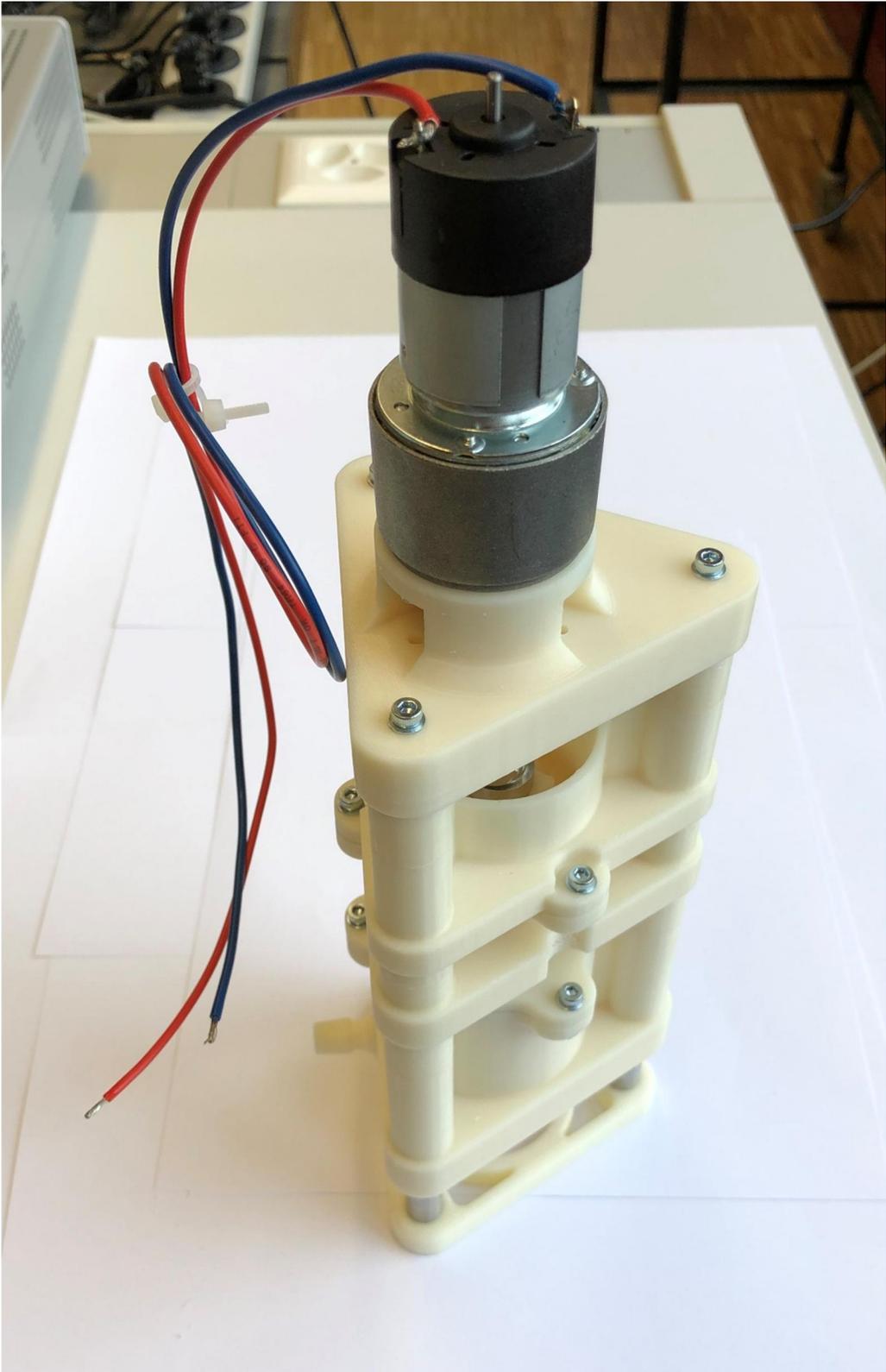


Abbildung 33: Funktionsdemonstrator Version 2

## 7.2 Überarbeitete Komponenten

### Stator

**Änderung** Der Stator wurde dahingehend angepasst, dass die Steifigkeit des ganzen Funktionsdemonstrators erhöht wird. Ausserdem wurde die Steigung angepasst und auf 63mm erhöht.

**Material / Herstellverfahren** ABS / 3D-Druck

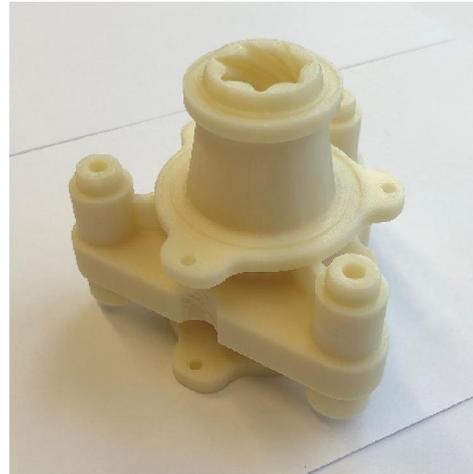


Abbildung 34: Stator Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

### Rotor

**Änderung** Die Steigung wurde auf 54mm vergrössert und das Spiel wurde auf 0.6mm angepasst.

**Material / Herstellverfahren**

ABS / 3D-Druck

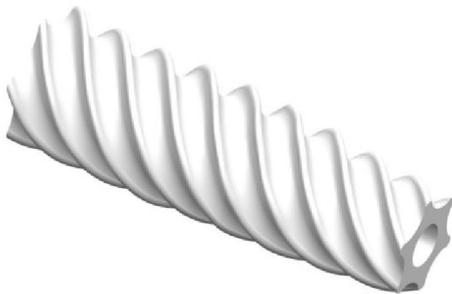


Abbildung 35: Rotor Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

### Lagerplatte

**Änderung** Die Schnittstelle zum Getriebemotor wurde so angepasst, dass kein Spalt mehr entsteht, der mit Unterlagscheiben gefüllt werden musste.

**Material / Herstellverfahren**

ABS / 3D-Druck

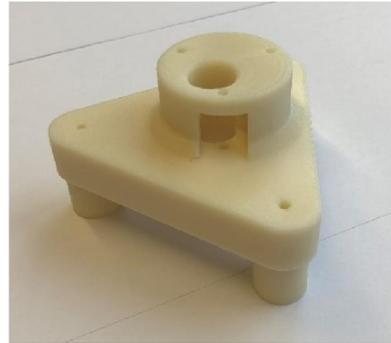
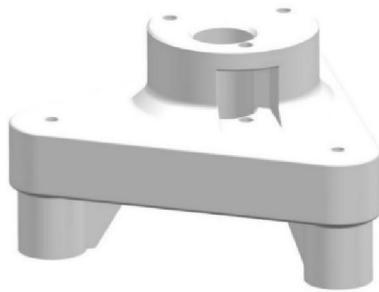


Abbildung 36: Lagerplatte Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

## Düse

Änderungen

Die Düse ist nun besser zum Stator positioniert. An den undichten Stellen wurde die Wandstärke erhöht.

Material / Herstellverfahren

ABS / 3D-Druck

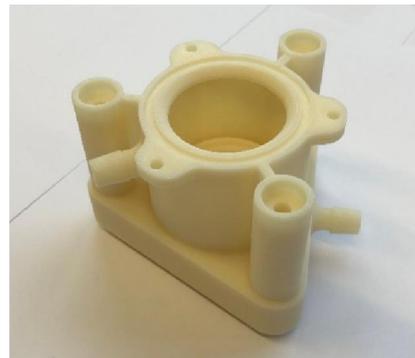


Abbildung 37: Düse Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

## Trichter

Änderung

Der Trichter ist sowohl mit der Lagerplatte, wie auch dem Stator verbunden.

Material / Herstellverfahren

ABS / 3D-Druck

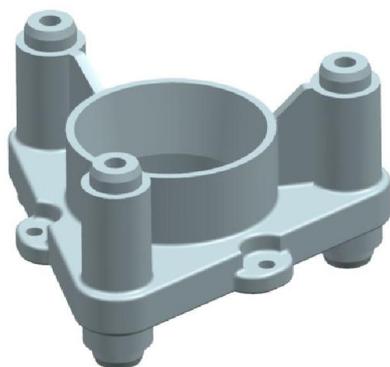


Abbildung 38: Trichter Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

## 7.3 Tests und Ergebnisse

### 7.3.1 Vorgehen und Ziele

Grundsätzlich wurden hier dieselben Ziele verfolgt, wie bei der ersten Version des Funktionsdemonstrators. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob die Steifigkeit nun ausreichend ist. Da nur eine Pumpenkonfiguration getestet werden konnte, war es auch nicht möglich, zu untersuchen, welchen Einfluss die veränderte Steigung effektiv hat.

### 7.3.2 Beobachtungen und Erkenntnisse

Im Trockenlauf lief der Rotor zunächst einigermaßen konstant bei einem Strom von ungefähr 100mA. Bei zunehmender Betriebsdauer kam es jedoch wieder zu Stromspitzen bis zu 600mA. Es war deutlich zu hören, dass sich die gedruckten Teile beginnen, zu verformen. Es begann zu knistern, als würden sich die einzelnen Schichten der Teile voneinander lösen. An den einzelnen Zähnen des Rotors war zum Teil zu erkennen, dass sich das Material begann abzuschälen.

Auf der Abbildung 39 ist zu erkennen, dass sich die Teile immer noch zueinander verschieben können. Auf ihnen sind die Momente vor, und nach einer Stromspitze festgehalten.

Noch besser zu erkennen, ist dieses Verhalten auf den Videos im elektronischen Anhang. Die Problemzone war die Lagerplatte, die sich verformt und zum Trichter verschiebt. Die Lagerplatte verformt sich so, dass die Motorachse schräg steht, wie die blaue Linie auf Abbildung 39 zeigen soll.

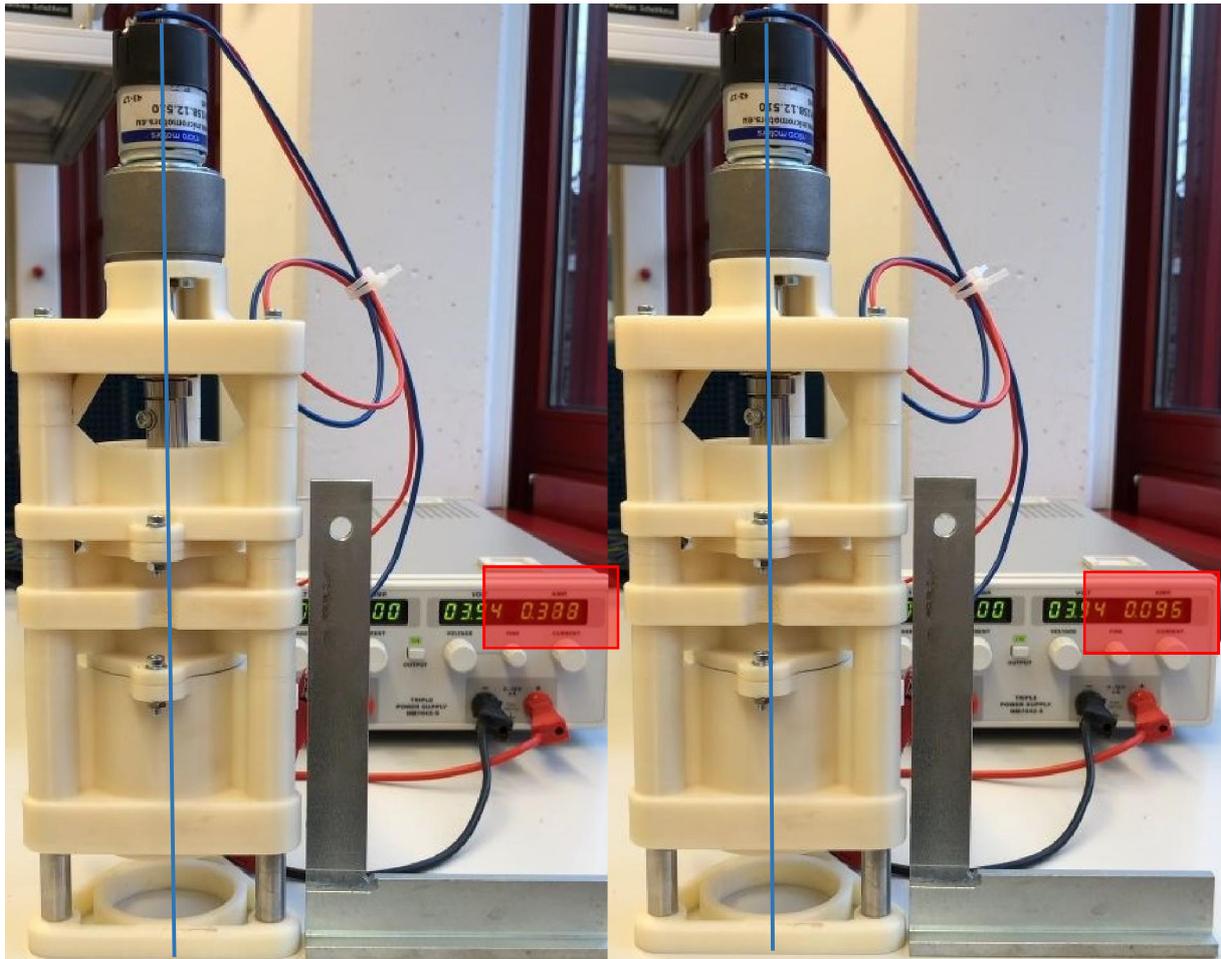


Abbildung 39: Momentaufnahmen vor und nach einer Stromspitze

Obwohl die Steifigkeit durch die Überarbeitung um einiges verbessert werden konnte, ergaben sich lokale Schwachstellen. Eine weitere Ursache für den immer noch zu grossen Widerstand der Pumpe, wurde im verdichtenden Abschnitt ausgemacht. Da man nicht ins Innere der Pumpe sehen konnte, wurde vermutet, dass der konische Teil des Rotors in axialer Richtung nicht ausreichend positioniert ist. Im zylindrischen Teil der Pumpe ist dies kein Problem, da der Querschnitt konstant bleibt. Wenn der konische Teil falsch positioniert ist, kann es sein, dass der Rotorquerschnitt zu gross ist und somit eine Kollision auftritt. Da sich diese Stelle am weitesten weg vom Punkt der Momenteinleitung auf die rotativen Teile befindet, ist es sinnvoll, dieses Problem zu beheben. Aus diesem Grund wurde der Rotor maschinell nachbearbeitet, wie es im kommenden Kapitel beschrieben ist.

Der Hohlraum zwischen Düse und Stator blieb trotz angepasster Wandstärken der Düse undicht. Deshalb wurde die Düse mit einem Epoxidharz laminiert. Nach dem Auftragen des flüssigen Harzes, schloss man noch die Vakuumpumpe an, damit das Harz in die Strukturen der Düse eingesogen wird und so noch besser abdichtet. Nach dem Aushärten des Harzes hatte die Düse eine dünne Beschichtung. Durch diese Massnahme wurde die Dichtheit enorm verbessert. Der mit Wasser gefüllte Hohlraum ist jedoch nur dann dicht, wenn das Wasser nicht zu schnell fliesst. Schliesst man das Wasserbad an, sind wieder einige undichte Stellen auszumachen. Die Pumpe des Wasserbades erzeugt einen zu grossen Druck, den man leider nicht einstellen kann.

Nach dem Betrieb gestaltet sich die Reinigung sehr aufwändig. Das Pulver wird durch die Pumpe,

alleine schon in dem Abschnitt mit konstantem Querschnitt, stark zusammengedrückt und bleibt im Profil des Stators kleben. Es wird so stark gepresst, dass man es nur mit Werkzeug aus den Gängen des Stators kratzen kann. Aufgrund dieser Tatsache stellt sich die Frage, wie fest und ob ein verdichtender Abschnitt notwendig ist.

#### 7.4 Nacharbeit

Auf der Drehbank wurde dem Rotor das Profil im verdichtenden Abschnitt entfernt. Somit blieb nur ein mehr oder weniger glatter Zylinder übrig.

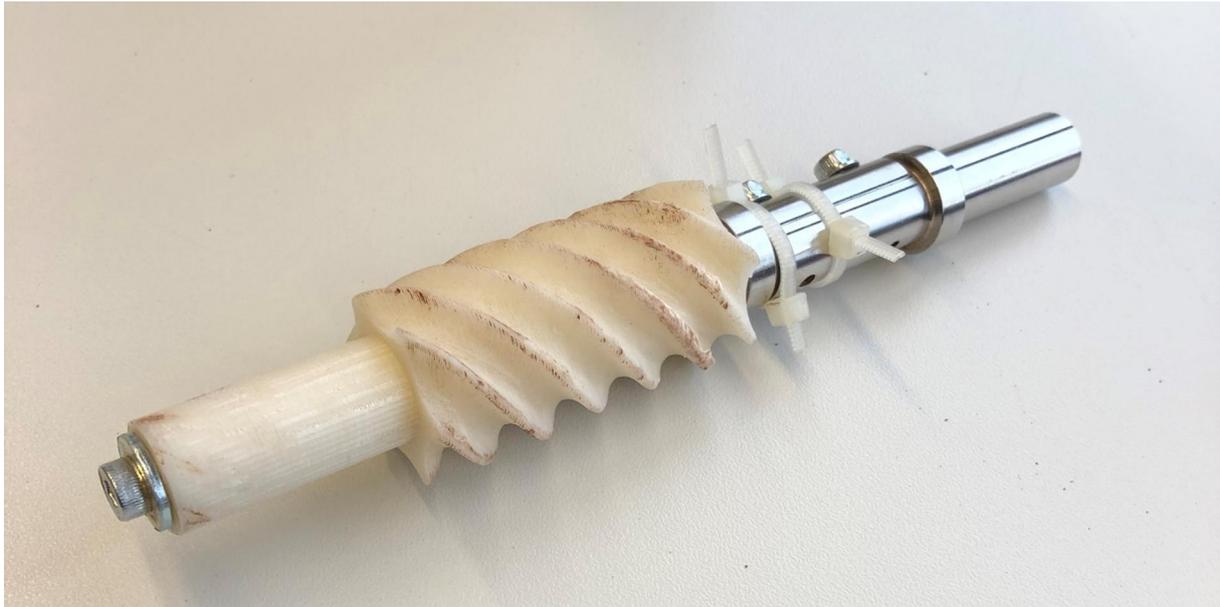


Abbildung 40: Nacharbeit an den rotierenden Teilen

Mit dem bearbeiteten Rotor liessen sich im Trockenlauf sehr gute Ergebnisse erzielen. Der Strom während des Betriebs betrug annähernd konstant 100mA und es waren keine Verformungen am Funktionsdemonstrator festzustellen.

Auch im Betrieb mit dem Schokoladenpulver konnte eine konstante Taumelbewegung erreicht werden. Jedoch nur mit der Erkenntnis, dass das Schokoladenpulver konstant nachgeschoben werden muss. Es dürfen keine grossen Lücken im Nachschub entstehen. Ansonsten war zu beobachten, dass durch die unsymmetrische Last die Taumelbewegung gestört wurde und wieder leichte Hüpfen und Stromspitzen auftraten. Aus diesem Grund wurden auch die Kabelbinder, wie in Abbildung 40 ersichtlich, um die beiden Stahlteile befestigt. Sie erzeugten während des Betriebs ein Rühren im Schokoladenpulver, wodurch dieses fast immer gleichmässig im Trichter verteilt wurde. Die Abbildung 41 zeigt, dass das Pulver bis zum Ende des zylindrischen Abschnitts sauber gefördert wurde. Anschliessend wurde der Pulvernachschub inkonstant und es entstanden grosse Lücken in den Gängen der Pumpe.



*Abbildung 41: Nachgearbeiteter Rotor nach dem Betrieb mit Schokoladenpulver*

Durch das Beseitigen der offenbar grössten Problemzone konnte ein stetiges Fördern des Schokoladenpulvers erreicht werden. Wenn der grösste Widerstand am unteren Ende des Rotors auftritt, war wohl in den vergangenen Versuchen eine Schrägstellung des Rotors aufgetreten. Denn die Schaftlänge des Motors, wo das Drehmoment an die übrigen rotierenden Teile abgegeben wird, ist mit nur 14 Millimetern sehr kurz. Das untere Ende des Rotors ist rund 150 Millimeter von der Momenteinleitung entfernt. Ein Winkelfehler in der Pumpe hat einen Einfluss auf die Kraft, die gebraucht wird, um den Rotor zu bewegen. Dies war von Hand schon gut spürbar. Auf diesen Erkenntnissen liess sich eine weitere Version aufbauen, in welcher das Innenleben, sprich die Geometrie der Pumpenkomponenten, erneut angepasst werden konnte. Im Verlaufe der Überarbeitung auf die Version 3 ergab sich zudem eine weitere Fertigungsmöglichkeit an der Hochschule Luzern. Es war nun auch möglich, Teile auf einem SLA-3D-Drucker herzustellen. Mit dieser Option konnte zusätzlich eine weitere Werkstoffpaarung getestet werden.

## 8 Funktionsdemonstrator Version 3

Durch die genannte Möglichkeit, mit dem SLA Drucker zu arbeiten, wurden Rotor und Stator damit hergestellt. Somit konnten vier Kombinationen getestet werden:

- Rotor ABS – Stator ABS (bereits in Version 2 getestet)
- Rotor SLA – Stator ABS
- Rotor ABS – Stator SLA
- Rotor SLA – Stator SLA

Der verdichtende Abschnitt wurde entfernt. Stattdessen blieb eine zylindrische Form ohne Profil. Dies vor allem, um den Zwischenraum zwischen Rotor und Stator nicht zu gross werden zu lassen.

Die restliche Geometrie wurde nicht mehr angepasst.

	Rotor	Stator
N	6	7
R	14	12
r = e	2	
P	54	63
s	0.6	
v	-	

Tabelle 6: Konfigurationen Funktionsdemonstrator Version 3

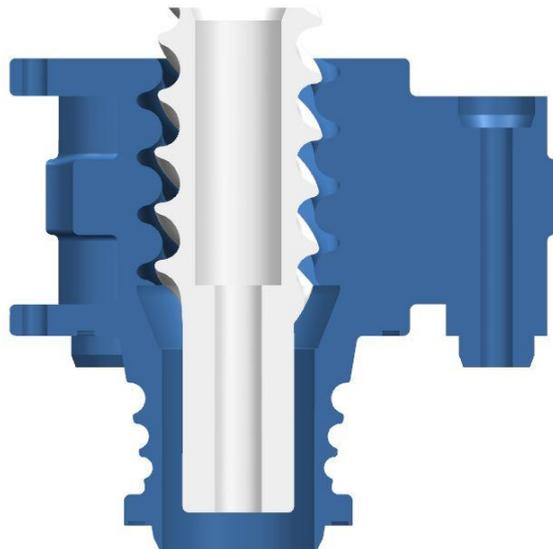


Abbildung 42: Angepasste Pumpe ohne verdichtenden Abschnitt

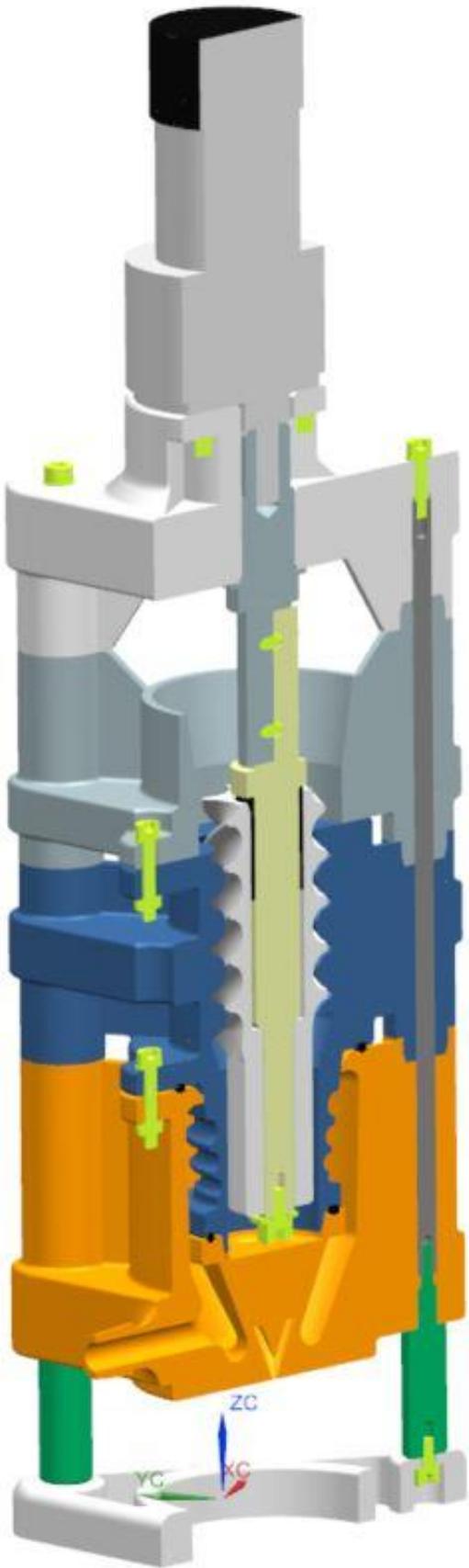


Abbildung 43: CAD Model des Funktionsdemonstrators Version 3 im Schnitt

## 8.1 Geänderte Komponenten

### Stator

#### Änderung

Der verdichtende Abschnitt wurde entfernt und durch einen profillosen zylindrischen Abschnitt ersetzt. Dadurch wurde die Wand zum Hohlraum viel dicker, weshalb an der Aussenseite nun Rillen sind. Dies verringert die Wandstärke und vergrößert die Fläche für den Wärmeübertrag vom Wasser an die Schokolade.

Hergestellt wurde das Teil mit dem SLA-Drucker. Auf eine erneute Herstellung mit ABS wurde verzichtet, da der alte Stator mit dem neuen Rotor kompatibel ist.

#### Material / Herstellverfahren

SLA / 3D-Druck



Abbildung 44: Stator Version 3 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

### Rotor

#### Änderung

Der Rotor wurde an die Nacharbeit aus der Version 2 angepasst und mit dem SLA-Drucker gefertigt. Wie auch beim Stator wurde kein neuer Rotor aus ABS hergestellt.

#### Material / Herstellverfahren

SLA / 3D-Druck

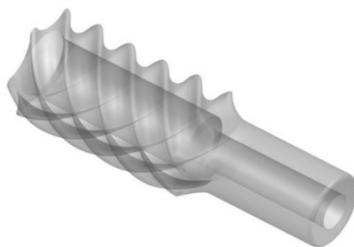


Abbildung 45: Rotor Version 3 als CAD Model (links) und in echt (rechts)

## 8.2 Tests und Ergebnisse

### 8.2.1 Vorgehen und Ziele

Das Ziel war es nun, die diversen Werkstoffpaarungen auszuprobieren und die beste ausfindig zu machen. Die neu hergestellten SLA-Teile besitzen eine qualitativ bessere Oberfläche. Die Rillenstruktur, die bei den ABS-Werkstücken gut erkennbar ist, erkennt man kaum. Durch die Transparenz des Stators war es erstmals möglich, einen Blick in das Innenleben der Pumpe zu bekommen, während sie in Betrieb ist.

### 8.2.2 Beobachtungen und Erkenntnisse

Durch die feine Oberflächenbeschaffenheit der SLA-Teile fügen sich diese optimal ineinander. Der Rotor wird losgelassen und er fütgt sich von alleine in den Stator ein. Dies war bei den ersten Varianten aus ABS noch nicht so, da Rotor und Stator oftmals ineinander verkanteten.

So waren auch im Trockenlauf gute Ergebnisse erkennbar. Die Pumpe, mit beiden Teilen aus SLA, taumelte gleichmässig und ohne sehr hohe Stromspitzen. Nur ab und zu waren Höchstwerte von 160mA festzustellen.

Sobald allerdings das Schokoladenpulver in Spiel kam, verschlechterte sich die Performance schlagartig. Die Stromspitzen erreichten Werte über 400mA. In diesen Momenten stand der Rotor komplett still. Man sah durch den Stator hindurch, dass sich das Pulver kaum fortbewegte. Die Pumpe aus zwei SLA Komponenten schien trotz guter Ergebnisse im Trockenlauf nicht geeignet, um sie mit Schokoladenpulver zu betreiben.

Mit der Kombination aus SLA und ABS waren die Ergebnisse nur geringfügig besser. Auch hier zeichneten sich deutliche Stromspitzen, zum Teil waren diese über 300mA, ab. Es waren grosse Hüpfen des Rotors erkennbar. Diese Beobachtungen trafen sowohl dann zu, wenn der Rotor aus ABS und der Stator SLA war, wie auch umgekehrt.

Überraschenderweise waren also der Einsatz der ABS Pumpe am erfolgreichsten. Mit ihr liess sich eine ziemlich konstante Taumelbewegung und Förderung des Pulvers erreichen.

## 9 Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen

Aus den beschriebenen Beobachtungen, konnte neues Wissen in Erfahrung gebracht werden, dass bei einem allfälligen Weiterführen dieses Projektes von Hilfe sein wird. Nebst diesem neu gewonnenen Wissen, sind in den nächsten Abschnitten auch noch ein Ausblick auf das mögliche weitere Vorgehen festgehalten. Ausserdem findet sich eine weitere Idee, wie sich der Antrieb der Pumpe verbessern liesse.

### 9.1 Erkenntnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in drei Kategorien aufteilen: Erkenntnisse, die das mechanische Verhalten des Funktionsdemonstrators beschreiben, Erkenntnisse über Werkstoffe und Werkstoffkombinationen und Erkenntnisse über gewisse Aspekte während des Betriebs mit Schokoladenpulver.

#### 9.1.1 Mechanik

Aus mechanischer Sicht ist es wichtig, dass ein Gerüst vorhanden ist, dass die Belastung aufnehmen kann, die durch den Widerstand der Pumpe auftritt. Sollte an der Antriebsmethode aus Kapitel 6.3.1 festgehalten werden, muss die Lagerung des Getriebemotors und der rotierenden Teile ausreichend steif sein.

Ob sich dieses Antriebskonzept jedoch eignet, bleibt zu hinterfragen. Die Länge der Lagerstelle und der Kraftübertragung sind im Verhältnis zu der Länge, über die ein Widerstand in der Rotation entsteht, sehr kurz. Eine weitere Lagerstelle am unteren Ende des Rotors würde Sinn machen. Die Frage nach einem konischen Pumpenabschnitt, in welchem das Pulver verdichtet werden könnte, stellte sich bereits nach den Versuchen mit der zweiten Version des Funktionsdemonstrators. Da an dieser Stelle eine genaue Positionierung in Axialrichtung nötig ist, könnte man die beiden Abschnitte voneinander trennen. So oder so ist die Positionierung ein wichtiger Faktor, der bei einer Neukonstruktion beachtet werden muss.

Eine gleichmässige Kraftübertragung an die rotierenden Teile wäre ideal und könnte möglicherweise mit dem Modell aus Kapitel 9.2.1 erreicht werden.

#### 9.1.2 Werkstoffe

Im Trockenlauf haben sich die SLA Teile besser verhalten als diejenigen aus ABS. Der Unterschied in Sachen Oberflächenbeschaffenheit war zwar von blossen Auge gut erkennbar, jedoch versagten die SLA Teile im Betrieb mit Schokoladenpulver. Dies auch, weil sie zäher sind und wohl auch einen Teil des zugeführten Drehmomentes der elastischen Verformung zum Opfer fiel.

Die Oberflächen bieten auch einen zu guten Haftgrund für das Schokoladenpulver. Nach dem Betrieb war die Reinigung sehr aufwändig. Während des Betriebs steigerte dies den Widerstand erheblich und verstopfte ab und zu die Pumpe. Um eine bessere Förderung möglich zu machen, wären Oberflächen mit einer Anti-Haft-Beschichtung eine mögliche Variante.

Auf eine Pumpe mit metallischen Komponenten wurde bisher gänzlich verzichtet. Dies vorwiegend aus fertigungstechnischen Gründen. Ob mit dem Einsatz von metallischen Werkstoffen eine Verbesserung erzielt werden könnte ist nicht garantiert. Wegen der komplexen Geometrie der Teile

macht die Herstellung mit einem 3D-Drucker am meisten Sinn. Obwohl sich auch Metall damit verarbeiten lässt, werden die Oberflächenstrukturen nur bedingt besser. Eine aufwändige Nacharbeit wäre wohl notwendig, um die gewünschte Qualität zu erreichen. Man müsste sowohl die Fertigung, wie auch die Nachbehandlung ausserhalb der Hochschule Luzern machen lassen. Dies hätte wiederum hohe Kosten und lange Lieferfristen zur Folge.

Um den Hohlraum abzudichten, würde sich eine professionelle Oberflächenbehandlung empfehlen. Da sich das Prinzip des Hohlraums, der mit Warmwasser geflutet wird, jedoch noch nicht testen liess, sollte dies vorgängig geklärt und womöglich weitere Alternativen in Betracht gezogen werden.

### 9.1.3 Betrieb

Im Betrieb gilt es darauf zu achten, dass die Belastung stets symmetrisch ist. Das heisst, es dürfen keine grösseren Lücken im Nachschub des Schokoladepulvers entstehen. Dazu muss im Trichter ein zuverlässiger Mechanismus vorhanden sein, der das Pulver umrührt und verteilt.

## 9.2 Handlungsempfehlungen

Um die Idee, mit Schokoladenpulver aus Ausgangsmaterial umsetzen zu können, sollte man am besten noch einmal einige Schritte zurück gehen und auf den Erkenntnissen aus Kapitel 9.1 eine Neugestaltung vornehmen. Es würde wohl Sinn machen, die einzelnen Teilfunktionen separiert zu betrachten und dazu Versuche zu machen, ehe man sie zusammenführen kann. Es wäre womöglich sinnvoll, als ersten die Förderung des Pulvers zu optimieren. Das Schmelzen und Ausgeben der Schokolade könnte in einem zweiten Schritt hinzugefügt werden.

Die verwendeten Werkstoffe müssen auf jeden Fall überdacht werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit hätten Werkstoffe mit besseren Gleiteigenschaften einen positiven Einfluss auf das Förderverhalten.

### 9.2.1 Konzeptvorschlag

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden nach Abschliessen der Versuche in einer neuen Idee versucht umzusetzen. In dieser wird der zuvor stillstehende Stator vom Motor angetrieben, während der Rotor an Ort und Stelle fest eingespannt ist. Obwohl die Bezeichnung Stator nicht mehr zutrifft, denn es ist nun kein stillstehendes Teil mehr, wird zur Beschreibung trotzdem der Begriff Stator verwendet. Selbes gilt für den Rotor.

Der Stator, besser gesagt das Pumpenprofil im Stator, taumelt also hier um einen festen Rotor. Die Exzentrizität entsteht dadurch, dass das Profil im Stator nicht in der Mitte ist, wie in Abbildung 46 zu sehen ist. Das lässt zu, dass nun nicht mehr nur von einer Seite angetrieben wird, sondern dass über die Länge der Pumpe das Drehmoment eingeleitet werden kann.

In der Abbildung 47 ist die Idee schematisch festgehalten. An den gelben Mantelflächen wird die Bewegung übertragen. Der Motor treibt über ein Rad ein Element an, dass die Kraft verteilt. So soll am Anfang und am Ende der Pumpe ein Drehmoment eingeleitet werden.

Auf diese Weise könnte eine Schrägstellung der beiden Pumpenkörper im Betrieb vermieden werden.

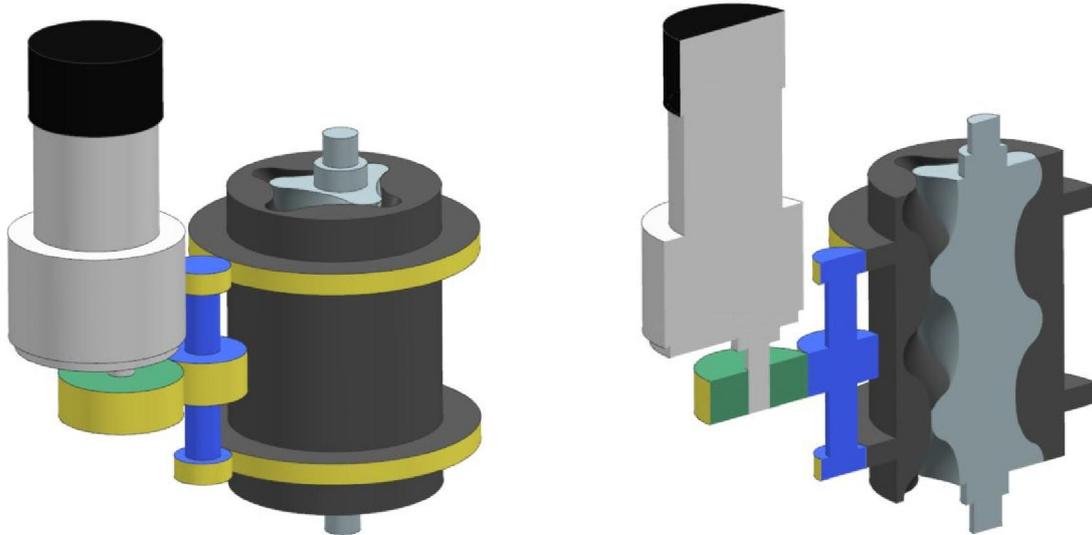


Abbildung 47: CAD Model einer Konzeptidee (links) und im Schnitt (rechts)

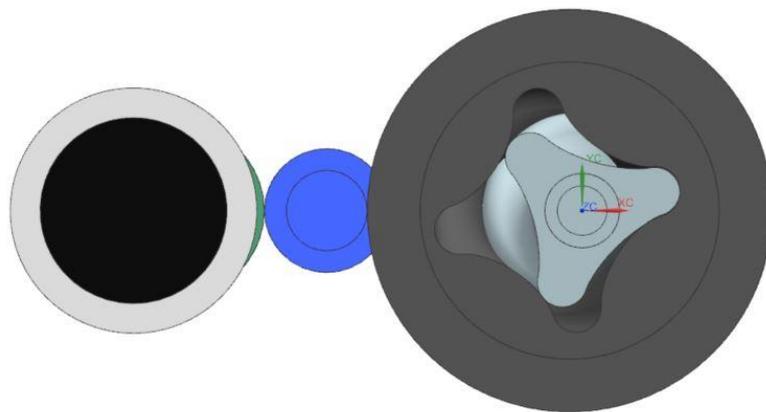


Abbildung 46: Draufsicht der Konzeptidee

Die Pumpe weist hierbei eine deutlich erhöhte Steigung und weniger Gänge auf. So könnte erreicht werden, dass das Pulver weniger gepresst und mehr fortbewegt wird.

Für die Umsetzung einer solche Idee ist das Überprüfen der notwendigen Lagerstellen und der Freiheitsgrade der einzelnen Teile notwendig.

## 10 Fazit

Bezieht man sich auf die Ziele, die zu Beginn der Arbeit formuliert wurden, muss man feststellen, dass diese nicht erreicht werden konnten. Dies hat unterschiedliche Gründe: zum einen wurde das Augenmerk von Beginn an nur auf das Optimieren der Schokoladenverarbeitung gelegt. Ein nicht Funktionieren des Funktionsdemonstrators wurde nicht oder zu wenig stark in Betracht gezogen. Die Ziele richten sich auf das Finden der idealen Pumpenparameter. Jedoch stellte sich im Verlauf der Arbeit heraus, dass es noch viele weitere Hürden zu überwinden gilt, ehe der Prozess optimiert werden kann. Diese Hürden wurden im Vorfeld der Arbeit nur ungenügend wahrgenommen und benötigen bei einem Weiterführen dieser Arbeit genauere Betrachtung. Es wäre besser, die einzelnen Schritte der Schokoladenverarbeitung einzeln zu betrachten und umzusetzen, bevor sie zu einem Ganzen zusammengeführt werden.

Trotz der Tatsache, dass diese Ziele nicht erreicht werden konnten, wurden viele Erfahrungen gemacht, auf denen sich aufbauen lässt. So konnten Aussagen im Bezug zum mechanischen Verhalten und verschiedenen Werkstoffen sowie Werkstoffkombinationen gemacht werden. Ausserdem konnte bereits erfolgreich Schokoladenpulver gefördert werden. Diese Tatsache zeigt, dass es möglich ist, das beschriebene Konzept umzusetzen. Ausgehend davon, dass zu Beginn der Arbeit kaum Wissen vorhanden war, ist man heute um einiges schlauer.

Für ein Weiterarbeiten empfiehlt sich ein Schritt zurück, indem eine ausführliche Problemanalyse gemacht wird, in welche die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zwingend einfließen sollten. Erweitert man zudem den Horizont an Werkstoffen, Fertigungsverfahren und Oberflächenbehandlungen, hat man sehr gute Chancen, das neuartige Konzept umsetzen zu können.

## Literaturverzeichnis

- [1] Rapidobjects GmbH, „3D Druckverfahren - Fused Deposition Modeling (FDM),“ [Online]. Available: [https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Fused-Deposition-Modeling-FDM\\_1246.html](https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Fused-Deposition-Modeling-FDM_1246.html). [Zugriff am 3 Januar 2019].
- [2] Rapidobjects GmbH, „3D Druckverfahren - Stereolithografie (SLA),“ [Online]. Available: [https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Stereolithografie-SLA\\_1245.html](https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Stereolithografie-SLA_1245.html). [Zugriff am 3 Januar 2019].
- [3] Wiiboox, „Food WiibooxSweetin 3D Food Printer,“ [Online]. Available: <https://www.wiiboox.com/3d-printer-wiiboox-sweetin.php>. [Zugriff am 10 Dezember 2018].
- [4] D. Surek, Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen, Merseburg: Springer, 2014.
- [5] A. Lindner, „Die Hypozykloide - GeoGebraTube,“ [Online]. Available: <http://tananyag.geomatech.hu/material/simple/id/137028>. [Zugriff am 10 Dezember 2018].
- [6] R. J. L. Moineau, „Gear Mechanism“. USA Patent 1,892,217, 27 Dezember 1932.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines bereits bestehenden Funktionsprinzips.....	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines weiteren bereits bestehenden Funktionsprinzips .....	7
Abbildung 3: Schematische Darstellung des neuen Funktionsprinzips.....	8
Abbildung 4: Wiiboox Lebensmitteldrucker [3] .....	9
Abbildung 5: Grund- und Rollkreis.....	11
Abbildung 6: Entstehende Hypozykloide.....	11
Abbildung 7: Hypozykloide mit fünf Zähnen .....	12
Abbildung 8: Versatz der Hypozykloide um r (links) und fertiger Querschnitt (rechts).....	13
Abbildung 9: Versatz des Querschnittes, um Spiel zu erzeugen .....	14
Abbildung 10: Kurven zur Erzeugung eines Rotors.....	15
Abbildung 11: Fertiger Rotor .....	15
Abbildung 12: CAD Modell des Funktionsdemonstrators Version 1 .....	21
Abbildung 13: CAD Modell des Funktionsdemonstrators Version 1 im Schnitt.....	22
Abbildung 14: Hohlraum des Funktionsdemonstrators Version 1 im Schnitt.....	23
Abbildung 15: Fertiger Funktionsdemonstrator Version 1 .....	24
Abbildung 16: Stator Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts).....	25
Abbildung 17: Rotor Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	25
Abbildung 18: CAD Modelle von Rotorachse (links) und Motorwelle (rechts).....	26
Abbildung 19: CAD Modelle von Sockel (links) und Lagerplatte (rechts) .....	26
Abbildung 20: Düse Version 1 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	27

Abbildung 21: CAD Model von Stange (links) und Distanzbolzen (rechts).....	28
Abbildung 22: Drehteile aus Stahl .....	28
Abbildung 23: CAD Model vom Trichter (links) und Getriebemotor mit Lagerplatte (rechts).....	28
Abbildung 24: Peripheriegeräte.....	29
Abbildung 25: CAD Model der rotierenden Teile im Schnitt.....	30
Abbildung 26: Rotierende Teile .....	30
Abbildung 27: Die drei Stufen der Schokoladenverarbeitung.....	31
Abbildung 28: Taumelnde Elemente.....	32
Abbildung 29: Undichte Stellen der Düse.....	33
Abbildung 30: Nacharbeit am Funktionsdemonstrator Version 1 .....	34
Abbildung 31: Rotor nach Betrieb mit Schokoladenpulver .....	35
Abbildung 32: CAD Model des Funktionsdemonstrators Version 2 (links) und im Schnitt (rechts) ...	37
Abbildung 33: Funktionsdemonstrator Version 2 .....	38
Abbildung 34: Stator Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts).....	39
Abbildung 35: Rotor Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	39
Abbildung 36: Lagerplatte Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	40
Abbildung 37: Düse Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	40
Abbildung 38: Trichter Version 2 als CAD Model (links) und in echt (rechts).....	40
Abbildung 39: Momentaufnahmen vor und nach einer Stromspitze.....	42
Abbildung 40: Nacharbeit an den rotierenden Teilen .....	43
Abbildung 41: Nachgearbeiteter Rotor nach dem Betrieb mit Schokoladenpulver .....	44
Abbildung 42: Angepasste Pumpe ohne verdichtenden Abschnitt .....	45
Abbildung 43: CAD Model des Funktionsdemonstrators Version 3 im Schnitt.....	46
Abbildung 44: Stator Version 3 als CAD Model (links) und in echt (rechts).....	47
Abbildung 45: Rotor Version 3 als CAD Model (links) und in echt (rechts) .....	47
Abbildung 46: Draufsicht der Konzeptidee.....	51
Abbildung 47: CAD Model einer Konzeptidee (links) und im Schnitt (rechts).....	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten des Wiiboox Lebensmitteldrucker [3] .....	9
Tabelle 2: Auslegungstabelle .....	18
Tabelle 3: Konfigurationen Funktionsdemonstrator Version 1 .....	19
Tabelle 4: Stückliste Funktionsdemonstrator Version 1 .....	20
Tabelle 5: Konfigurationen des Funktionsdemonstrators Version 2.....	36
Tabelle 6: Konfigurationen Funktionsdemonstrator Version 3.....	45