

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Benjamin Friedrich**

**Konstruktion und Test eines  
Filament-Extruders für spezi-  
elle Materialien im 3D-Druck**

Mittweida, 2023



Fakultät Ingenieurwissenschaften

---

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Konstruktion und Test eines Filament-Extruders für spezi- elle Materialien im 3D-Druck**

Autor:

**Herr**

**Benjamin Friedrich**

Studiengang:

**Elektrotechnik-Automation**

Seminargruppe:

**EA19wA-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Weidemann**

Zweitprüfer:

**M. Eng. Petzold**

Einreichung:

**Mittweida, 30.06.2023**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2023**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Friedrich, Benjamin:

Konstruktion und Test eines Filament-Extruders für spezielle Materialien im 3D-Druck. - 2023. - IV, 38, IX S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2023

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Extruders für 3D-Drucker, mit dem man sowohl hochflexible als auch hochtemperaturbeständige Filamente verarbeiten kann. Das Projekt umfasst hierbei die Konstruktion, Fertigung und das Testen des Extruders. Hierbei handelt es sich um eine Prototypenkonstruktion. Der Extruder ist für keinen speziellen 3D-Drucker ausgelegt.



# Inhalt

## Inhalt I

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Übersicht.....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivation.....</i>	1
1.2 <i>Zielsetzung.....</i>	2
<b>2 Vorbetrachtung.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
3.1 <i>Extruder .....</i>	5
3.2 <i>Vergleich der Technologien und Probleme.....</i>	6
3.2.1 <i>Single-Gear und Dual-Gear.....</i>	6
3.2.2 <i>Probleme bei flexiblen Materialien.....</i>	8
3.2.3 <i>Überhitzen des Extruders.....</i>	10
<b>4 Entwicklung und Konstruktion.....</b>	<b>13</b>
4.1 <i>Filamentförderung .....</i>	13
4.2 <i>Getriebe und Motor .....</i>	14
4.3 <i>Hotend und Heatbreak .....</i>	17
4.4 <i>Wasserkühlung (Coldend).....</i>	19
4.5 <i>Gehäusekonstruktion .....</i>	20
4.6 <i>Materialauswahl .....</i>	26
<b>5 Analyse und Auswertung .....</b>	<b>29</b>
5.1 <i>Funktionstest.....</i>	29
5.2 <i>Temperaturverhalten .....</i>	31
5.2.1 <i>Vorbereitung und Durchführung .....</i>	31
5.2.2 <i>Auswertung .....</i>	33
5.2.2.1 <i>Phase 1.....</i>	33
5.2.2.2 <i>Phase 2.....</i>	34

---

5.2.2.3	Phase 3.....	34
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>37</b>
6.1	<i>Konstruktion.....</i>	37
6.2	<i>Funktion.....</i>	37
6.3	<i>Zusammenfassung .....</i>	38
<b>Glossar</b>		<b>39</b>
<b>Literatur</b>		<b>41</b>
<b>Anlagen</b>		<b>43</b>
<b>Anlagen, Teil 1 .....</b>		<b>I</b>
<b>Anlagen, Teil 2 .....</b>		<b>VI</b>
<b>Anlagen, Teil 3 .....</b>		<b>IX</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>		<b>11</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Single-Gear-Antrieb .....	7
Abbildung 2 Dual-Gear-Antrieb .....	7
Abbildung 3 Beispiel 1: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder .....	9
Abbildung 4 Beispiel 2: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder .....	9
Abbildung 5 Beispiel 3: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder .....	10
Abbildung 6 Mechanische Zerstörung eines Extruder durch Überhitzung .....	11
Abbildung 7 Bondtech Drivegear Kit.....	14
Abbildung 8 Schrittmotortreiber TB6600.....	15
Abbildung 9 LDO Schrittmotor 36STH20-1004AHG .....	16
Abbildung 10 Zwischenwelle .....	16
Abbildung 11 Schnittansicht Extrudergehäuse .....	17
Abbildung 12 Heatblock aus vernickeltem Kupfer mit Heizelement und Thermistor.....	18
Abbildung 13 Vollmetall-Heatbreak aus Titan.....	19
Abbildung 14 Hauptblock des Extruders.....	21
Abbildung 15 Abdeckplatte.....	24
Abbildung 16 Montageplatte für den Motor.....	25
Abbildung 17 Vergleich der Aluminiumlegierungen.....	27
Abbildung 18 Phase 1: Temperaturverlauf bei deaktivierter Wasserkühlung .....	33
Abbildung 19 Phase 2: Temperaturverlauf bei Aktivierung der Wasserkühlung .....	34
Abbildung 20 Phase 3: Temperaturverlauf bei aktivierter Wasserkühlung .....	35

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	<b>Acrylnitril-Butadien-Styrol</b>
<b>CAD</b>	<b>Computer-Aided-Design</b>
<b>FDM</b>	<b>Fused Deposition Modelling</b>
<b>PC / PC+</b>	<b>Polycarbonat</b>
<b>PEEK</b>	<b>Polyetheretherketon</b>
<b>PEI</b>	<b>Polyetherimide</b>
<b>PETG</b>	<b>Polyethylenterephthalat-Glykol</b>
<b>PLA</b>	<b>Polylactid Acid</b>
<b>PTFE</b>	<b>Polytetrafluorethylen</b>
<b>SLA</b>	<b>Stereolithografie</b>
<b>SLS</b>	<b>Selektives Lasersintern</b>
<b>TPU</b>	<b>Thermoplastisches Polyurethan</b>

# 1 Übersicht

## 1.1 Motivation

Die additive Fertigung erfreut sich seit Jahren ansteigender Beliebtheit. Der Umsatz der 3D-Druck-Branche steigt stetig. Dies bezieht sich sowohl auf die Produkte selbst, aber auch durch Dienstleistungen können mehr Einnahmen generiert werden. Als vielfältig einsetzbares Fertigungsverfahren wird der 3D-Drucker sowohl in Privathaushalten, aber auch für Unternehmen verwendet. Von Prototypen über Einzelkomponenten bis hin zu komplexen Baugruppen – die Einsatzmöglichkeiten des 3D-Druckers sind schier unendlich. Im Jahr 2021 wurde sogar das erste Haus aus dem 3D-Drucker eingeweiht.<sup>1</sup> Aufgrund der einfachen Handhabung, vielfältigen Möglichkeiten, geringen Kosten und einem vergleichsweise niedrigen Zeitaufwand wird der 3D-Druck steigt die Nutzung des additiven Fertigungsverfahren weiter an. Dieses Projekt beleuchtet einen Aspekt des 3D-Drucks: den Prototypenbau.

---

<sup>1</sup> Vgl. <https://www.gira.de/g-pulse-magazin/architektur/3d-drucker-haus#>

## 1.2 Zielsetzung

In diesem Bachelorprojekt soll ein Extruder entwickelt werden, mit dem man sowohl hochflexible (TPU - Shore 60A) als auch hochtemperaturbeständige (PEEK 450°C)<sup>2</sup> Filamente verarbeiten kann. Das Projekt umfasst hierbei die Konstruktion, Fertigung und das Testen des Extruders. Der Extruder dient lediglich als Prototyp und wird für keinen speziellen 3D-Drucker ausgelegt. Folgende Fragestellungen werden innerhalb dieser Arbeit beantwortet:

- Welche Arten von Extrudern gibt es?
- Welche Vor- und Nachteile weisen diese auf?
- Welche Probleme entstehen bei der Verwendung von aktuell verfügbaren Extrudern?
- Wie können diese Probleme konstruktiv beseitigt werden?

---

<sup>2</sup> Vgl. <https://www.3djake.de/esun/epeek-pro-natural>

## 2 Vorbetrachtung

Die additive Fertigung, welche auch als 3D-Druck bezeichnet wird, ist ein Fertigungsverfahren, bei dem ein Werkstück durch Zufügen von Material schichtweise aufgebaut wird. Dabei werden dreidimensionale Teile aus flüssigen, pulverförmigen oder festen Grundwerkstoffen hergestellt. Es gibt viele unterschiedliche additive Fertigungsverfahren, von denen die drei bekanntesten im Nachfolgenden kurz beschrieben werden.

Bei der Stereolithographie (SLA) wird durch einen Laserstrahl ein flüssiges Harz schichtweise ausgehärtet. Ähnlich ist die Funktionsweise des Selektiven Lasersinterns (SLS), wobei hier ein pulverförmiger Ausgangsstoff mittels Laser, ebenfalls schichtweise, gesintert wird. Anders wird beim Fused Deposit Modeling (FDM) schmelzfähiges Material durch eine heiße Düse gedrückt und schichtweise auf einer Druckplatte abgelegt. Die Fördereinrichtung einschließlich der beheizten Düse wird als Extruder bezeichnet.

Hauptsächlich werden im FDM-Verfahren thermoplastische Kunststoffe in Drahtform, sogenanntes Filament, verarbeitet. Einige der gängigsten Materialien sind PLA, ABS, PETG, PC und Nylon, welche ähnliche thermische und mechanische Eigenschaften aufweisen. Jedoch gibt es beispielsweise flexible Filamente wie TPU oder hochtemperaturbeständige Materialien wie PEEK oder PEI, welche mit den meisten Extrudern nicht oder nur schwierig zu verarbeiten sind.



## 3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Funktionsweise von Extrudern für FDM-Drucker erklärt. Dabei wird genauer auf die Unterschiede von Extrudern eingegangen. Ebenfalls werden häufig auftretende Fehler und Probleme von einzelnen Extrudern analysiert.

### 3.1 Extruder

Wie im vorherigen Kapitel erklärt, ist der Extruder die Verarbeitungseinrichtung für das zu druckende Material. Da der Fokus dieser Arbeit auf Filament-Extrudern für Kunststoffe liegt, wird auf andere Technologien nicht weiter eingegangen.

Ein Extruder besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten: eine Antriebseinheit und ein Druckkopf. In Fachkreisen wird der Antrieb als Coldend und der Druckkopf als Hotend bezeichnet.

Die Antriebseinheit besteht im einfachsten Fall aus einem Schrittmotor, auf dessen Welle ein Zahnrad befestigt ist und einer zweiten gelagerten Welle. Mit der zweiten Welle wird das Filament gegen das Zahnrad gedrückt, sodass das Zahnrad die Rotation des Motors in eine translatorische Bewegung des Filaments überträgt. Dieses Prinzip wird auch als Single-Gear-Antrieb bezeichnet.<sup>3</sup>

Um den Schlupf zwischen Zahnrad und Filament zu verringern wird die gelagerte Welle durch ein zweites gegenläufig angetriebenes Zahnrad ersetzt. Diese Methode wird als Dual-Gear-Antrieb oder Dual-Drive-Antrieb bezeichnet.

Es gibt zwei Einbaupositionen von Extrudern: Bowden-Extruder und Direkt-Extruder.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Vgl. <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/>

<sup>4</sup> Vgl. <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>

Bei einem Bowden-Extruder ist die Antriebseinheit am Rahmen oder Gehäuse des Druckers befestigt und über einen PTFE-Schlauch mit dem Druckkopf verbunden. Das Filament wird durch den Schlauch geführt, welcher mit Hotend und Coldend zug- und schubsteif verbunden ist. Dadurch ist dieses System einem Bowdenzug ähnlich. Vorteilig an diesem System ist, dass der Druckkopf sehr leicht ist, da kein Motor und keine Fördereinheit, sondern nur das Hotend, mitbewegt werden muss. Allerdings können durch Bewegung des Filaments im PTFE-Schlauch Ungenauigkeiten auftreten, was das Druckergebnis negativ beeinflusst. Zusätzlich ist dieses System ungeeignet um flexible Filamente zu drucken, da diese sich im PTFE-Schlauch verklemmen können.

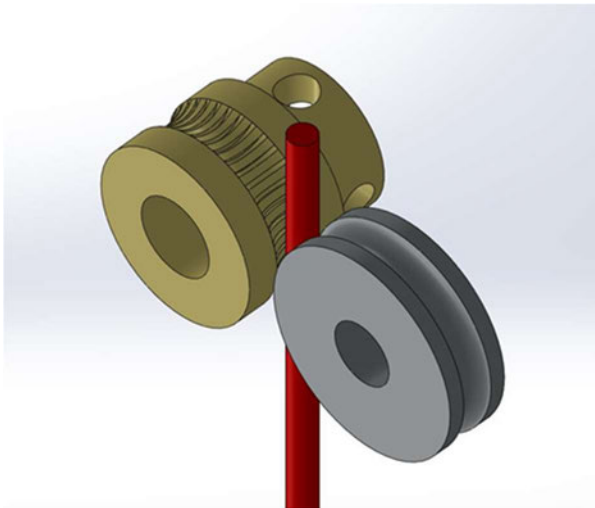
Beim Direkt-Extruder ist die Fördereinrichtung direkt am Druckkopf befestigt. Der PTFE-Schlauch wird meist durch ein kurzes Metallrohr, das sogenannte Heatbreak, ersetzt, durch welches das Filament direkt in das Hotend gefördert wird. Positiv am Direkt-Extruder ist, dass jedes Material mit einer hohen Präzision gedruckt werden kann. Einziger Nachteil ist die hohe Massenträgheit des Systems, welche aus dem hohen Gewicht resultiert, da Motor und Antrieb mitbewegt werden müssen.

## **3.2 Vergleich der Technologien und Probleme**

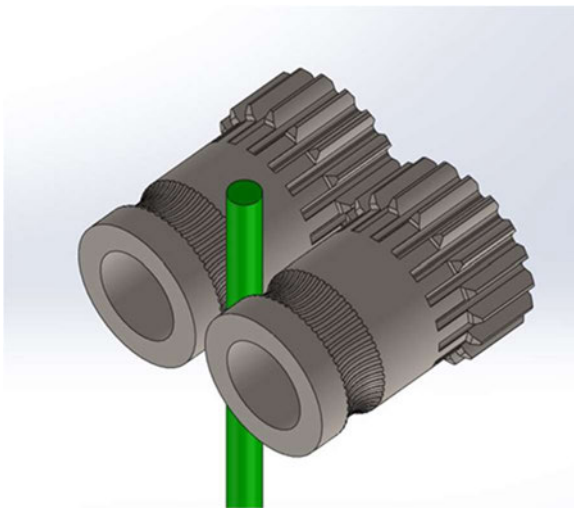
### **3.2.1 Single-Gear und Dual-Gear**

Bei einem Single-Gear-Extruder wird, wie man aus der Bezeichnung ableiten kann, nur ein Förderrad angetrieben. Das Gegenstück besteht oft nur aus einem einfachen Kugellager oder einer Art Riemenscheibe, dessen Außenring das Filament gegen das eigentliche Förderrad drückt. Hierbei kommt es häufig zu Schlupf zwischen Förderrad und Filament, wodurch die Präzision des Extruders beeinträchtigt wird. Ebenfalls kann hierbei Abrieb vom Filament entstehen, was einen erhöhten Wartungsaufwand bedeutet.





**Abbildung 1 Single-Gear-Antrieb** <sup>5</sup>



**Abbildung 2 Dual-Gear-Antrieb** <sup>6</sup>

Im Gegensatz dazu steht der Dual-Gear-Antrieb, bei dem beide Förderräder angetrieben sind. Meist wird das dadurch erreicht, dass sich auf beiden Förderrädern je ein Zahnrad befindet, wodurch das Antriebsrad das anpressende Rad mit antreibt. Der Dual-Gear-Extruder ermöglicht eine höhere Kraftübertragung vom Motor auf das Filament. Zusätzlich kommt es bei dieser Technologie zu vergleichsweise weniger Schlupf, was eine höhere Präzision nach sich zieht. Dies resultiert zusätzlich

---

<sup>5</sup> Eigene Abbildung

<sup>6</sup> Eigene Abbildung

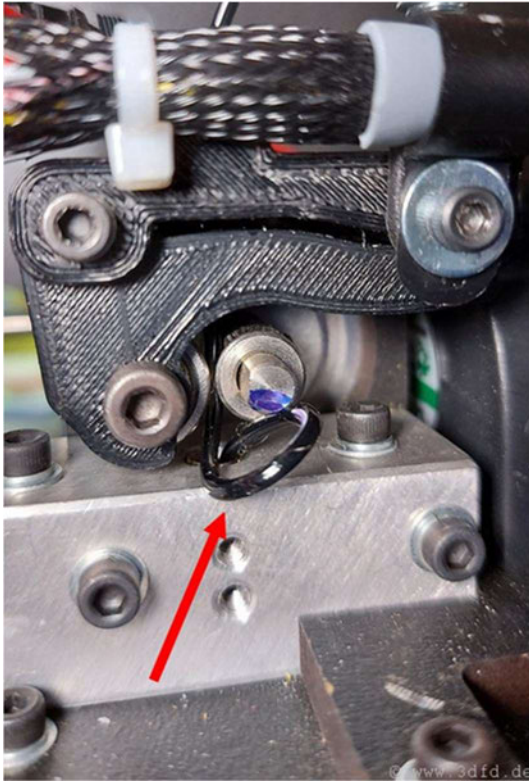
in geringerem Abrieb und somit auch weniger Wartungsaufwand. Des Weiteren verbessert dieser Extruder das Drucken von flexiblen Materialien, da das Filament von zwei Seiten gefördert wird. Wenngleich der Dual-Gear-Extruder kostenintensiver ist, überwiegen im Vergleich zur Single-Gear-Lösung die Vorteile. Die Dual-Gear-Technik wird in den meisten hochwertigeren Extrudern verwendet.

### **3.2.2 Probleme bei flexiblen Materialien**

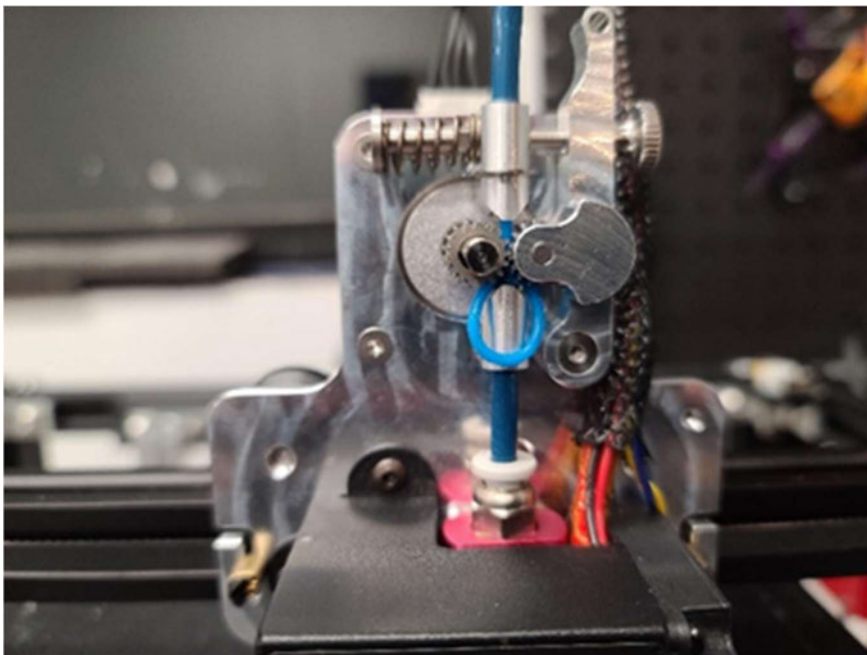
Unabhängig von der Antriebstechnik treten immer wieder Probleme bei der Verwendung von flexiblen Filamenten auf. Die folgenden Abbildungen zeigen ein häufiges Problem beim Drucken von TPU. Das Filament wird zwar gefördert, aber nicht richtig weitergeleitet. Meist trifft dieser Fehler auf, weil der Abstand zwischen den Förderrollen und der Öffnung der Filamentführung zum Hotend zu groß ist. Es gibt viele Lösungsansätze in diversen 3D-Drucker-Foren<sup>7</sup>, jedoch ist (Stand Oktober 2022) noch kein Extruder bekannt bei dem dieses Problem konstruktiv vollständig behoben wurde.

---

<sup>7</sup> Vgl. <https://www.raise3d.com/academy/how-to-choose-a-better-printer-for-tpu-printing/>



**Abbildung 3 Beispiel 1: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder<sup>8</sup>**



**Abbildung 4 Beispiel 2: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder<sup>9</sup>**

---

<sup>8</sup> Quelle: <https://www.3dfd.de/wp-content/uploads/TPU-3D-Reifen-07.jpg>, verfügbar am 28.06.2023 10:53

<sup>9</sup> Quelle: <https://i.redd.it/ybvb6y1zypf51.jpg>, verfügbar am 28.06.2023 10:55

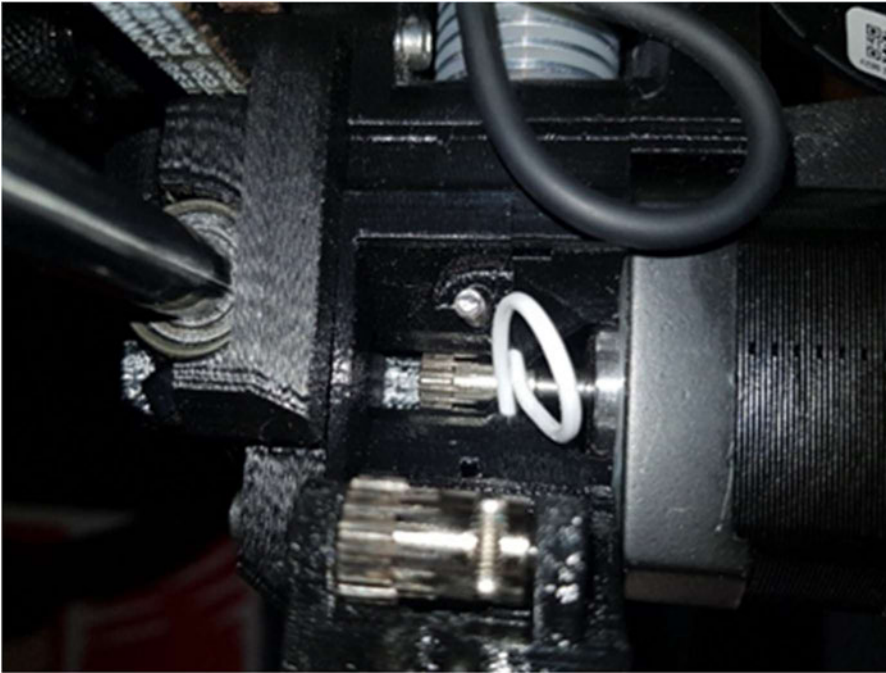


Abbildung 5 Beispiel 3: Fehlleitung vom TPU-Filament im Extruder <sup>10</sup>

### 3.2.3 Überhitzen des Extruders

Ein 3D-Druck dauert meist nur wenige Minuten bis Stunden. Bei größeren Druckprojekten kommt es auch vor, dass sich die Druckdauer auf mehrere Stunden bis Tage ausdehnt. Bei Direkt-Extrudern ist eine aktive Kühlung des Coldends und des Filaments im Coldend notwendig, da diese sich sonst mit erhizen. Wenn das Filament bereits im Coldend erweicht, dann kommt es häufig zu Problemen bei der Filamentförderung. Im günstigsten Fall wird das Filament so warm, dass es sich verformt und deswegen nicht mehr fördern lässt. Im schlimmsten Fall schmilzt das Filament im Coldend, was zum Verkleben oder sogar zur mechanischen Zerstörung des Extrudergehäuses führen kann.

---

<sup>10</sup> Eigene Fotografie



**Abbildung 6 Mechanische Zerstörung eines Extruder durch Überhitzung<sup>11</sup>**

Die meisten Filamente werden mit Temperaturen von 170°C bis 310°C<sup>12</sup> verarbeitet. Es gibt jedoch auch spezielle Filamente, wie beispielsweise PEEK, die Extruder-Temperaturen bis 450°C benötigen. Für die meisten Extruder ist es zwar möglich so hohe Temperaturen zu erreichen, jedoch nur für kurze Zeit, da meist die Kühlung des Coldends nicht dafür ausgelegt ist.

Für einige Filamente ist ein beheizter Druckraum erforderlich, um Spannungen und Verzug im Druckteil zu verringern. In diesem Fall stoßen vor allem luftgekühlte Extruder an ihre Grenzen.

---

<sup>11</sup> Quelle: <http://www.3dprinterbank.com/?p=16341>, verfügbar am 28.06.2023 10:57

<sup>12</sup> Vgl. <https://www.filamentworld.de/das-richtige-filament-finden/>



## 4 Entwicklung und Konstruktion

Die Entwicklung des Extruders sollte insbesondere zwei Hauptprobleme beseitigen:

- Geringe thermische Belastbarkeit des Extruders und daraus resultierend die fehlende Möglichkeit Hochtemperaturmaterialien wie PEEK oder PEI zu drucken
- Verklemmen von TPU beziehungsweise das Fehlleiten im Extruder

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte innerhalb des Konstruktionsprozesses erklärt. Da es sich hier um die Entwicklung eines Funktionsprototyps handelt, wurde weniger auf Design und Gewichtsoptimierung geachtet, sondern vorrangig auf die Funktionalität Wert gelegt.

### 4.1 Filamentförderung

Um eine optimale Filamentförderung zu erreichen, wird ein Dual-Gear-Antrieb genutzt. Die Vorteile eines Dual-Gear-Extruders wurden bereits im vorgelagerten Kapitel erläutert. Da der Aufwand für die Herstellung sehr hoch und eine Neuentwicklung eines funktionierenden Systems unzweckmäßig ist, wurde ein Drivegear-Kit von Bondtech<sup>13</sup> (siehe Abbildung) zugekauft. Hierbei handelt es sich um ein bereits erprobtes System, welches in vielen Extrudermodellen bereits verbaut wurde. Dieses besteht aus einem Primärtrieb, der mit einer M4 Madenschraube auf einer Welle mit Durchmesser 5mm befestigt werden kann, und einem Sekundärtrieb mit einer 3mm Welle und zwei Nadellagern. Jedes der Antriebsräder hat ein Zahnrad mit 17 Zähnen und einem Modul  $m=0,5\text{mm}$ .

---

<sup>13</sup> Vgl. <https://www.bondtech.se/product/drivegear-kits/>



Abbildung 7 Bondtech Drivegear Kit<sup>14</sup>

## 4.2 Getriebe und Motor

Die meisten Schrittmotoren haben eine Teilung von 200 Vollsritten pro Umdrehung. Daraus ergeben sich  $1,8^\circ$  pro Schritt. Der Durchmesser des Förderrades beträgt ca. 7,5mm und der des Filaments 1,75mm. Daraus ergibt sich ein gefördertes Volumen pro Vollschrift von ca.  $0,3\text{mm}^3$ . Bei einem Düsendurchmesser von 0,4mm und einer Schichthöhe von 0,2mm würde pro Motorschritt eine Linie mit einer Länge von ca. 3,5mm gedruckt.

Die einzige Möglichkeit das extrudierte Volumen pro Motorschritt zu verringern, ist den Schrittwinkel zu verringern. Dies kann entweder mechanisch, elektronisch oder durch eine Kombination realisiert werden. Um die Genauigkeit mechanisch zu erhöhen, kann ein Untersetzungsgetriebe genutzt werden. Die elektronische Umsetzung wird im folgenden Absatz erklärt.

Für die Ansteuerung eines Schrittmotors wird ein Schrittmotortreiber benötigt. Dieser wandelt Schritt- und Richtungssignale der Steuerung in elektrische Impulse um, mit denen die Wicklungen des Schrittmotors erregt werden<sup>15</sup>. Mit den meisten Schrittmotortreibern ist es möglich die Auflösung von 200 Schritten pro Umdrehung

---

<sup>14</sup> Quelle: <https://c-3d.niceshops.com/upload/image/product/large/default/bondtech-drivegear-kit-fuer-175-mm-5mm-val-244218-de.jpg>, verfügbar am 28.06.2023 11:04

<sup>15</sup> Vgl. <https://www.omega.de/prodinfo/schrittmotoren.html>



auf ein Vielfaches zu erhöhen. Der hier verwendete Treiber TB6600 kann jeden Vollschritt in bis zu 32 Mikroschritte teilen. Dadurch ergibt sich eine maximal mögliche Auflösung von 6400 Schritten pro Umdrehung, jedoch verringert sich im Mikroschrittbetrieb das Drehmoment des Motors.



**Abbildung 8** Schrittmotortreiber TB6600<sup>16</sup>

Um die Präzision mechanisch zu erhöhen wird ein einfaches Zahnradgetriebe mit einer Untersetzung von 6 eingesetzt. Dadurch wird am Förderrad nicht nur der Drehwinkel pro Motorschritt verringert, sondern auch das Drehmoment erhöht.

Für diesen Extruder wird eine Kombination der beiden Varianten genutzt.

Als Antrieb dient ein NEMA14 Pancake Stepper (LDO-36STH20-1004AHG) von LDOMOTORS. Dieser findet bereits in einigen Extrudern Anwendung. Der ausgewählte Schrittmotor hat folgende drei Vorteile gegenüber den sonst in 3D-Druckern üblichen NEMA17-Motoren:

- Bauartbedingt kleiner und leichter
- Hitzebeständig bis 180°C durch Isolierstoffklasse H
- Auf der Motorwelle ist bereits ein Stirnzahnrad (Modul  $m=0,5\text{mm}$  mit 10 Zähnen) angebracht.

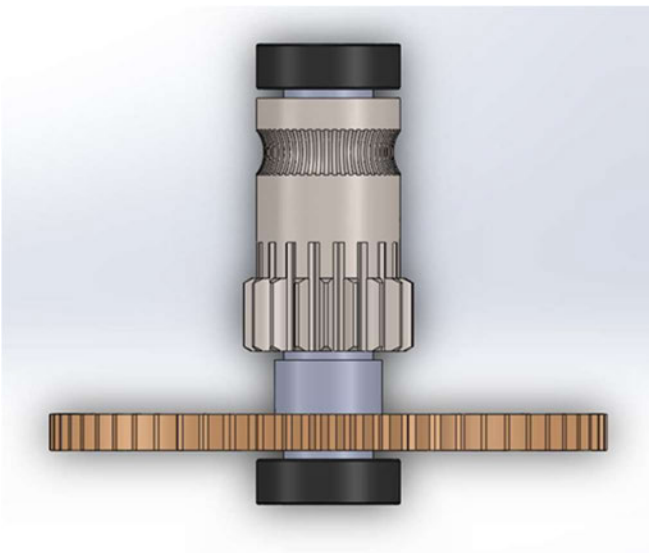
---

<sup>16</sup> Quelle: <https://www.sorotec.de/shop/Schrittmotorkarte-TB6600---9V---40V---0-7A---4-0A-.html>, verfügbar am 28.06.2023 11:09



**Abbildung 9 LDO Schrittmotor 36STH20-1004AHG<sup>17</sup>**

Es wird eine beidseitig gelagerte Zwischenwelle konstruiert. Auf dieser Welle werden der Primärtrieb des Drivegear-Kit und ein Zahnrad mit einem Modul  $m=0,5\text{mm}$  und 60 Zähnen befestigt. Das Zahnrad der Zwischenwelle wird vom Zahnrad des Motors angetrieben. Dadurch ergibt sich ein Verhältnis von 10 Zähnen zu 60 Zähnen, was eine Untersetzung von 6 ergibt. Die Zwischenwelle wird beidseitig mit je einem Rillenkugellager (MR85-2RS) gelagert.



**Abbildung 10 Zwischenwelle<sup>18</sup>**

<sup>17</sup> Quelle: [https://www.cr3d.de/produkt/schrittmotor\\_ido-36sth20-1004ahg/](https://www.cr3d.de/produkt/schrittmotor_ido-36sth20-1004ahg/), verfügbar am 28.06.2023 11:11

<sup>18</sup> Eigene Darstellung

Der Sekundärtrieb wird mit den beiden im Kit enthaltenen Nadellagern auf einer feststehenden Welle an einem Hebel montiert. Dieser Hebel wird mit einer Rändelschraube und einer Feder an das Gehäuse des Extruders gedrückt. Das bewirkt die nötige Vorspannkraft zwischen den beiden Antriebsrädern, um das Filament zu fördern. Über die Rändelschraube kann die Vorspannkraft eingestellt werden.

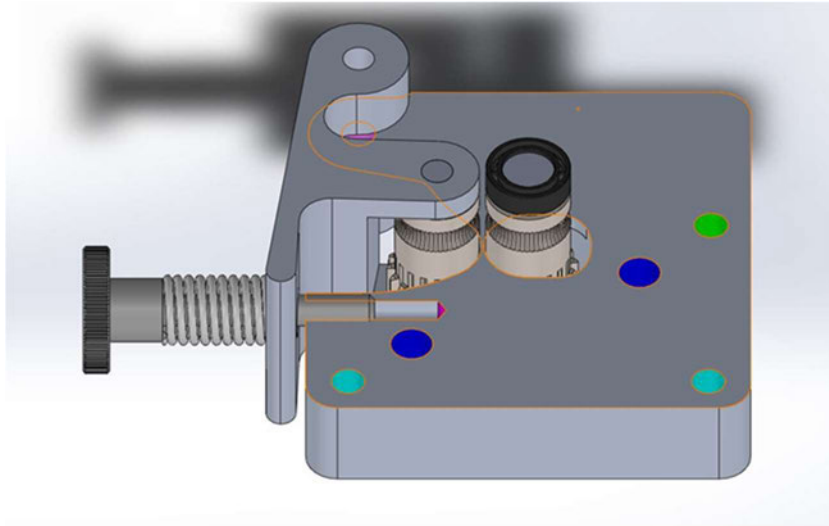


Abbildung 11 Schnittansicht Extrudergehäuse<sup>19</sup>

### 4.3 Hotend und Heatbreak

Um das Filament aufzuschmelzen ist eine Wärmequelle notwendig. Hierfür dient eine Heizpatrone in Verbindung mit einem Thermistor, der für die Temperaturmessung benötigt wird. Beide Komponenten und ein Zuführrohr (Heatbreak) mit einer Düse werden von einem Metallblock (Heatblock) gehalten und thermisch verbunden.

Um Temperaturen bis 450°C zu erreichen wird eine Heizpatrone mit 24V und 60W eingesetzt. Diese erbringt etwa doppelt so viel Leistung wie die Standard-Heizpatrone (30W bis 40W) der meisten 3D-Drucker. Um die Temperatur zu messen wird ein Thermistor (NTC-100k) verwendet, welcher für Temperaturen bis 500°C geeignet ist.

---

<sup>19</sup> Eigene Darstellung

Zur Gewährleistung einer optimalen Wärmeleitung wird ein Heatblock aus vernickeltem Kupfer eingesetzt. Dieser ist ebenfalls für Temperaturen bis 500°C geeignet.



**Abbildung 12 Heatblock aus vernickeltem Kupfer mit Heizelement und Thermistor<sup>20</sup>**

Um die mechanische Komponente des Extruders (Coldend) vor übermäßiger Erwärmung zu schützen und trotzdem maximale Stabilität der Verbindung zum Hotend sicher zu stellen, wird ein Heatbreak aus Metall eingesetzt. Häufig haben diese Zuführrohre im oberen Teil, welcher im Coldend befestigt wird, einen PTFE-Einsatz. Dieser dient vor allem der Verringerung der Reibung. Jedoch erweicht PTFE bei Temperaturen über 260°C und ist deshalb für diesen Extruder ungeeignet. Aus diesem Grund wird ein Vollmetall-Heatbreak aus Titan verwendet. Da Titan nicht nur sehr gute mechanische Eigenschaften, sondern auch einen geringen Wärmeleitkoeffizienten besitzt, eignet sich dieser Werkstoff besonders gut. Zudem ist das gewählte Zuführrohr vorteilhaft durch seine geringe Länge von nur 22,5mm und die durchgängige 2mm Bohrung für die Filamentführung.

---

<sup>20</sup> Quelle: <https://i.ebayimg.com/images/g/sAgAAOSw6xxe5fSg/s-l1600.jpg>, verfügbar am 28.06.2023 11:14



Abbildung 13 Vollmetall-Heatbreak aus Titan<sup>21</sup>

#### 4.4 Wasserkühlung (Coldend)

Besonders für Hochtemperatur-Materialien wie PEEK und PEI ist es notwendig die Temperatur des Druckraums während des Druckvorgangs zu erhöhen, um die Abkühlgeschwindigkeit des Druckteils zu verringern. Hierfür werden Temperaturen bis 150°C empfohlen. Dadurch steigt auch die Umgebungstemperatur des Extruders. Zusätzlich wird das Coldend von dem nur wenigen Millimeter unterhalb befindlichen Hotend erhitzt. Daher ist eine aktive Kühlung des Extruders notwendig.

In den meisten handelsüblichen 3D-Druckern wird der Extruder durch einen Lüfter am Coldend gekühlt. Da es jedoch für einige Filamente notwendig ist den Druckraum zu beheizen, reicht die Umgebungstemperatur des Extruders nicht aus um das Coldend ausreichend zu kühlen. Ebenfalls bewirkt ein Lüfter einen Luftstrom in der Nähe des Druckteils, was sich negativ auf die Druckqualität auswirken kann.

---

<sup>21</sup> Quelle: <https://i.ebayimg.com/images/g/-hkAAOSwlpNhFYDX/s-l1600.png>, verfügbar am 28.06.2023 11:15

Durch ungleichmäßiges Abkühlen des Druckteils entstehen Druckfehler, wie zum Beispiel Warming oder geringe Layerhaftung.

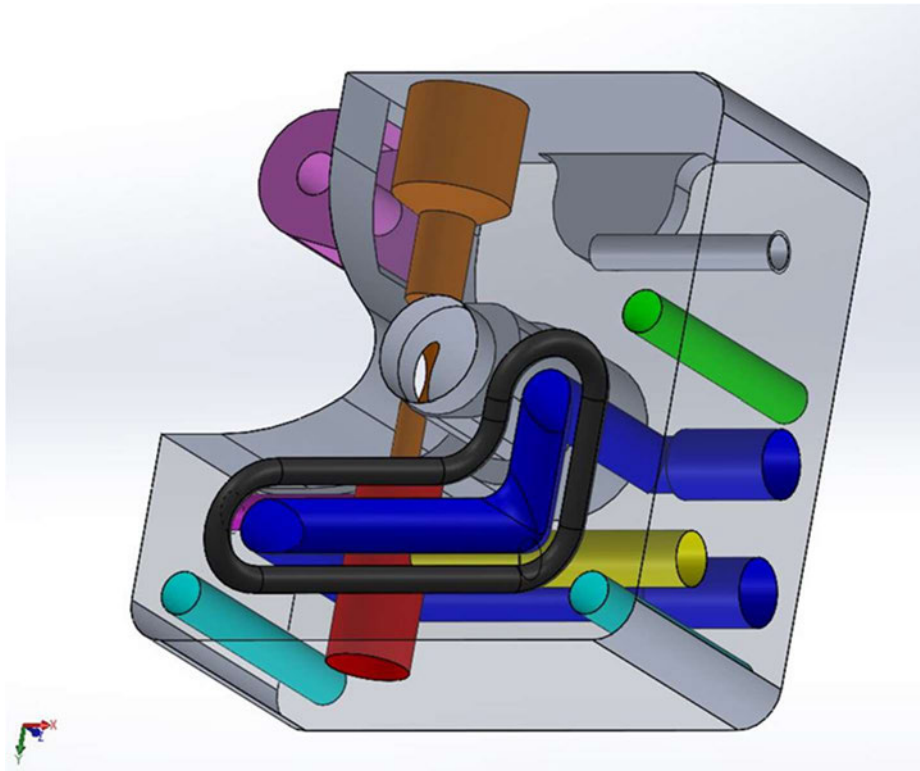
Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kühlung des Coldend, wird eine Flüssigkeitskühlung vorgesehen. Hierbei wird eine Kühlflüssigkeit, wie beispielsweise Wasser, durch einen Kanal im Gehäuse des Coldends geleitet. Durch zwei Schlauchanschlüsse am Gehäuse kann die Flüssigkeit extern zugeführt bzw. abgeleitet werden. Außerhalb des Extruders ist eine Wasserpumpe mit Ausgleichsbehälter und ein Wärmetauscher mit Lüfter vorgesehen. Der Kühlkreislauf ermöglicht es, kalte Flüssigkeit in das Coldend zu pumpen, welche die unerwünschte Wärme aufnimmt und in den Wärmetauscher leitet. Dort wird die Umgebungstemperatur außerhalb des Druckers genutzt um die Flüssigkeit wieder abzukühlen.

Um eine möglichst effektive Kühlung zu erreichen, wird der Kühlkanal so nah wie möglich an Hotend und Heatbreak vorgesehen. Da die Kühlung des Heatbreak die höchste Priorität hat, wird der Wasserkanal in geringem Abstand um dessen Position geführt.

## 4.5 Gehäusekonstruktion

Die meisten handelsüblichen Extruder werden mit einem NEMA17-Schrittmotor betrieben. Dadurch ergibt sich eine übliche Größe eines Extruders von jeweils ca. 42mm Breite und Länge. Diese Maße wurden als Richtwert für diesen Extruder genutzt.

Zuerst wurde die Position der Zwischenwelle mit Primärtrieb und Getriebezahnräder festgelegt. Diese befindet sich mittig in einem Quader mit je 42mm Breite (X) und Länge (Y) und einer Höhe von  $Z = 20\text{mm}$ . Die Achse der Welle steht normal auf der XY-Ebene. Daraus ergibt sich konstruktiv die Position des Sekundärtriebes und damit auch des Hebels (lila). Die Drehachse des Hebels befindet sich in einer Ecke des Extruders. Dadurch kann der Hebel etwa  $180^\circ$  geschwenkt werden, was beispielsweise die Reinigung des Extruders wesentlich vereinfacht.



**Abbildung 14 Hauptblock des Extruders<sup>22</sup>**

Die Position der Grundbohrung (orange) für die Filamentführung wird ebenfalls durch die Position der Zwischenwelle bzw. des Primärtriebs festgelegt und verläuft in Richtung der Y-Achse. Die Filamentführung kann in drei Segmente unterteilt werden:

- Filamentzuführung
- Filamentförderung
- Weiterleitung zur Düse

Bei der Filamentzuführung (orange) ist besonders wichtig, dass das Filament möglichst reibungsfrei in den Extruder gelangt. Deshalb wurde eine 15mm tiefe Bohrung mit einem Durchmesser von 4mm vorgesehen, in welche ein PTFE-Schlauch eingeführt werden kann. Da PTFE einen geringen Reibungskoeffizienten besitzt, eignet sich dieses Material besonders gut für eine fast reibungsfreie Führung des Filaments. Der Schlauch wird mit einem Einschraubanschluss für 4mm Schläuche mit

---

<sup>22</sup> Eigene Darstellung

G1/8“ Gewinde vor Herausrutschen gesichert. Hierfür ist ein Gewinde mit einer Tiefe von 7,5mm festgelegt. Die Übergänge zwischen den einzelnen Bohrungen sollen gefast sein, um die Montage des Schlauches zu vereinfachen und das Einführen des Filaments durch den Schlauch in die Grundbohrung zu erleichtern. Bei der Fertigung wird diese Fase durch den Schneidwinkel des Bohrers realisiert.

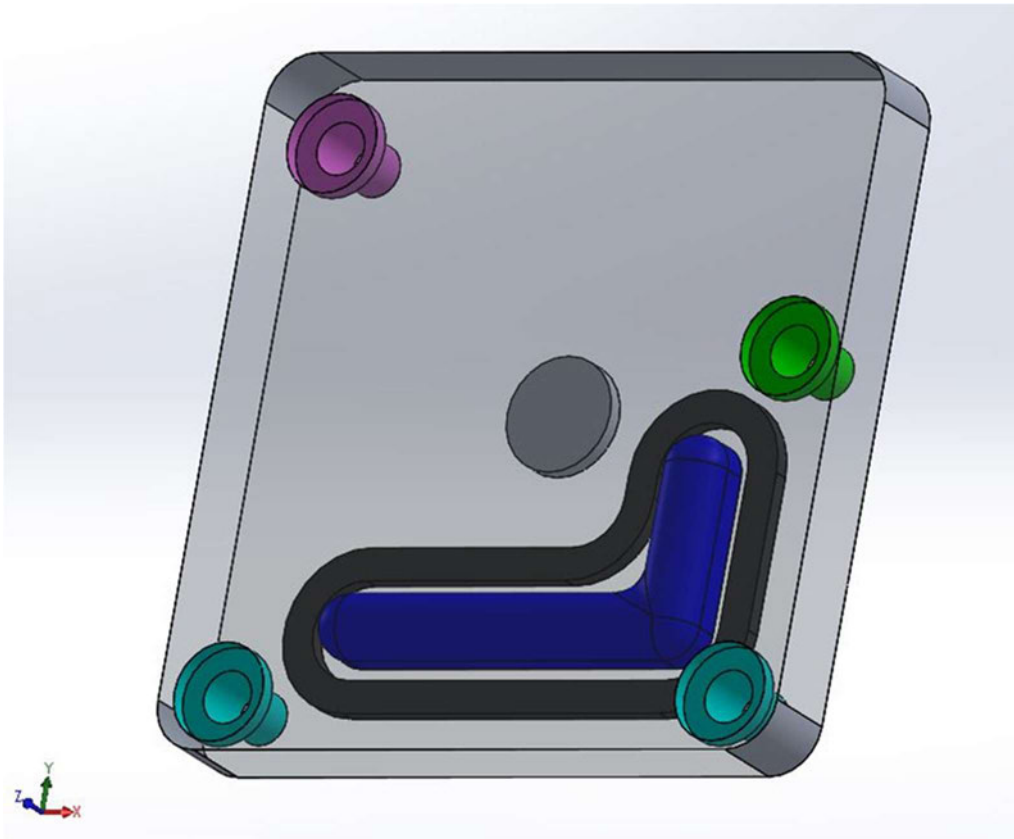
Die Innovation dieses Extruders zeichnet sich in der Filamentförderung ab. Hier wird das Filament durch die Grundbohrung mit einem Durchmesser von 2mm geführt. Tangential zu dieser Bohrung befinden sich die beiden Antriebsräder des Drivegear-Kit. Die Antriebsräder haben einen Durchmesser von 8,0mm. Der Ausschnitt für die beiden Antriebe ist jeweils eine Kreistasche mit einem Durchmesser von 8,4mm und einem Abstand von 8,7mm. Somit ergibt sich ein Luftspalt zwischen Antriebsrad und Gehäuse von nur 0,2mm und ein durchgängiger Steg zwischen den beiden Ausschnitten von 0,3mm an der dünnsten Stelle. Durch diese durchgängige Filamentführung ist es möglich auch hochflexibles Material, wie zum Beispiel TPU Shore 60A, zu verarbeiten, da dieses nicht mehr durch den Luftspalt zwischen Gehäuse und Antriebsrad fehlgeleitet werden kann. Weitere Ausschnitte für die Montage der Zwischenwelle und des Hebels werden konstruiert, um diese Bauteile im Gehäuse freigängig und entsprechend ihrer Funktion beweglich montieren zu können.

Für die Weiterleitung des Filaments zur Düse wird, wie bereits erwähnt, ein Titan-Heatbreak eingesetzt. Dieses hat einen Außendurchmesser von 6mm und eine Schaftlänge von 14mm (rot). Am anderen Ende befindet sich ein M6-Gewinde, an welchem der Heizblock aufgeschraubt wird. Zwischen Gewinde und Schaft ist ein ca. 3mm breiter Einstich gefertigt, welcher den Durchmesser an dieser Stelle auf 3mm reduziert und damit die Wärmeübertragung vom Hotend zum Coldend verringert. Für die Montage im Coldend wird eine Bohrung mit einem Durchmesser von 6mm und einer Länge von 14mm vorgesehen. Am Übergang zur Grundbohrung soll keine Fase gefertigt werden, da sonst ein Spalt zwischen Heatbreak und Coldend entsteht, in welchem sich das Filament verklemmen könnte. Um das Heatbreak vor Herausrutschen und Verdrehen zu sichern, wird eine M3x10mm Madenschraube nach DIN913 als Feststellschraube (gelb) eingesetzt. Diese drückt auf eine am Heatbreak dafür vorgesehene abgeflachte Stelle.



Wie bereits im Kapitel 3.4 erwähnt, wird der Kühlung in der Nähe des Hotend bzw. Heatbreak die größte Priorität beigemessen, weil in diesem Bereich die Wärmeleitung in das Coldend am größten ist. Dafür wird ein U-förmiger Wasserkanal (blau) mit einem Durchmesser von 4mm um die Bohrung für das Heatbreak angelegt. Da diese Geometrie nicht durch subtraktive Fertigung herstellbar ist, wird das Gehäuse des Coldend zweiteilig konstruiert. Dadurch ist es möglich einen dreidimensionalen Kanal im Inneren des Gehäuses zu fertigen. Es werden je zwei Bohrungen in Richtung der Z-Achse und der X-Achse gesetzt und diese mit einem L-förmigen gefrästen Kanal (blau) verbunden. Um den Kanal wird im Abstand von 1mm eine Nut gefräst, um eine Dichtung (schwarz) montieren zu können. Die beiden Bohrungen, welche in X-Richtung orientiert sind, befinden sich an der Außenseite des Gehäuses und werden zusätzlich mit einem M6-Gewinde versehen. In diesem Gewinde wird jeweils ein Schlauchanschluss montiert.

Das zweite Bauteil des Gehäuses ist die Abdeckplatte für den Kanal. Diese erfüllt, neben der Abdichtung des Wasserkanals, auch die Funktion die Drehachse für den Hebel des Sekundärtriebes befestigen zu können. Die Maße dieser Abdeckung betragen  $X = Y = 42\text{mm}$  und  $Z = 5\text{mm}$ . Auf der gegenüberliegenden Seite des Gehäuses befindet sich das Zahnrad der Zwischenwelle und das entsprechende Lager. Um den Motor und das Lager der Zwischenwelle zu befestigen, wird eine rechteckige Platte mit den Maßen  $X = 42\text{mm}$ ,  $Y = 60\text{mm}$  und  $Z = 6\text{mm}$  eingesetzt. Um das Zahnrad herum wird eine Kreistasche mit einem Durchmesser von 32mm konstruiert. Im Mittelpunkt der Kreistasche befindet sich der Lagersitz der Zwischenwelle. Eine Bohrung im Abstand von 17,5mm zum Lagersitz und mit einem Durchmesser von 16mm dient der Aufnahme und Positionierung des Motors.



**Abbildung 15 Abdeckplatte<sup>23</sup>**

Eine M3x30mm Schraube nach DIN912 übernimmt die Funktion der Drehachse des Hebels (lila). Zwei weitere Schrauben (türkis) derselben Größe werden in den Ecken des Wasserkühlungskanals eingesetzt um die Abdeckplatte mit dem Gehäuse und der Motorhalterung zu verbinden und die Dichtung anzupressen. Der Motor wird mit einer M3x10 Schraube durch die Motorhalterung und einer M3x35 (grün) Schraube durch das gesamte Gehäuse verschraubt.

---

<sup>23</sup> Eigene Darstellung

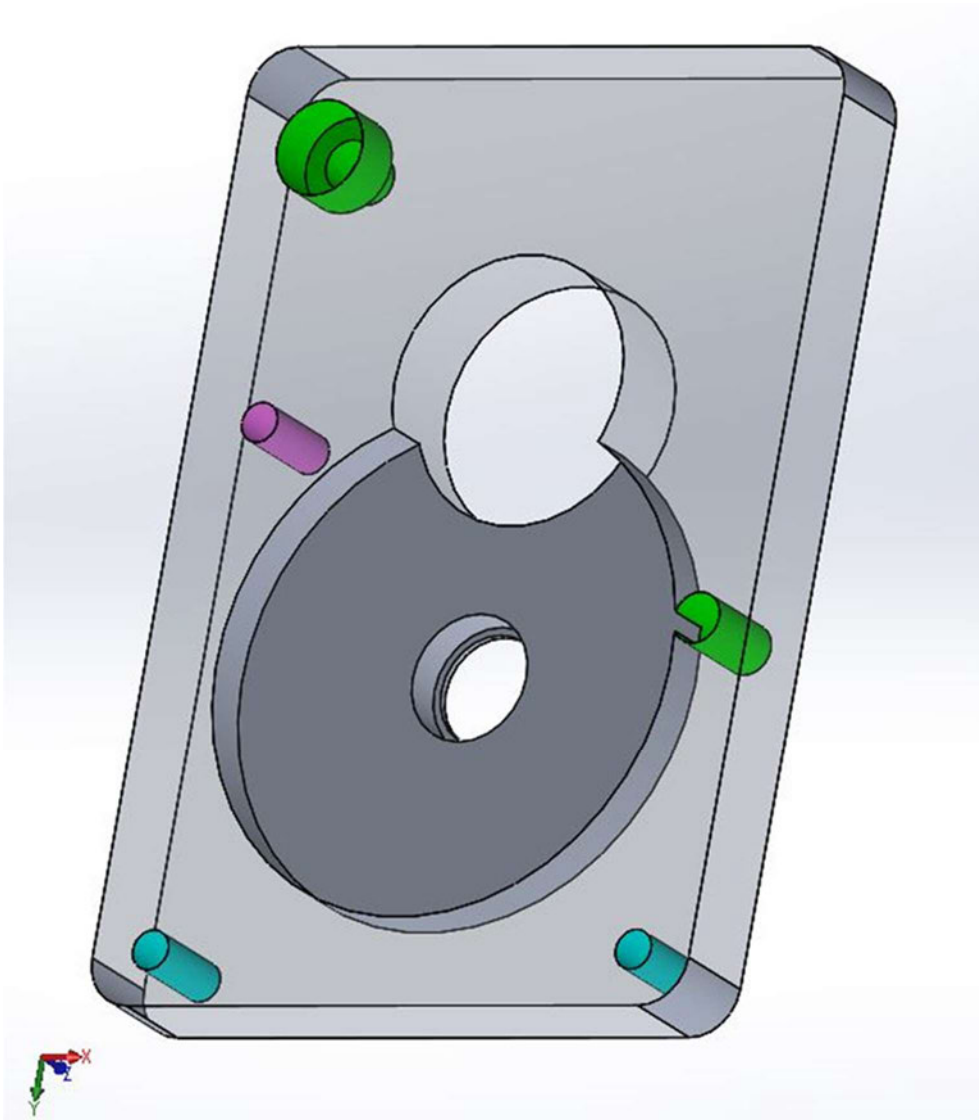


Abbildung 16 Montageplatte für den Motor<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Eigene Darstellung

## 4.6 Materialauswahl

Bei der Materialauswahl wurden hauptsächlich folgende vier Materialeigenschaften berücksichtigt:

- Dichte und daraus resultierend das Gewicht des Extruders
- Zerspanbarkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Korrosionsbeständigkeit

Die Auswahl beschränkt sich auf Metalle. Mittlerweile wird zwar an wärmeleitfähigen Kunststoffen geforscht, jedoch erreichen diese nur einen geringen Wärmeleitkoeffizienten.<sup>25</sup>

Kupfer ist einer der besten Wärmeleiter, jedoch hat es eine relativ hohe Dichte und lässt sich schlecht zerspanen. Auch müsste ein Extruder aus Kupfer in einem aufwändigen Verfahren, wie zum Beispiel Vernickeln, gegen Korrosion geschützt werden. Kupferlegierungen sind zwar teilweise besser zerspanbar und korrosionsbeständiger, jedoch besitzen auch diese eine hohe Dichte, wodurch der Extruder eine hohe Masse aufweisen würde.

Eisenmetalle sind zumeist gut zerspanbar, jedoch vergleichsweise schlechte Wärmeleiter. Auch besitzen diese eine hohe Dichte und sind nur teilweise korrosionsbeständig. Daher wird auch diese Werkstoffgruppe nicht weiter berücksichtigt.

Aluminiumlegierungen weisen im Vergleich zu den bereits genannten Werkstoffen eine sehr geringe Dichte und einen hohen Wärmeleitkoeffizienten auf. Auch kann bei den meisten Aluminiumlegierungen sehr einfach, beispielsweise durch Eloxieren, die Korrosionsbeständigkeit wesentlich erhöht werden. In der nachfolgenden Tabelle werden vier ausgewählte Legierungen nach ihren thermischen Eigenschaften und der Eloxierbarkeit verglichen. Alle vier Legierungen weisen eine gute bis sehr gute Zerspanbarkeit auf.

---

<sup>25</sup> Vgl. <https://werkstoffzeitschrift.de/thermomanagement-durch-kunststoff-waermeleitfaehige-kunststoffe-clever-eingesetzt/>

Bezeichnung	Wärmeleitkoeffizient in [W/m K]	Eloxierbarkeit	
		dekorativ	Schutzeloxal
EN AW-2007	130 - 160	keine Angabe	5
EN AW-5083	117	4	2
EN AW-6082	170 - 220	3	1
EN AW-7075	130	6	3

Bedeutung der Kennzahlen:

1 = sehr gut

2 = gut

3 = annehmbar

4 = unzureichend

5 = nicht empfehlenswert

6 = ungeeignet

#### Abbildung 17 Vergleich der Aluminiumlegierungen<sup>26</sup>

Auf der Grundlage der vorhandenen Daten wurde EN AW-6082 als Werkstoff für den Extruder gewählt, da diese Legierung den höchsten Wärmeleitkoeffizienten aufweist. Ebenfalls kann dieser Werkstoff vergleichsweise sehr gut eloxiert werden, wodurch eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit erreicht wird.

<sup>26</sup> Quellen: <https://xometry.eu/de/materialauswahl-fuer-die-cnc-bearbeitung/>, <http://www.eloxal-muel-ler.de/images/Legierung.pdf>, verfügbar am 28.06.2023 11:26



## 5 Analyse und Auswertung

Um die Funktionalität des Extruders zu evaluieren, wurden verschiedene Tests durchgeführt. Es wurde getestet, ob das Laden und Entladen von Filament fehlerfrei funktioniert. Auch wurde überprüft, ob bei der Filamentförderung Probleme auftreten und wie wirksam die Wasserkühlung ist. In diesem Kapitel wird die Durchführung und Auswertung dieser Tests erläutert.

Für die Tests wurde ein Prüfstand entwickelt um den Extruder zu befestigen und anzusteuern.

### 5.1 Funktionstest

Wie im Kapitel 2.2.2 erläutert, kommt es vor allem bei flexiblen Filamenten häufig zu einer Fehlleitung im Extruder. Jedoch bringen auch starre Filamente wie beispielsweise PC oder ABS eine Schwierigkeit mit sich. Diese verklemmen sich oft beim Einführen in den Extruder, da das Ende des Filaments meist stumpf abgeschnitten wird und damit scharfkantig ist. Deswegen ist es wichtig, das fehlerfreie Laden und Entladen des Extruders nicht nur mit flexiblem Filament zu überprüfen, sondern auch mit weniger biegsamen Materialien.

Es wurden folgende fünf Filamente mit jeweils 50 Wiederholungen getestet:

- PEEK (ca. 400°C)
- PC+ (ca. 260°C)
- PLA (ca. 225°C)
- TPU Shore 85A (ca. 215°C)
- TPU Shore 60A (ca. 215°C)

Vor Beginn des Tests wurde der Extruder auf die materialspezifische Temperatur aufgeheizt. Danach wurden folgende fünf Schritte immer wiederholt:

1. Ende des Filaments abschneiden
2. Filament dem Extruder zuführen
3. Automatisches Laden in den Extruder
4. Automatisches Entladen
5. Ergebnis notieren

Von den 250 Wiederholungen wurde das Filament in 239 Fällen korrekt geladen und wieder entladen. Insgesamt 11 Fehlschläge wurden bei den Materialien PEEK (9 von 11) und PC+ (2 von 11) aufgenommen. Diese wurden auf einen Messfehler bei der Nachkonstruktion der Drivegears zurückgeführt. Durch diese Messungenauigkeit war die Filamentführung der Drivegears ca. 0,1mm seitlich zur Filamentführung des Extruders versetzt. Dies zeigte sich jedoch erst nach der Fertigung und wurde im CAD-Modell nachträglich angepasst.

Zusätzlich zum Lade- und Entladetest wurde ein Zugkraft-Vergleich durchgeführt. Hierbei wurde die Zugkraft des Extruders auf das Filament gemessen und im Anschluss mit der Zugkraft des standardmäßig im Creality Ender 3 verbauten Extruders verglichen. Die Messung der Zugkraft erfolgte durch eine einfache Kofferwaage. Je Extruder wurden fünf Messungen genommen und anschließend der Mittelwert errechnet. Die Zugkraft eines Ender 3 Extruders beträgt ca. 23 N. Der konstruierte Extruder weist eine Zugkraft von ca. 52 N auf. Auffällig war, dass beim Ender 3 Extruder das Filament am Förderrad durchgerutscht ist, wohingegen beim konstruierten Extruder der Motor Schritte verloren hat, weil das Drehmoment des Motors nicht mehr ausreichend war.



## 5.2 Temperaturverhalten

### 5.2.1 Vorbereitung und Durchführung

Die Analyse des Temperaturverhaltens erfolgt mittels Wärmebild. Dadurch ist es möglich nicht nur punktuelle Temperaturmessungen durchzuführen, sondern die Temperatur des gesamten Extruders zu überwachen. Für die Messung wird die Wärmebildkamera „FLIR ONE Pro“ mit einem Temperaturbereich von -20°C bis 400°C genutzt. Aufgrund des eingeschränkten Temperaturbereichs wird die Temperatur des Hotend in den Bildern mit maximal 400°C angezeigt, auch wenn die tatsächliche Temperatur höher ist.

Das Hotend wird auf 450°C erhitzt um den Einsatz für hochtemperaturbeständige Filamente, wie PEEK, mit einer empfohlenen Drucktemperatur von ca. 400°C, zu simulieren. Da die Hotend-Temperatur nicht gleich der Düsentemperatur (Nozzle) ist, ist es notwendig, die Temperatur des Hotend höher anzusetzen als die empfohlene Drucktemperatur. Die Hotend-Temperatur muss über den gesamten Zeitraum der Messungen konstant sein, um die Messwerte vergleichbar zu machen.

Um die vorgesehene Funktion der Wasserkühlung zu überprüfen, wird der Test in drei Phasen unterteilt:

- Phase 1: Temperaturverlauf bei deaktivierter Wasserkühlung
- Phase 2: Temperaturverlauf bei Aktivierung der Wasserkühlung
- Phase 3: Temperaturverlauf bei aktivierter Wasserkühlung

In der ersten Phase wird der Heizblock auf 450°C erhitzt. Während des Aufheizens bleibt die Wasserkühlung noch aktiviert. Sobald die Temperatur an der Düse konstant ist, wird die Wasserkühlung deaktiviert und die Messung beginnt. Hier werden 10 Messungen im Abstand von je 60 Sekunden durchgeführt. Die erste Phase dient zum einen der Verifizierung des Passivkühlverhaltens des Extruders und zum anderen als Vergleichswert für die Effizienz der Wasserkühlung.

Nachdem sich der Extruder 30 Minuten ohne Wasserkühlung aufgeheizt hat, beginnt die zweite Testphase. Hierzu wird die Wasserkühlung wieder aktiviert und der

Abkühlvorgang per Wärmebildvideo aufgezeichnet. Durch diese Phase wird das aktive Kühlverhalten der Wasserkühlung analysiert. Zusätzlich wird innerhalb der zweiten Phase nachgewiesen, dass die Kühlleistung der Wasserkühlung ausreichend bemessen ist.

Für die dritte Phase bleibt die Kühlung aktiviert und es wird ein Langzeittest über 3 Stunden durchgeführt. Diese Phase dient zur Überprüfung der Coldend-Temperatur über die Dauer eines Druckes. Ziel hierbei ist, dass sich das Coldend nicht aufheizt. Es werden Messungen in folgenden Intervallen aufgenommen:

- nach 5min
- nach 10min
- nach 30min
- nach 60min
- nach 120min
- nach 180min

## 5.2.2 Auswertung

### 5.2.2.1 Phase 1

Die Temperatur des Coldend steigt während der Aufwärmphase des Hotend an. Dies ist dem folgenden Diagramm zu entnehmen. Zusätzliche Wärmebilder befinden sich in Anlage 1. Daraus schließt sich, dass eine aktive Kühlung notwendig ist, da bereits nach acht Minuten eine Temperatur von über 50°C vorliegt. Da die Messung der Temperatur an der Außenseite des Extruders vorgenommen wurde und die Wärmeübertragung über das Heatbreak bzw. über Wärmestrahlung stattfindet, ist die Temperatur im Inneren des Coldend deutlich höher. Einige Materialien wie z.B. PLA verformen sich bereits ab dieser Temperatur und könnten somit nicht für einen Druck verwendet werden. Zusammenfassend liegt kein ausreichendes Kühlverhalten vor.



Abbildung 18 Phase 1: Temperaturverlauf bei deaktivierter Wasserkühlung<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Eigene Darstellung

### 5.2.2.2 Phase 2

Die Temperatur fällt kurz nach dem Einschaltzeitpunkt am stärksten ab. Der Temperaturverlauf ist dem nachfolgenden Diagramm zu entnehmen. Im Temperaturverlauf sind zwei Zeitpunkte besonders. Von Sekunde 18 auf 21, sowie 39 auf 42 steigt die Temperatur leicht an. Dies ist zurückzuführen auf das Einschalten des Hotends. Die Wasserkühlung hat die Temperatur des Hotend so stark verringert, dass die untere Schwelle des Zweipunktreglers unterschritten wurde und somit das Hotend aktiviert wurde. Der Temperaturanstieg des Coldend verdeutlicht somit die Wirksamkeit der Wasserkühlung. Die Kühlleistung der Wasserkühlung ist folglich ausreichend bemessen.

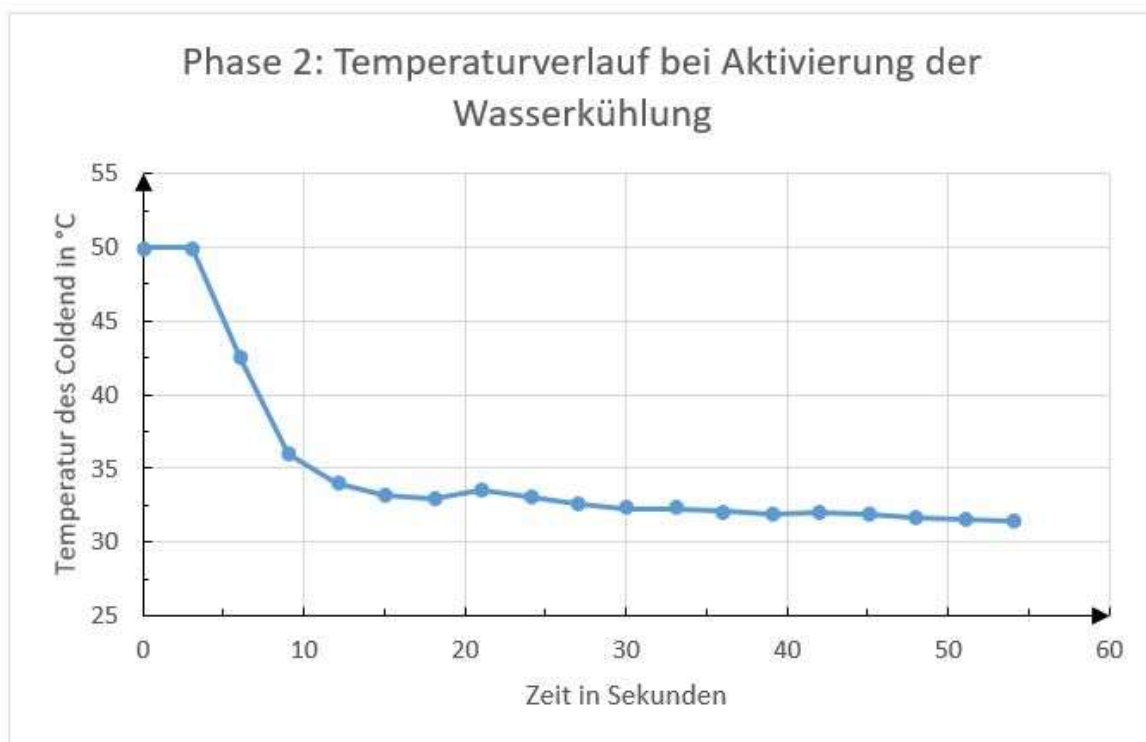


Abbildung 19 Phase 2: Temperaturverlauf bei Aktivierung der Wasserkühlung<sup>28</sup>

### 5.2.2.3 Phase 3

Innerhalb der vorliegenden Messungen sind Schwankungen von ca. 5 K ersichtlich. Dies verifiziert die Funktionalität der Wasserkühlung. Das erste Maximum resultiert

<sup>28</sup> Eigene Darstellung

aus der verzögerten Erwärmung des Coldend durch beispielsweise Materialwärmekoeffizienten. Anschließend kühlt der Extruder wieder ab und nach etwa einer Stunde ist das Minimum erreicht. Die Erwärmung im weiteren Verlauf ist auf die Erwärmung der Umgebungstemperatur zurückzuführen. Die dazugehörigen Wärmebilder sind in Anlage 2.



**Abbildung 20 Phase 3: Temperaturverlauf bei aktivierter Wasserkühlung<sup>29</sup>**

Folgende systematische Messfehler können einen Einfluss auf alle Messungen haben:

- Abweichung des Messgerätes ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$  oder  $\pm 5\%$ )
- Nicht durchgeführter Nullpunktsabgleich
- Nicht konstante Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit)
- Einfluss von Magnetfeldern auf das Messgerät
- Reflexion an der Messoberfläche

Auch unter Berücksichtigung der möglicherweise auftretenden Messfehler ist die Funktionalität der Wasserkühlung erkennbar und gegeben.

---

<sup>29</sup> Eigene Darstellung



## 6 Fazit

In diesem Kapitel wird dieses Projekt rückblickend beurteilt. Nachdem der Extruder konstruiert, gefertigt und getestet wurde, kann dieser bewertet werden. Es werden positive und negative Aspekte aufgezeigt und Verbesserungsmöglichkeiten genannt.

### 6.1 Konstruktion

Da es sich bei diesem Extruder, wie bereits erwähnt, um einen Prototyp handelt, wurde weder auf Design noch auf Gewichtsoptimierung geachtet. Hier liegt das größte Verbesserungspotential. An einigen Stellen kann unnötiges Material entfernt und somit das Gewicht wesentlich reduziert werden. Da der Extruder für keinen speziellen 3D-Drucker entwickelt wurde, sind auch keine Befestigungspunkte vorgesehen, um den Extruder an einem 3D-Drucker zu montieren. Eine entsprechende Montagemöglichkeit muss nachträglich hinzugefügt werden.

Insgesamt ist die Konstruktion als funktional und gut zu bewerten. Alle erforderlichen Details konnten in der Konstruktion berücksichtigt und umgesetzt werden.

Nach der Fertigung wurde ein Konstruktionsfehler gefunden und dieser direkt behoben.

### 6.2 Funktion

Durch die Tests konnte die gewünschte Funktionsweise festgestellt werden. Der Extruder entspricht den gestellten Anforderungen. Sowohl das Temperaturverhalten im Bereich von 400°C bis 450°C als auch die störungsfreie Förderung von hochflexiblen Filamenten sind als sehr gut zu bewerten.

### **6.3 Zusammenfassung**

Zusammenfassend ist der Extruder als Prototyp geeignet um alle Filamente zu verarbeiten, die bei einer Temperatur von bis zu 450°C extrudiert werden. Dabei ist es irrelevant, welche Flexibilität das Material aufweist. Mit entsprechenden Anpassungen hinsichtlich der Montagemöglichkeiten und Gewichtsoptimierung ist dieser Extruder eine bessere Alternative zu den meisten existierenden Extrudern.



## Glossar

Filament      Material für 3D-Drucker, zu Drähten geformte Plastikstränge

Layerhaftung    Verbindung der Schichten beim 3D-Druck

NEMA14    /    Abkürzung für: National Electrical Manufacturers Association,  
NEMA 17    genormtes Maß für Größe von Schrittmotoren

Nozzle      Düse des Extruders, Bestandteil des Hotend

Warping      Materialverzug, Abheben vom Druckbett, häufig an Ecken  
bzw. spitzen Kanten



## Literatur

- Baum2023      Baumann, Janette: <https://www.gira.de/g-pulse-magazin/architektur/3d-drucker-haus#>, verfügbar am 28.06.2023 08:13
- 3djake2023    <https://www.3djake.de/esun/epeek-pro-natural>, verfügbar am 28.06.2023 08:16
- Mensley2021    Mensley, Matthew: <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/>, verfügbar am 28.06.2023 10:34
- Hulette2022    Hulette, Tobias: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>, verfügbar am 28.06.2023 10:36
- Raise3D2023    <https://www.raise3d.com/academy/how-to-choose-a-better-printer-for-tpu-printing/>, verfügbar am 28.06.2023 10:47
- Fila2023        <https://www.filamentworld.de/das-richtige-filament-finden/>, verfügbar am 28.06.2023 11:00
- Bondtech2023    <https://www.bondtech.se/product/drivegear-kits/>, verfügbar am 28.06.2023 11:02
- Omega2023      <https://www.omega.de/prodinfo/schrittmotoren.html>, verfügbar am 28.06.2023 11:20
- Pithan2020      Pithan, Thies Falko; Tesch Michael Dipl.-Ing.: <https://werkstoffzeitschrift.de/thermomanagement-durch-kunststoff-waermeleitfaehige-kunststoffe-clever-eingesetzt/>, verfügbar am 28.06.2023 11:24



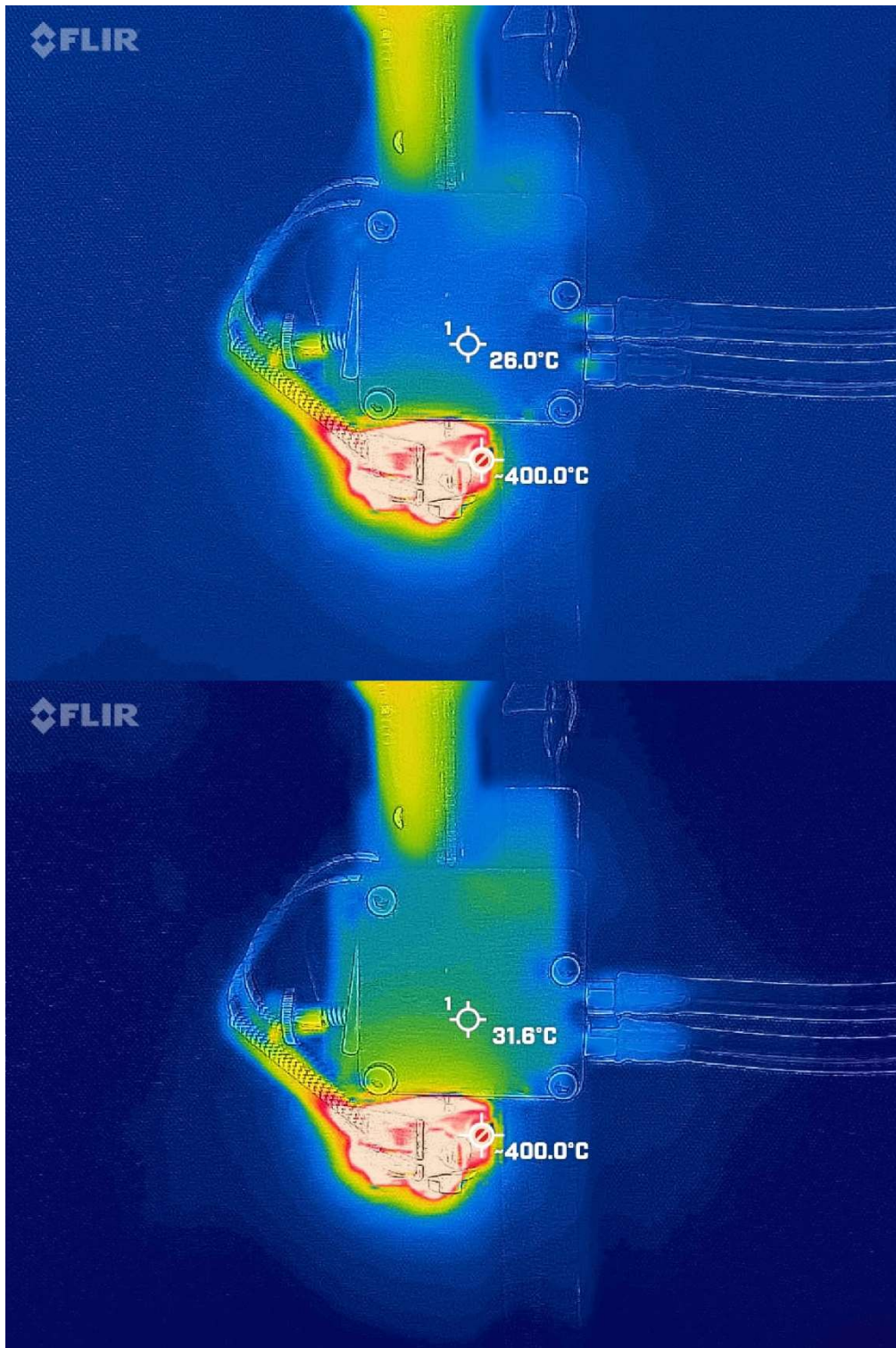
# Anlagen

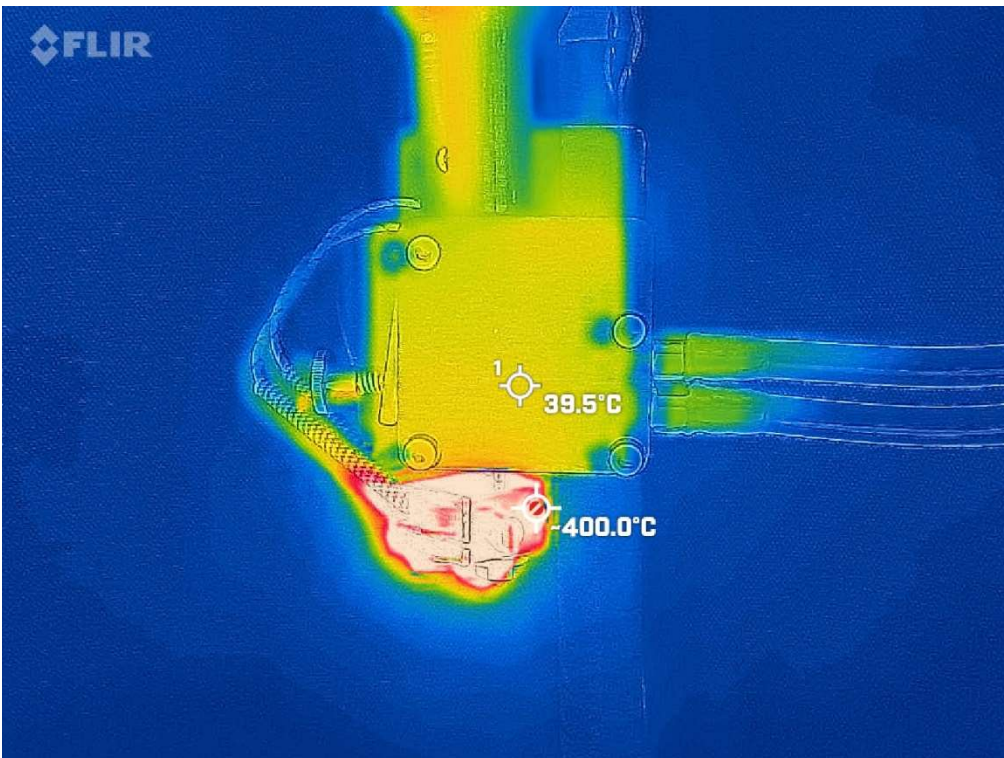
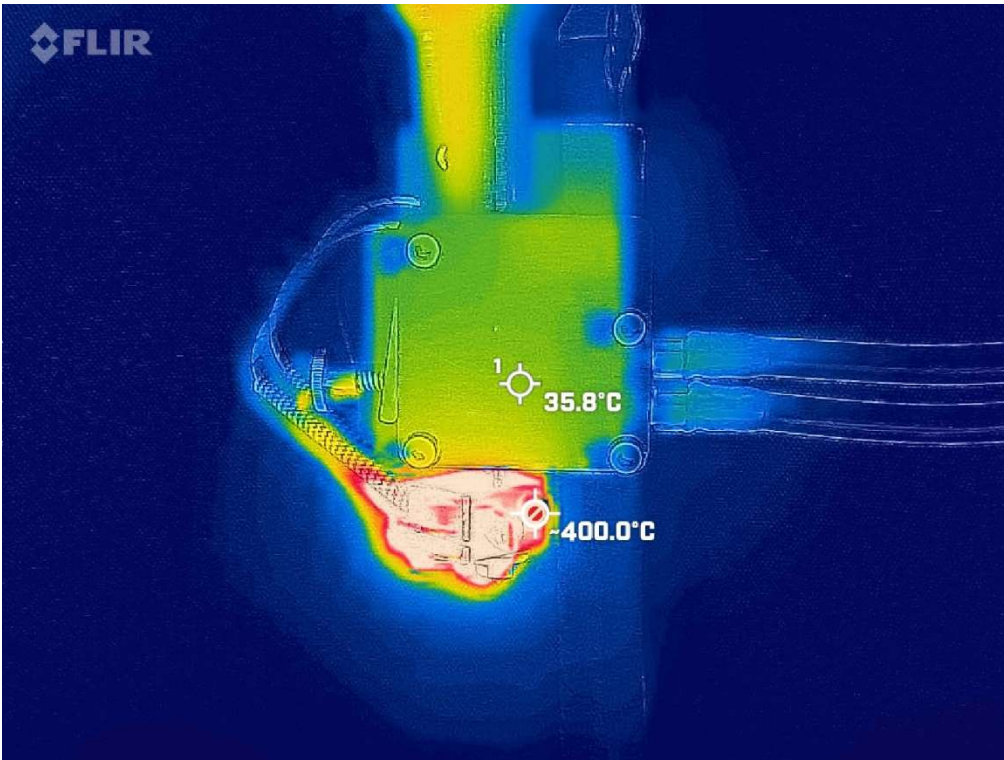
Teil 1 - Wärmebilder Phase 1.....	A-I
Teil 2 - Wärmebilder Phase 3 .....	A-VI
Teil 3 - Zeichnungen .....	A-IX



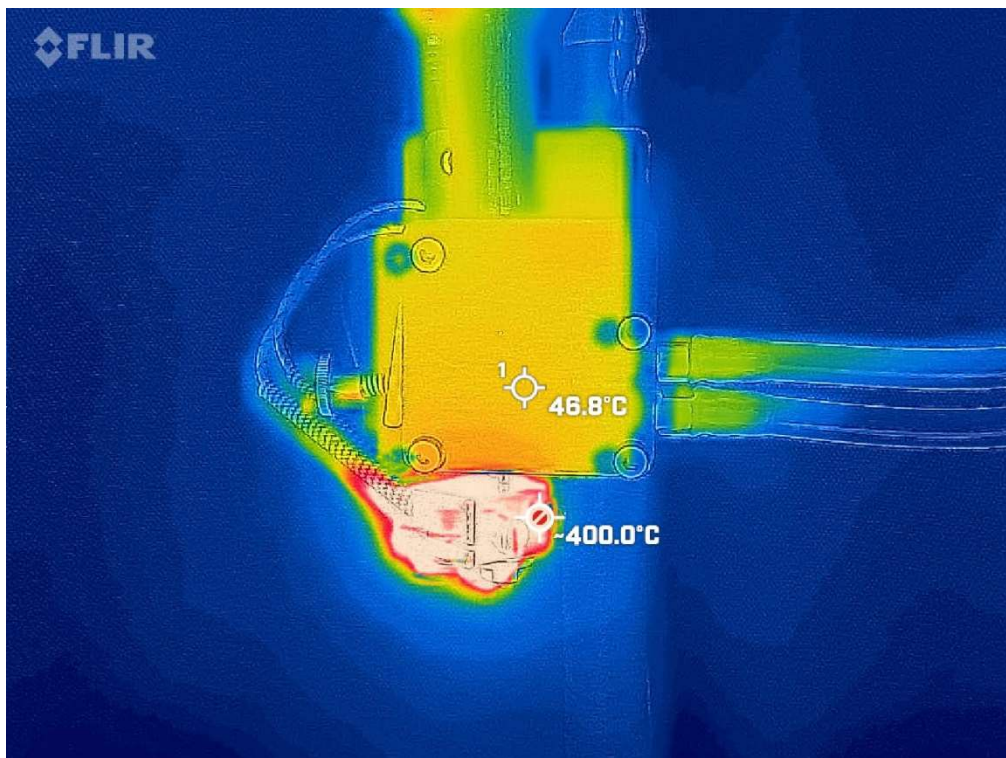
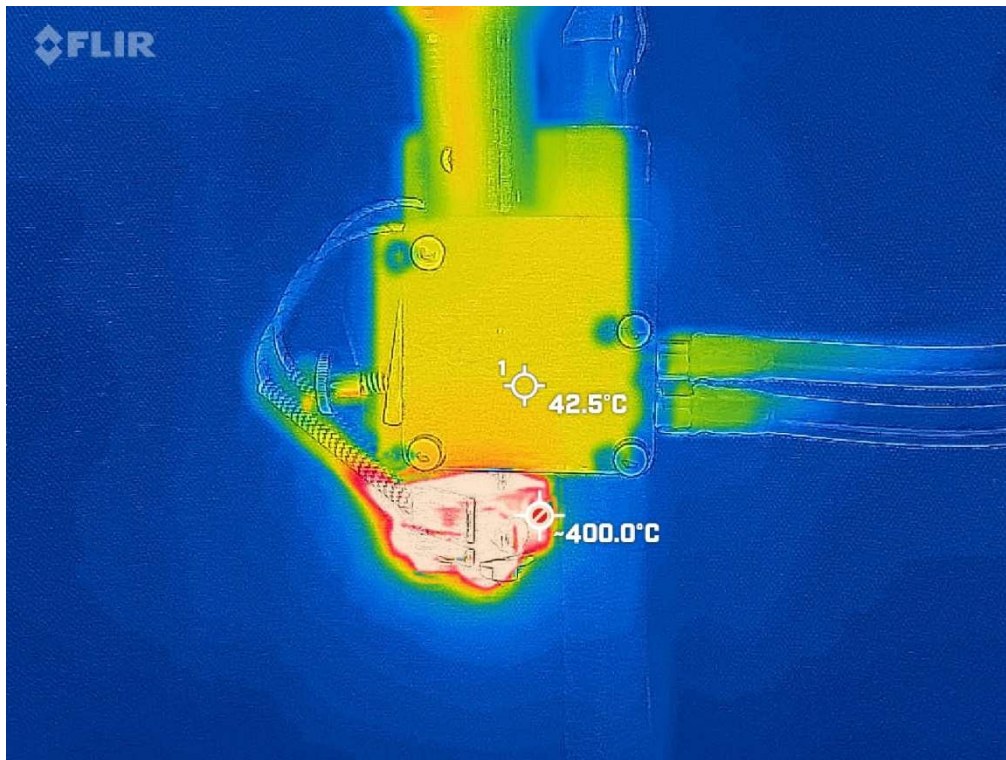
# Anlagen, Teil 1

Die folgenden Bilder zeigen die Wärmeverteilung und die Temperaturen zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung in Phase 1:

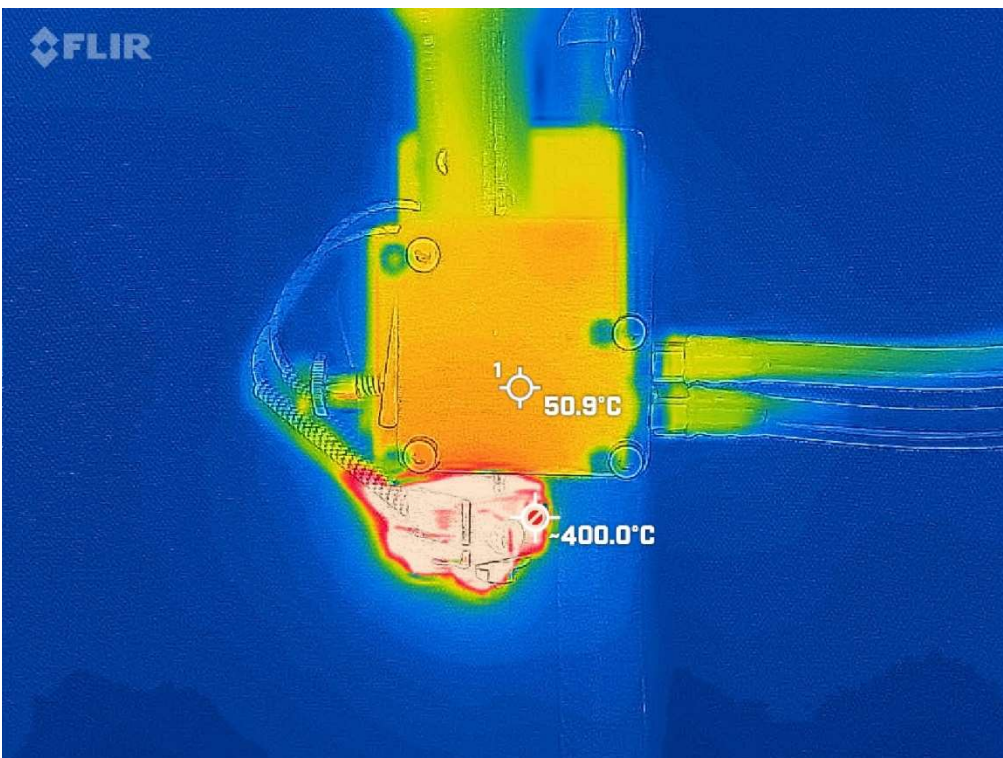
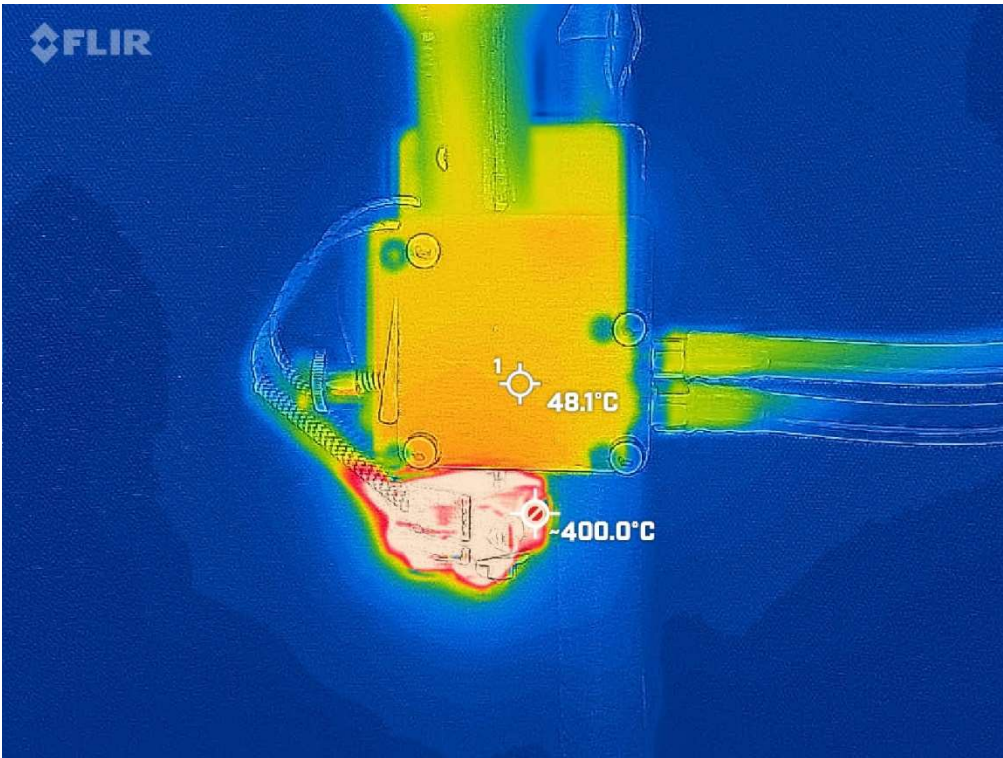




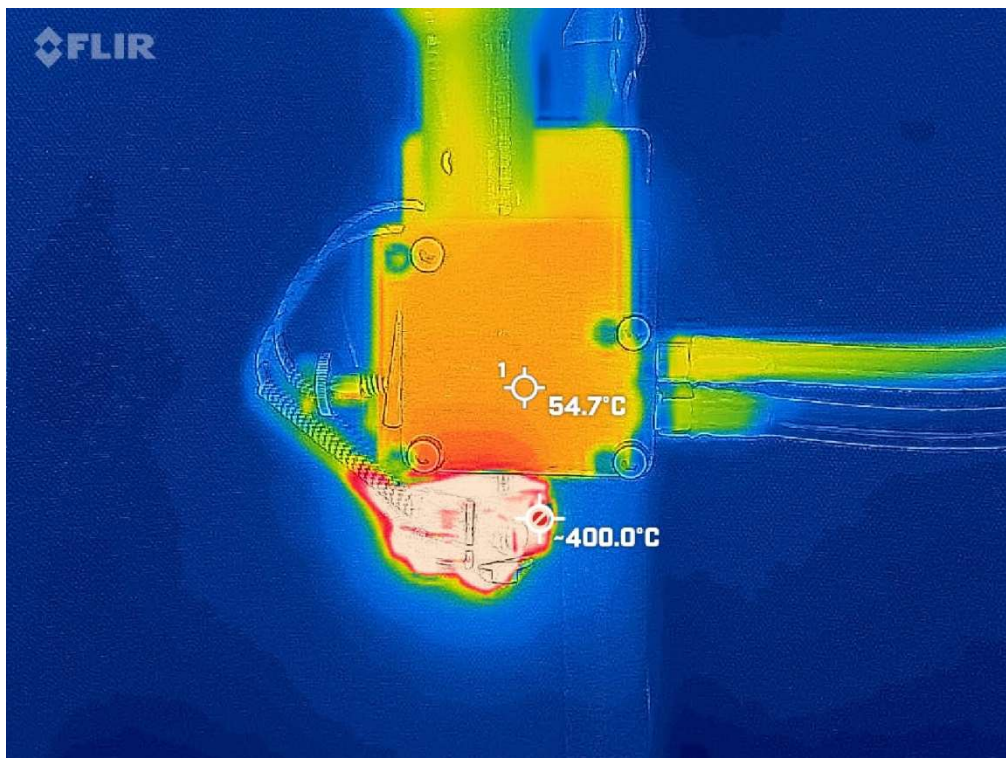
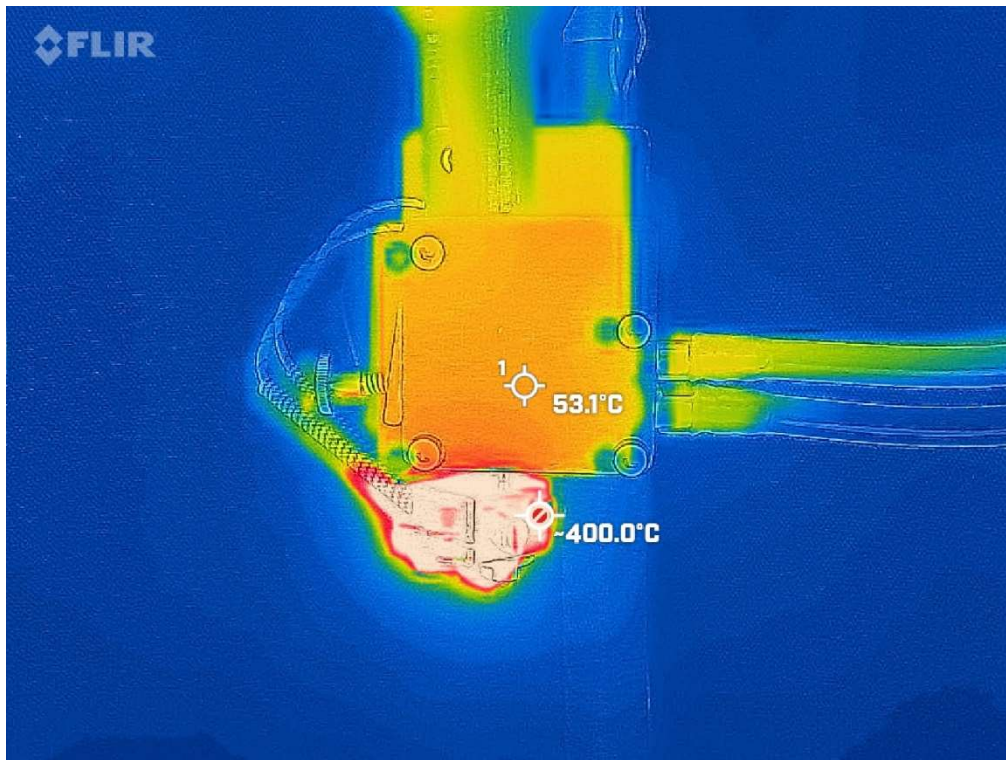








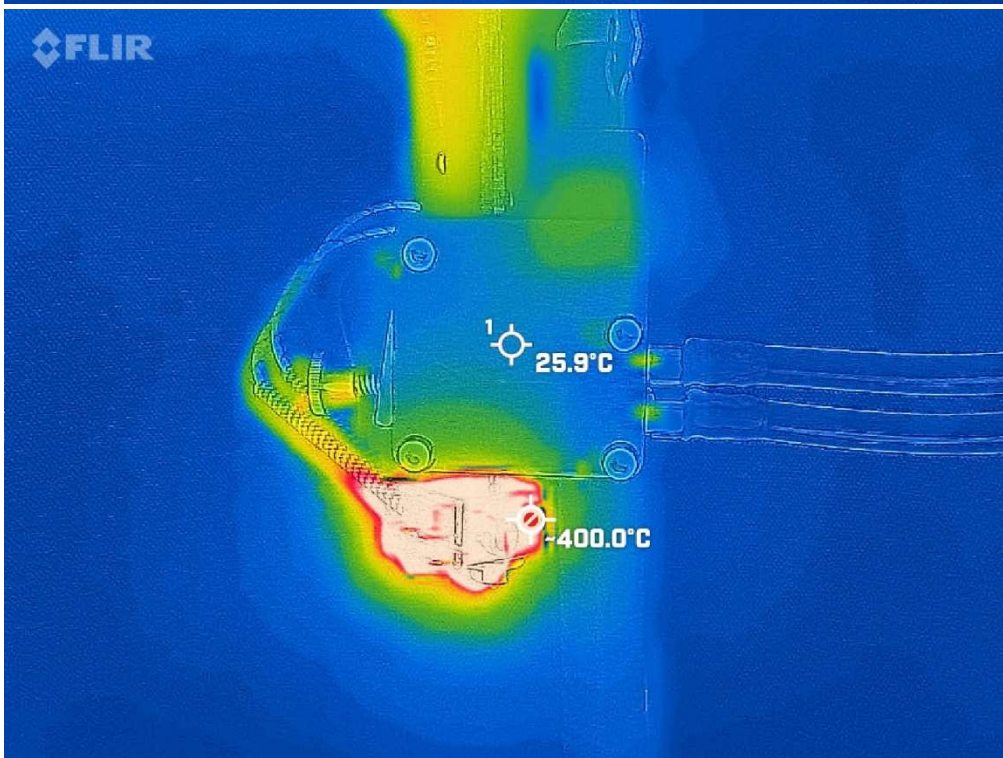
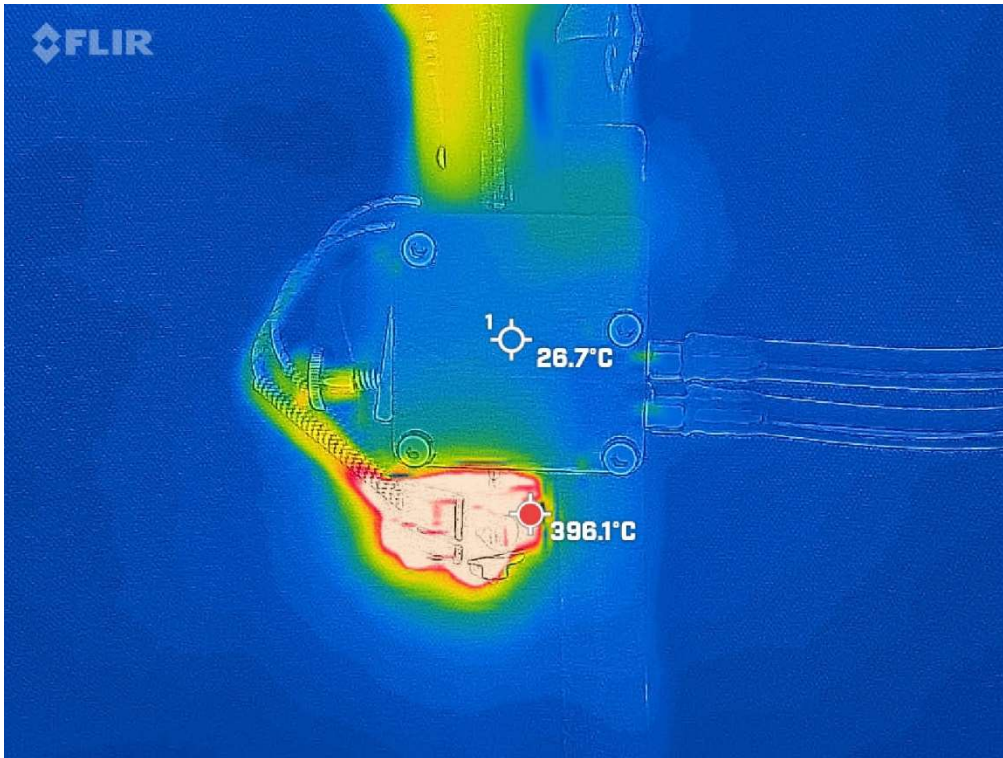


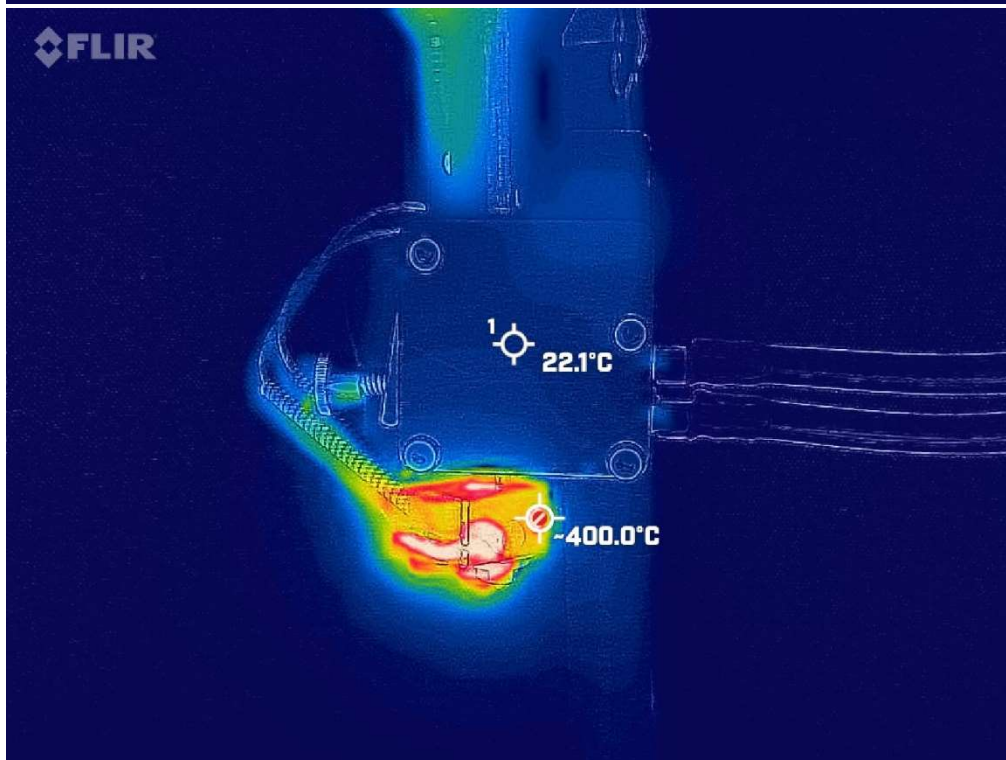
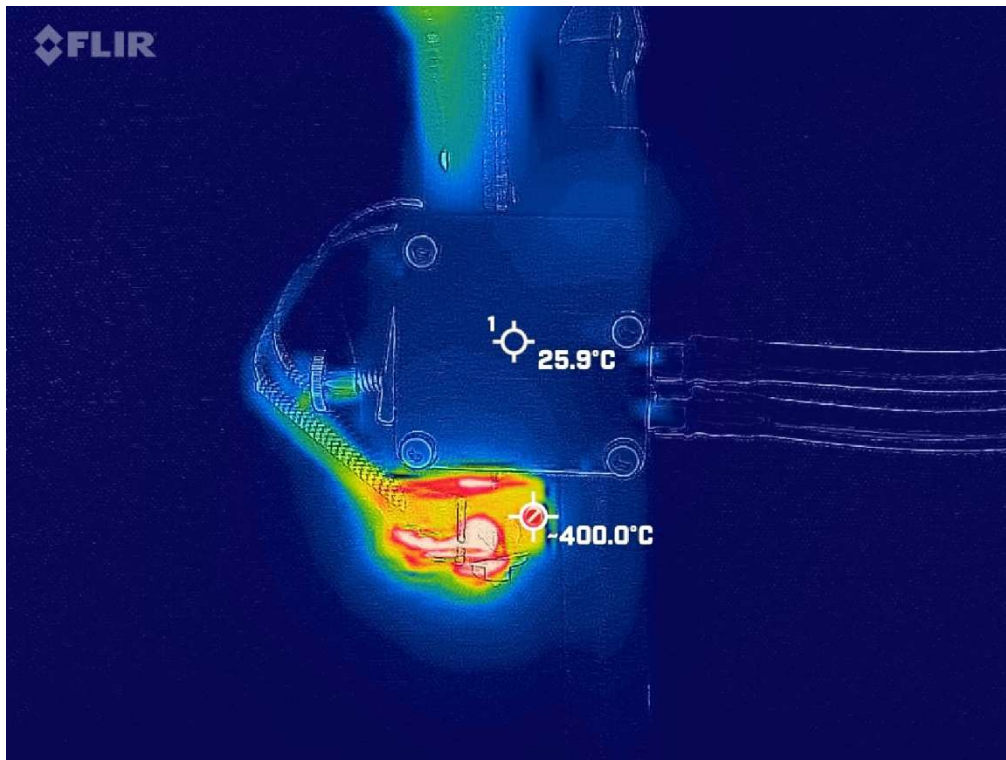




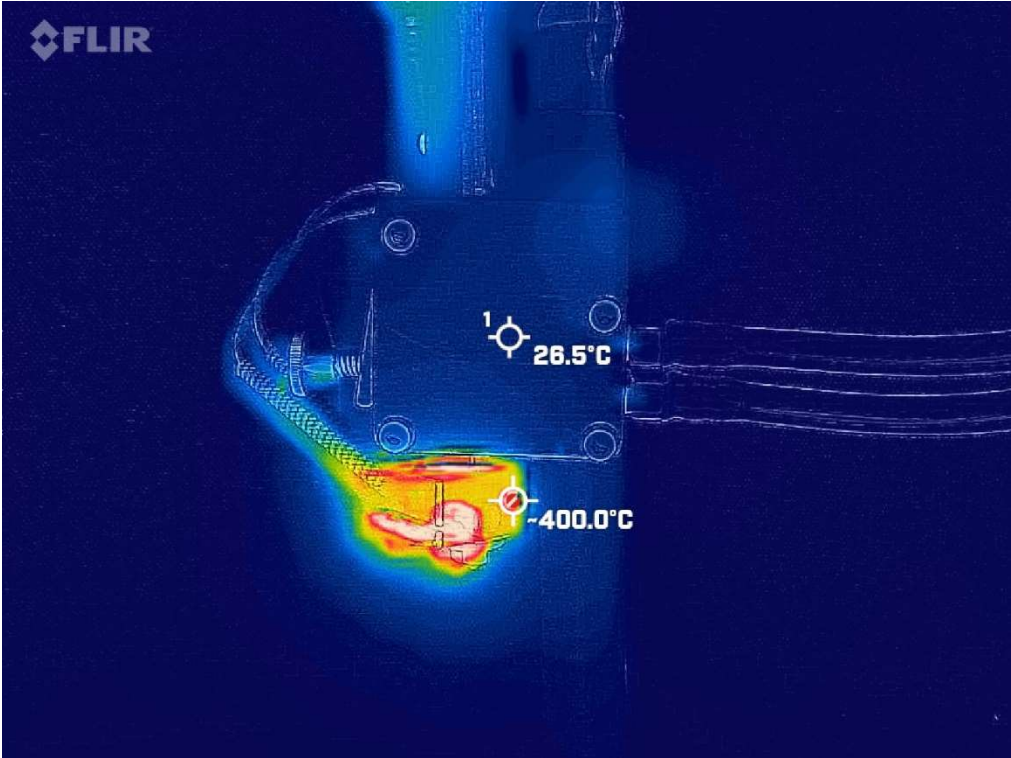
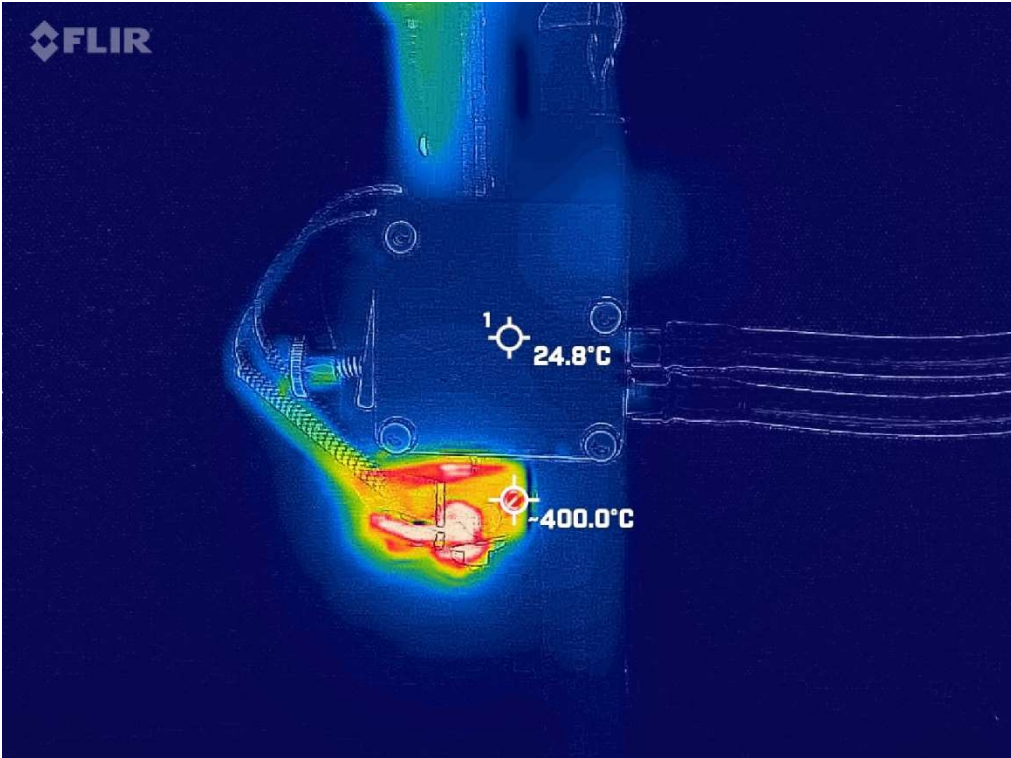
## Anlagen, Teil 2

Die folgenden Bilder zeigen die Wärmeverteilung und die Temperaturen zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung in Phase 3:







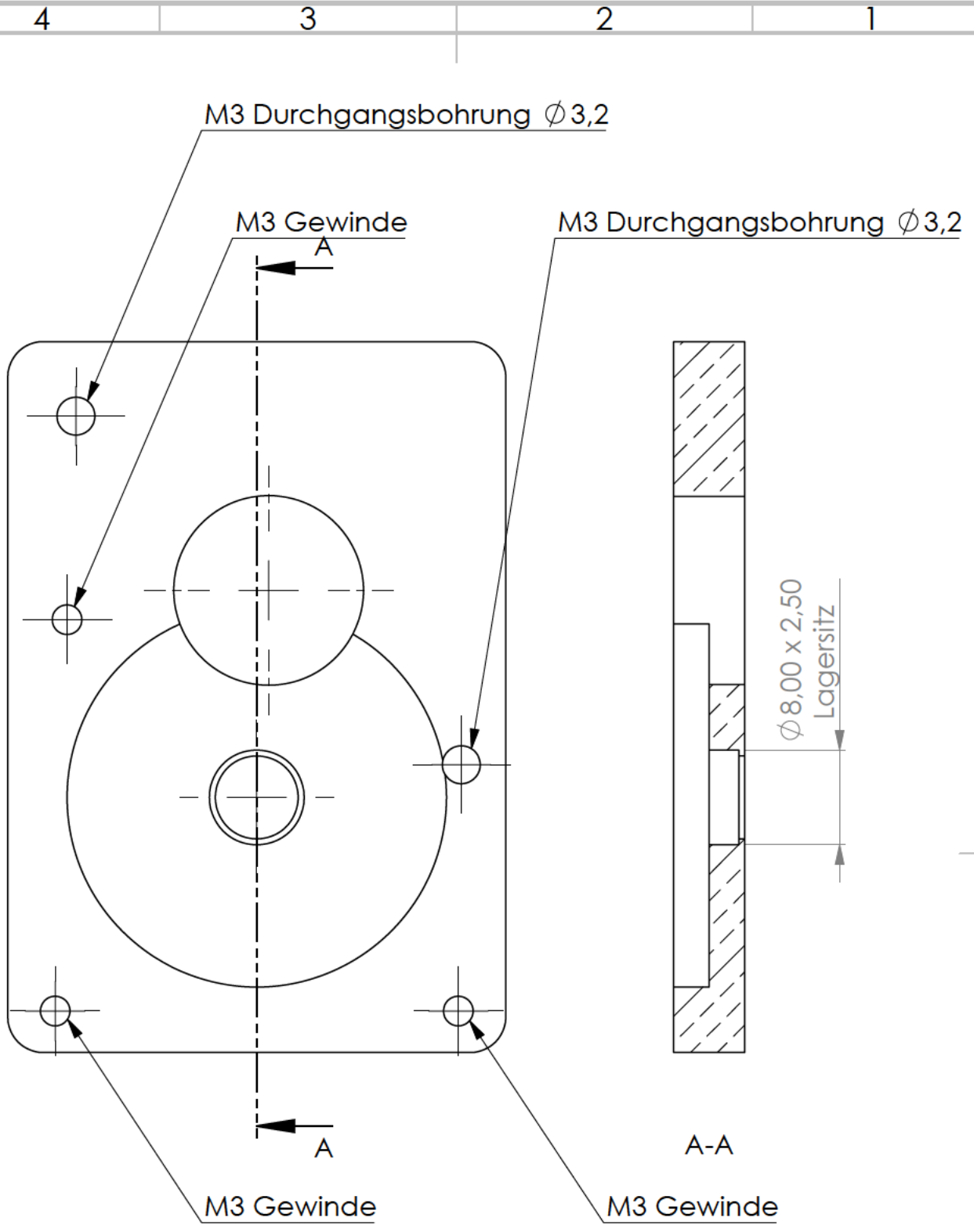


## **Anlagen, Teil 3**

Fertigungszeichnungen der einzelnen Bauteile







WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
 TOLERANZEN:  
 LINEAR:  
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN  
 UND SCHARFE  
 KANTEN  
 BRECHEN

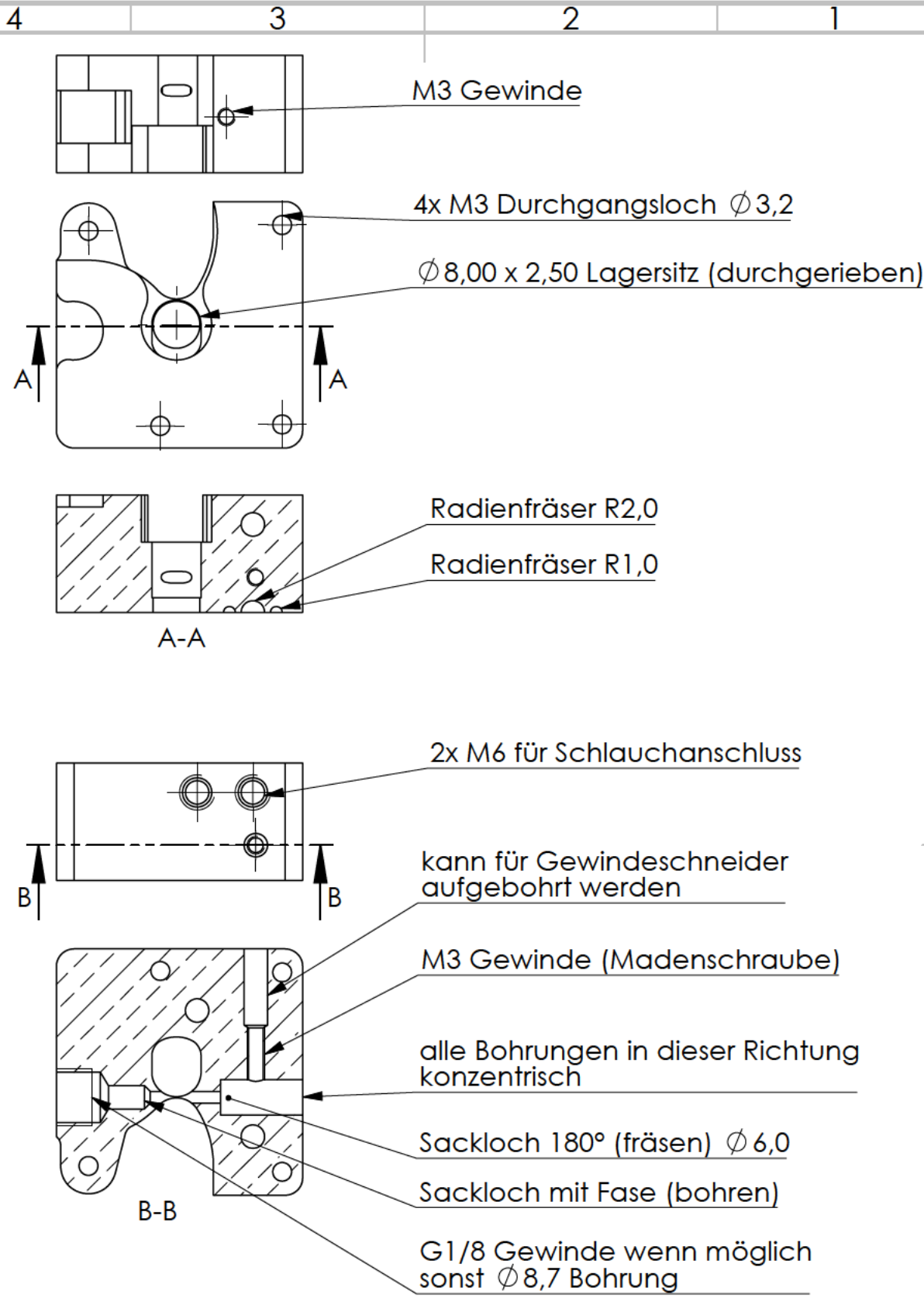
ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG	
WERKSTOFF:	
ZEICHNUNGSNR.	
<b>Top-Part</b>	
GEWICHT:	
MASSSTAB:2:1	
BLATT 1 VON 1	





WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
 TOLERANZEN:  
 LINEAR:  
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:  
 ENTGRATEN  
 UND SCHARFE  
 KANTEN  
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN  
 ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG	
ZEICHNUNGSNR.	<b>Middle-Part</b>
MASSSTAB 1:1	BLATT 1 VON 1

WERKSTOFF: GEWICHT: A4



4 3 2 1

F

F

E

E

D

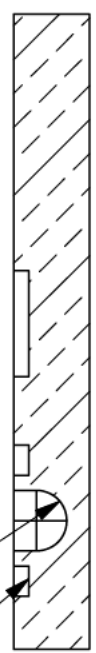
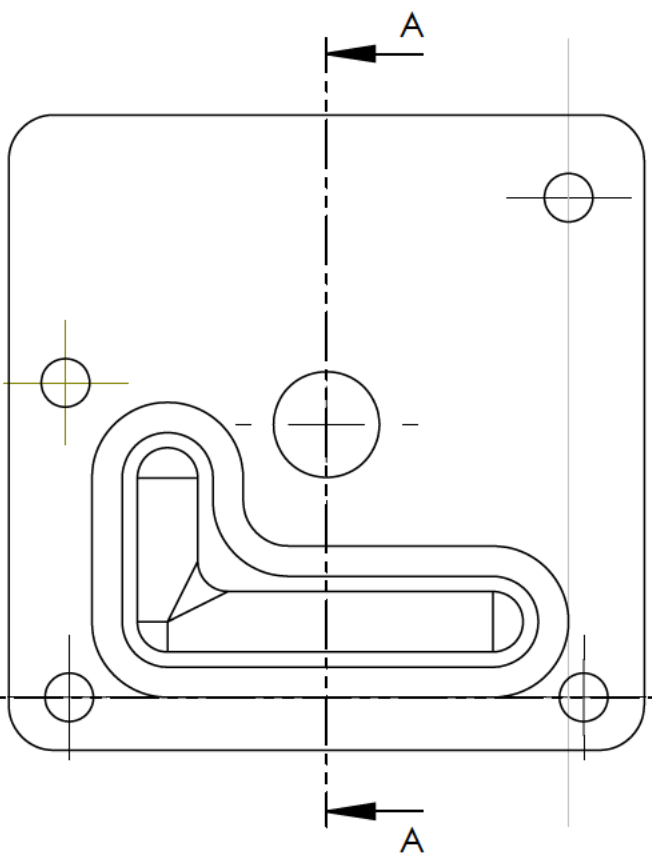
D

C

C

B

B



A-A

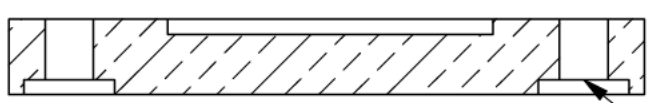
Radienfräser R2,0

Schafffräser  $\phi$  2,0

C

C

A



C-C

4x Bohrung  $\phi$  3,2  
Stirnsenkung  $\phi$  6 x 1

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
TOLERANZEN:  
LINEAR:  
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN  
UND SCHARFE  
KANTEN  
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM	
GEZEICHNET				
GEPRÜFT				
GENEHMIGT				
PRODUKTION				
QUALITÄT				

BENENNUNG	
ZEICHNUNGSNR.	
<b>Bottom-Part</b>	
A4	
GEWICHT:	MASSSTAB: 2:1
	BLATT 1 VON 1

4 3 2 1

A

A



4 3 2 1

F

F

E

E

D

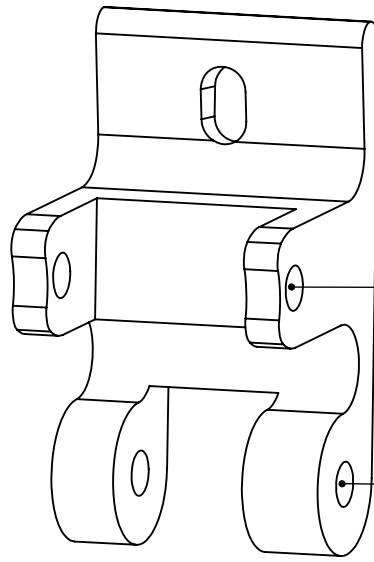
D

C

C

B

B



Ø 3,0 reiben  
 einseitig nur anreiben  
 (Presspassung)

Ø 3,0 Durchgangsloch  
 für M3-Schraube

**Maße angepasst  
 (siehe Hebel.SLDPRT)**

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
 TOLERANZEN:  
 LINEAR:  
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN  
 UND SCHARFE  
 KANTEN  
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM	
GEZEICHNET				
GEPRÜFT				
GENEHMIGT				
PRODUKTION				
QUALITÄT				

BENENNUNG	
WERKSTOFF:	ZEICHNUNGSNR.
	<b>Hebel</b>
GEWICHT:	MASSSTAB:2:1
	BLATT 1 VON 1

A

A

4 3 2 1





4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

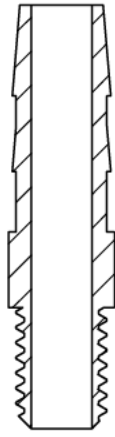
C

B

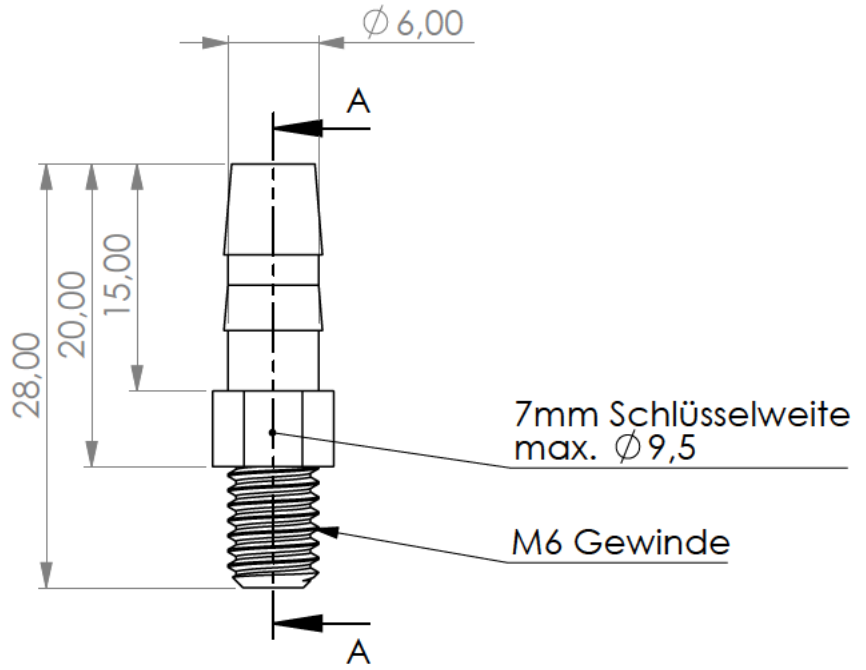
B

A

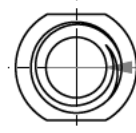
A



A-A



**2 Stk.**



$\phi 4,00$  innen

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
TOLERANZEN:  
LINEAR:  
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN  
UND SCHARFE  
KANTEN  
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM	
GEZEICHNET				
GEPRÜFT				
GENEHMIGT				
PRODUKTION				
QUALITÄT				

BENENNUNG	
WERKSTOFF:	ZEICHNUNGSNR.
	<b>Schlauchanschluss</b>
GEWICHT:	MASSSTAB:2:1
	BLATT 1 VON 1

A4

4 3 2 1



4 3 2 1

F

F

E

E

D

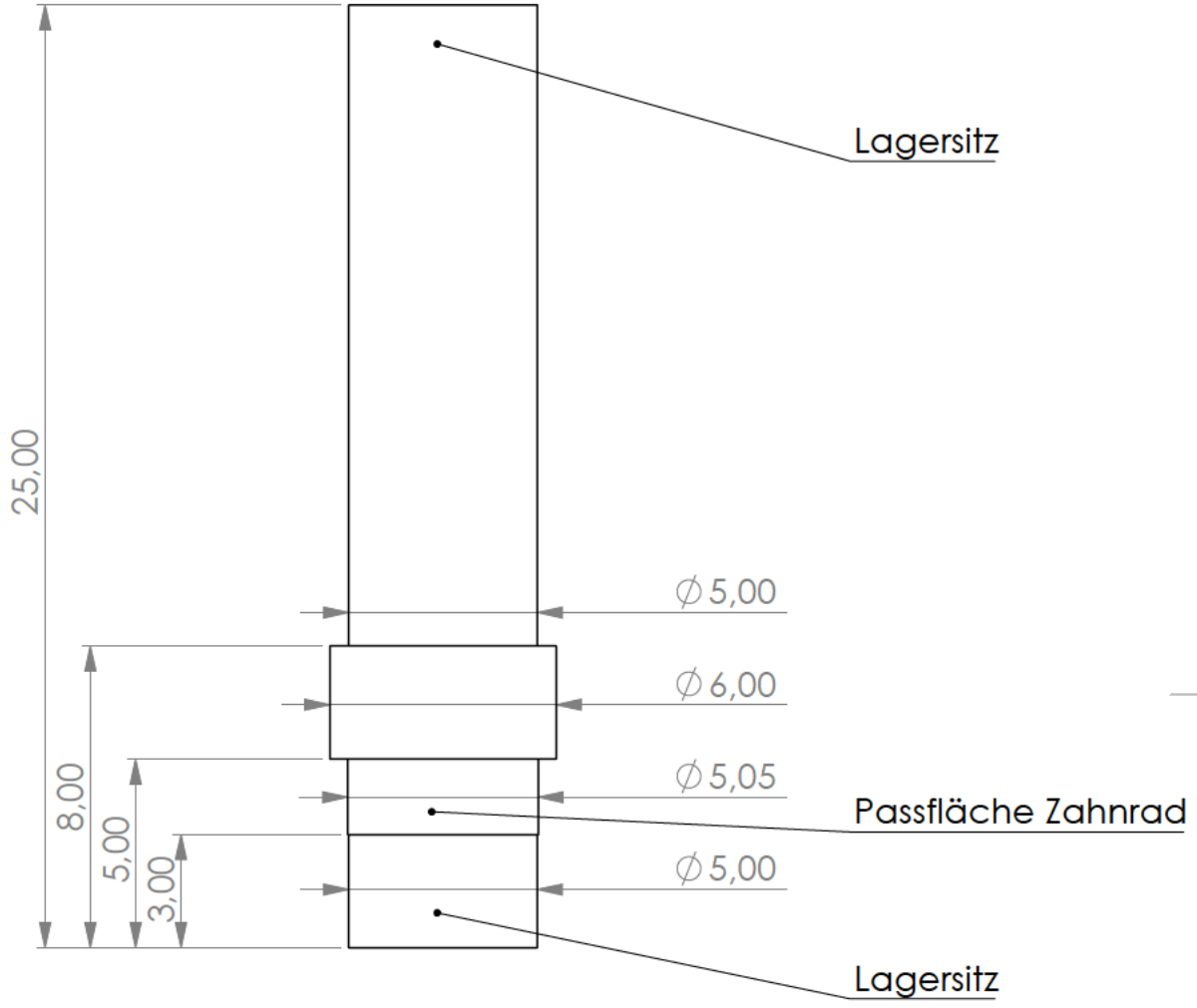
D

C

C

B

B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:  
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER  
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:  
TOLERANZEN:  
LINEAR:  
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN  
UND SCHARFE  
KANTEN  
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM	
GEZEICHNET				
GEPRÜFT				
GENEHMIGT				
PRODUKTION				
QUALITÄT				

BENENNUNG	
WERKSTOFF:	ZEICHNUNGSNR.
	<b>Welle_5x25</b>
	A4
GEWICHT:	MASSSTAB:5:1
	BLATT 1 VON 1

A

A

4 3 2 1



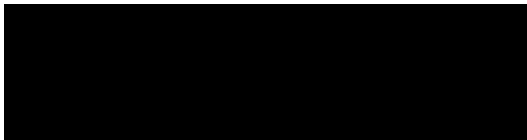
## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 28.06.2023



Benjamin Friedrich