

STUDIENARBEIT
des Studiengangs Informationstechnik
der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

THEMA

Entwicklung eines Systems zur Verfolgung von Objekten mit Hilfe einer Kamera

Julius Klodt

19. April 2022

Bearbeitungszeitraum	01.10.2021 - 19.04.2022
Matrikelnummer, Kurs	8431855, TINF19IT1
Ausbildungsfirma	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Betreuer	Jürgen Schultheis
Unterschrift des Betreuers	

Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich:

1. dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema *Entwicklung eines Systems zur Verfolgung von Objekten mit Hilfe einer Kamera* ohne fremde Hilfe angefertigt habe;
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe;
3. dass ich meine Studienarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe;
4. dass die eingereichte elektronische Fassung exakt mit der eingereichten schriftlichen Fassung übereinstimmt.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Mannheim, 14. April 2022

Julius Klodt

Kurzfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Methoden und Verfahren	3
3.1 C	3
3.2 Python	3
3.2.1 OpenCV	3
3.3 FreeCAD	4
3.4 Ultimaker Cura	4
3.5 3D-Drucker	4
4. Durchführung	6
4.1 Hardware	6
4.1.1 Präzise Anforderungen an die Hardware stellen	6
4.1.2 Vorhandene Projekte sichten und Umsetzungsideen sammeln	7
4.1.3 Konzepte erstellen und Hardware konzipieren	9
4.1.4 Hardware konstruieren	15
4.1.5 Benötigte Hardware einkaufen	32
4.1.6 Hardware zusammenbauen	32
4.2 Software	32
4.2.1 Anforderungen an die Software stellen	32
4.2.2 UML-Diagramm konzipieren	32
4.2.3 Hardwareansteuerung implementieren	32
4.2.4 Gesichtserkennung implementieren	32
4.2.5 Algorithmus zur Verarbeitung der Position des Gesichts zu Motorbewegungen entwickeln und implementieren	32
4.2.6 Hardwareansteuerung, Gesichtserkennung und Algorithmus zur Verarbeitung zusammenführen	32
4.3 Testen	32
4.3.1 Hardware auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen	32
4.3.2 Software auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen	32
4.4 Erweiterungen	32

5. Ergebnis	33
6. Reflektion	34
7. Ausblick	35
8. Danksagung	36
Literatur	I
A. Elektronikbox Komponenten	II

Abkürzungsverzeichnis

DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
IDE	Integrated Development Environment
CAD	Computer Aided Design
PLA	Polylactic acid

Abbildungsverzeichnis

3.1	“Cubic“ - Struktur	4
3.2	“Grid“ - Struktur	4
4.1	Pan-Bewegung[9]	6
4.2	Tilt-Bewegung[10]	6
4.3	Pan-Tilt Einheit der Firma ServoCity[7]	8
4.4	3D-gedruckter Pan-Tilt-Kopf mit Hilfe von einem Differential-Getriebe[1] . .	8
4.5	3D-gedruckte Pan-Tilt Einheit mit Spiegelreflexkamera[4]	9
4.6	3D-Modell der Pan-Tilt Einheit von Isaac879	10
4.7	Visualisierung des grundsätzlichen Aufbaus eines innen läufigen Zahnrads.	11
4.8	Statische Basis (1.) mit Mulde an Außenseite (2.). Hauptplattform (3.) mit Mulde an Innenseite (4.). Loch für Kugeln in Hauptplattform für Befüllung der Kugeln (5.).	11
4.9	Komponenten des Kugellagers. Hauptplattform (1.), Abstandhalter-Ring (2.), Kugeln (3.), statische Basis (4.)	12
4.10	Kugeln mit Abstandhalter-Ring (1.) in Hauptplattform. Statische Basis drüber.	12
4.11	Slider Aufbau: Bewegliche Plattform (3.) fährt mit Hilfe von starrem Zah- niemen (2.) über zwei Aluminiumrohre (1.)	13
4.12	Slider Aufbau: Motor (2.) mit Zahnräder (1.) ist an der Plattform befestigt. Der Zahniemen liegt so, dass das Zahnräder sich bei Drehung entlang des Zahniemens bewegen.	14
4.13	Slider Aufbau Querschnitt: Plattform mit Befestigungen (4.). Stahlkugeln (3.) innerhalb der Befestigungen, um über Aluminiumrohre (2.) zu rollen. Zahniemen (1.) mittig. Motor und Zahnräder wie in Abbildung 4.12 zur Übersichtlichkeit nicht zu sehen.	14
4.14	Box für sämtliche Elektronik auf der Hauptplattform und neben den Füßen für die Tilt-Bewegung.	15
4.15	Seitliche, auf dem Kopf stehende Ansicht eines Modells der Sony A7 RII. Länge der Kamera-Objektiv Kombination und Höhe der Sensormitte ange- geben.	16

4.16 Ansicht auf das Kameramodell von unten. Breite der Auflagefläche, Breite inklusive Zylinderförmige Befestigungen (Position in Abbildung 4.15 ersichtlich) und Abstand von Außenseite zu Mitte des Gewindelochs zur Befestigung der Kamera	16
4.17 Kamerahalterung: Auflagefläche für Kamera = 131 mm, komplette Breite für Kamera = 141 mm	16
4.18 Kamerahalterung Ansicht von oben: Löcher für Befestigung der Objektivstütze (1., r = 1,7 mm), Loch für Befestigung der Kamera (2., r = 3,2 mm), Optionale Löcher (3., r = 3,2 mm)	17
4.19 Kamerahalterung mit Befestigungsvorrichtungen an den Seiten. Tilt-Drehachse (1.), Löcher für Befestigung des Zahnrads (2.), Loch in der Mitte um in späteren Schritten Kugellager im Zahnräder zu befestigen (3.), Loch mit großem Durchmesser, sodass ein Kugellager rein passt (4.), Loch mit kleinerem Durchmesser, sodass Kugellager hält und fest gemacht werden kann (5.)	17
4.20 Sechseckige Vertiefungen von der Innenseite für Muttern (1.), Tilt-Drehachse (2.)	17
4.21 Frontale Ansicht auf die Objektivstütze. Die Form ist an das benutzte <i>Tamron</i> -Objektiv angepasst.	18
4.22 Löcher von unten (1.) und Einschübe für Muttern an den Seiten (2.) ermöglichen eine Befestigung an den dafür vorhergesehenen Löchern an der Kamerahalterung (4.18, 1.)	18
4.23 Zahnräder für Tilt-Drehung an Kamerahaltung. Löcher zur Befestigung an Kamerahalterung (1.). Loch mit unterschiedlichem Durchmesser innerhalb des Zahnrads zur Befestigung eines Kugellagers (2.)	19
4.24 Zahnräder für Tilt-Drehung andere Seite. Vertiefungen an Löchern für Schraubenköpfe (1.)	19
4.25 Zahnräder an Motor für Drehung der Kamerahalterung. Mittiges Loch für Motorpin (1.). Loch für Befestigung des Zahnrads an Motorpin (2.). Einschub für Mutter damit Schraube gegen Motorpin geschraubt werden kann (3.) . .	20
4.26 Verwendeter Nema 17 42x42mm Schrittmotor. Motorpin (1.)	20
4.27 Rechte Befestigung der Kamerahalterung. Löcher für Befestigung an Hauptplattform (1.). Loch um Kabel des Motors für die Tilt-Bewegung hindurch zu führen (2.). Langgezogenes Loch um Motorpin mit Zahnräder hindurch zu stecken (3.). Vier Langgezogene Löcher für die höhenverstellbare Befestigung des Motors (4.). Leichte Erhebung mit Loch um Kamerahalterung mit Zahnräder am Fuß zu befestigen und das Zahnräder bei Drehung nicht überall am Fuß Kontakt hat (5.). Seitliches Loch um Zahnräder an montiertem Motor festzuschrauben (6.).	21

4.28 Rechte Befestigung der Kamerahalterung. Ansicht von hinten-unten. Zwei Erhebungen in Hauptplattform für zusätzliche Stabilität (1.). Einschub für Mutter um Fuß mit weiterer Schraube an Hauptplattform zu schrauben (2.). Hexagon-förmige Vertiefung für Mutter, welche Schraube zur Befestigung der Kamerahalterung fixiert (3.)	21
4.29 Linker Befestigungsfuß. Vereinfachte Kopie der rechten Befestigung der Kamerahalterung 4.1.4.	22
4.30 Hauptplattform, Ansicht von oben. Befestigungslöcher für Befestigungsfuß (1.). Loch um Kabel des Slider-Motors von unten in die Elektronikbox zu führen (2.). Aushöhlung um Kugeln zwischen statische Basis und Hauptplattform einzufüllen (3.). Loch um Pan-Motor von oben auf die Hauptplattform zu montieren (4.). Alle weitere Löcher dienen zur Befestigung der Box für das Elektronik Management (5.).	22
4.31 Hauptplattform, Ansicht von unten. Löcher zur Montage des Pan-Motors (1.). Erhebungen mit sechseckigen Aushöhlungen für Muttern zur Befestigung der Befestigungsfüße (2.). Löcher zur Befestigung der Befestigungsfüße (3.). Einschübe für Muttern zur Befestigung des Kugeleinführungsstopfens (4.). Loch zum Einführen von Kugeln zwischen statische Basis und Hauptplattform (5.). Halbkreis-förmige Mulde für Kugeln zwischen statischer Basis und Hauptplattform (6.). Löcher zur Befestigung der Box für das Elektronik Management (7.)	23
4.32 Kugeleinführungsstopfen. Zwei Löcher an den Seiten um den Stopfen an die Hauptplattform zu befestigen (4.30, 3.)	24
4.33 Statische Basis. Mulde für Kugeln zwischen statischer Basis und Hauptplattform (1.). Innere doppelschräg Verzahnung (2.). Löcher mit sechseckiger Vertiefung für Befestigung des Sliders (3.). Loch zur Führung der Kabel des Slider-Motors (4.)	24
4.34 Slider Plattform, Ansicht von oben. Löcher zur Fixierung von Befestigungen an den Aluminiumrohren (1.). Löcher zur Befestigung der statischen Basis auf der Plattform (2.). Loch um Kabel des Slider-Motors durch statische Basis und Hauptplattform in die Elektronikbox zu führen (3.). Alle weiteren Löcher dienen der Fixierung der Slider-Motor Befestigung (z.B. 4.)	26
4.35 Halbe Befestigung an Aluminiumrohr. Kugelmulden mit Radius $r = 4,5\text{mm}$, für Kugeln mit Radius $r = 4\text{mm}$ (1.)	26
4.36 Halbe Befestigung an Aluminiumrohr. Seitliche Löcher zur Fixierung zweier identischen Hälften aneinander (1.). Löcher zur Befestigung an Slider-Plattform (2.)	26
4.37 Befestigung an Aluminiumrohr durch zwei identische Hälften. Modellhafte Stahlkugeln in den vorhergeschenen Mulden (1.)	27

4.38 Befestigung an Aluminiumrohr durch zwei identische Hälften. Modellhafte Stahlkugeln in den vorhergesehenen Mulden (1.). Alurohr zur Demonstration in der Mitte (2.)	27
4.39 Slider-Motor Befestigung in der Mitte auf Slider-Plattform. Vier Befestigungen an Aluminiumrohren. Zwei Umlenkrollen (1.) um Zahnriemen gegen Zahnrad am Motor zu drücken (2.)	28
4.40 Slider-Motor Befestigung, Ansicht von unten. Löcher zur Befestigung auf Slider-Plattform (1.). Löcher um Slider-Motor von unten zu befestigen (2.). Löcher um Umlenkrollen von unten zu befestigen (3.). Kabel des Slider-Motors werden durch seitliches halbkreis-Loch (5.) und dann durch mittiges großes Loch (5.) durch die Slider-Plattform, statische Basis und Hauptplattform in die Elektronikbox geführt.	28
4.41 Fuß zur Befestigung zweier Aluminiumrohre und eines Zahnriemens. Zwei Löcher um Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von $d = 20mm$ hindurch zu schieben (1.). Fixierung der Rohre mit Hilfe von Schrauben, welche durch Löcher von oben (3.) und Muttern in Einschüben (2.) auf die Röhren drücken. Loses Objekt (4.), welches mit Hilfe einer Schraube und einer Mutter in einem Einschub (5.) gegen die linke innere Wand des Loches drückt und somit einen Zahnriemen fixieren kann. Anschaulicher in Abbildung 4.42	29
4.42 Fuß zur Befestigung zweier Aluminiumrohre und eines Zahnriemens. Seitliches Loch für die Fixierung des Zahnriemens	30
4.43 Elektronikbox, Ansicht von oben ohne Deckel. Die Box ist in fünf Objekte geteilt. Boden mit Wänden. Front mit Löchern für einen Joystick (11.), ein Display (10.) und Zugang zu den seitlichen Eingängen (9.) des innen drin montierten Raspberry Pi (1.). Deckel über Display und Joystick. Plattform über Raspberry Pi für Montage des Arduino Nanos (8.). Nicht sichtbar auf dem Bild: Deckel über restlicher Elektronik. Die Wände sind für gute Luftzirkulation und Kühlung mit vielen Löchern bestückt. An der vorderen Seite ist ein großes Loch (2.), um an die USB-B Schnittstellen des Raspberry Pi's (1.) zu gelangen. Für die Kabel des Slider-Motors durch den Boden der Hauptplattform, ist ebenfalls in der Elektronikbox ein Loch vorhanden (3.). Für die Kabel des Pan-Motors ist ein Loch in der hinteren-seitlichen Wand positioniert (4.). Die Motortreiber zur Steuerung werden auf eine extra Platine gelötet und auf den Boden der Elektronikbox geschraubt (5.). Für die Kabel des Tilt-Motors ist an der hinteren Wand ein Loch so positioniert, dass es mittig des Befestigungsfußes des Tilt-Motors liegt (6.). Über dem montierten Raspberry Pi, wird zusätzlich zur Motor-Steuerung ein Arduino Nano (8.) verwendet. Dieser wird auf eine kleine Plattform (7.) geschraubt, welche auf den Raspberry Pi fixiert wird.	31

A.1	Elektronikbox - Boden mit Wänden	II
A.2	Elektronikbox - Front mit Löchern für Joystick, Display und Durchgang zu seitlichen Anschlüssen des Raspberry Pi's	II
A.3	Elektronikbox - Deckel der Front mit Befestigungsmöglichkeit für Joystick	III
A.4	Elektronikbox - Trennungsplattform zwischen Raspberry Pi und Arduino Nano	III
A.5	Elektronikbox - Deckel der restlichen Elektronikbox	III

Tabellenverzeichnis

1. Einleitung

In Zeiten der Covid-19-Pandemie wurden Videokonferenzen immer populärer. In Schulen, bei der Arbeit, beim Studium und selbst beim Sport werden Videokonferenzen mittlerweile genutzt. Dabei kommt es nicht selten vor, dass sich die Position einer Person verändert und nur noch schlecht im Bild zu sehen ist. Bei Verwendung mehrerer Bildschirme entsteht zusätzlich das Problem, dass je nach dem auf welchen Bildschirm geguckt wird, nur das Profil und nicht die Frontalansicht des Gesichts zu sehen ist.

Im Rahmen einer Studienarbeit der **Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)** Mannheim ist daraus die Idee entstanden, ein System zu entwickeln, welches die genutzte Kamera automatisch so bewegt, dass die gefilmte Person immer mittig und frontal im Bild zu sehen ist.

Dabei soll sowohl Hardware als auch Software erstellt werden. Um die benötigte Präzision der Hardware zu gewährleisten kam die Idee, das System 3D zu drucken. Alle Komponenten sollen dafür modelliert und gedruckt werden. Die Software soll die Motor und Peripherie Ansteuerung beinhalten. Des Weiteren eine Gesichtserkennung und ein Algorithmus zur Weiterverarbeitung der Gesichtsposition zu Motorbewegungen.

2. Aufgabenstellung

Die Studienarbeit wurde in folgende Aufgaben unterteilt:

Aufgabe 1: Hardware

- 1.1. Präzise Anforderungen an die Hardware stellen
- 1.2. Vorhandene Projekte sichten und Umsetzungsideen sammeln
- 1.3. Konzepte erstellen und Hardware konzipieren
- 1.4. Hardware konstruieren
- 1.5. Benötigte Hardware einkaufen
- 1.6. Konstruierte Teile mit 3D-Drucker drucken und nachbearbeiten
- 1.7. Hardware zusammenbauen

Aufgabe 2: Software

- 2.1. Anforderungen an die Software stellen
- 2.2. UML-Diagramm konzipieren
- 2.3. Hardwareansteuerung implementieren
- 2.4. Gesichtserkennung implementieren
- 2.5. Algorithmus zur Verarbeitung der Position des Gesichts zu Motorbewegungen
- 2.6. Hardwareansteuerung, Gesichtserkennung und Algorithmus zur Verarbeitung zusammenführen

Aufgabe 3: Testen

- 3.1. Hardware auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen
- 3.2. Software auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen

Aufgabe 4: Erweiterungen

3. Methoden und Verfahren

In diesem Kapitel werden die zugrunde liegenden Theoretischen Kenntnisse, die Methodik und Verfahrensgrundlage erörtert. Zu dem wird erklärt, warum diese genutzt wurden.

3.1. C

Die Hardwareansteuerung erfolgt mit der Programmiersprache C, welche nativ auf dem verwendeten *Arduino nano* unterstützt wird. C wurde ursprünglich von Dennis Ritchie in den frühen 1970er Jahren an den Bell Laboratories entwickelt und basiert auf der von Ritchie und Ken Thompson entwickelten Programmiersprache B [8].

Die Möglichkeit auf Hardwarekomponenten direkt zuzugreifen, macht C sehr hardwarenah [3]. Dies bringt auch den Vorteil mit sich, dass C sehr schnell ist. Um mit zu programmieren und den fertigen Code auf den Arduino nano zu übertragen wurde die Integrated Development Environment (IDE) Arduino-Code mit der Version 1.8.13 verwendet.

3.2. Python

Für die Gesichtserkennung und die Weiterverarbeitung der Gesichtspositionsdaten wird die Programmiersprache Python verwendet. Python ist eine objektorientierte, höhere Programmiersprache [6] und wird häufig für Anwendungen im Bereich des Maschinellen Lernens verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Python Version 3.9.7 verwendet.

3.2.1. OpenCV

OpenCV ist eine Open-Source Bibliothek welche für digitale Bildverarbeitung genutzt wird und in den Programmiersprachen Java, C, C++ und Python verwendet werden kann [OpenCV]. Die OpenCV Bibliothek bietet unter anderem Algorithmen zur Gesichtserkennung an und wird daher für diese Arbeit mit der Version 4.5.5 genutzt.

3.3. FreeCAD

FreeCAD ist ein Open-Source Computer Aided Design ([CAD](#))-Programm. Es wird für die Konstruktion und Modellierung von Objekten genutzt [2]. In Rahmen dieser Arbeit wird FreeCAD mit der Versionsnummer 0.19 genutzt, um die benötigten Teile für das Verfolgungssystem als 3D-Modelle zu konstruieren.

3.4. Ultimaker Cura

“Ultimaker Cura ist eine Open-Source Slicer-Software zur Umwandlung von 3D Modellen in G-Code (Druckerbefehle für 3D-Drucker)“[11].

Für diese Arbeit wurde Ultimaker Cura mit der Version 4.12.1 genutzt. Das Programm bietet vielseitige Möglichkeiten an, wie ein 3D-Modell gedruckt werden soll. Zum Beispiel kann manuell eingestellt werden, wie viel Prozent des Innenraums eines 3D-Modells mit Material gefüllt werden soll. Diese Einstellung wird automatisch mit einer einstellbaren Inneren Struktur umgesetzt. Im folgenden sind zwei unterschiedliche innere Strukturen zu sehen, welche automatisch von Ultimaker Cura produziert worden sind. Beide Abbildungen zeigen die 44. Druckschicht eines Zahnrads mit 20% Füllung des Innenraums.

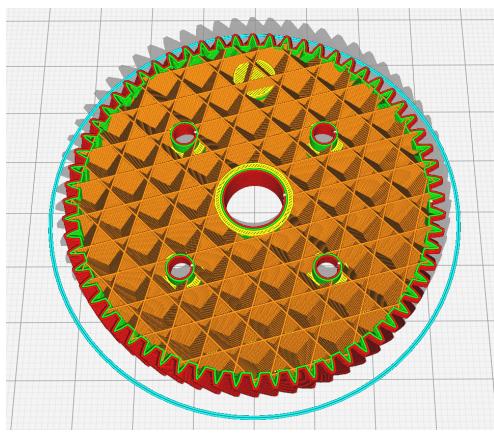


Abbildung 3.1.: “Cubic“ - Struktur

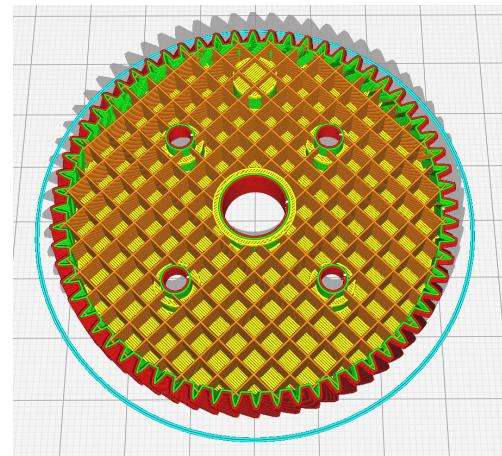


Abbildung 3.2.: “Grid“ - Struktur

3.5. 3D-Drucker

3D-Drucken ist ein additives Verfahren, in welchem ein dreidimensional beweglicher Druckerkopf, Material Schicht für Schicht übereinander lagert.

Präzises, schnelles, unkompliziertes und kostengünstiges 3D-Drucken ist für den Privatanwender erst in dem letzten Jahrzehnt möglich geworden.

3. Methoden und Verfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene 3D-Drucker genutzt, um selbst konstruierte Objekte mit dem Kunststoff **Polylactic acid (PLA)** zu drucken.

1. Ultimaker 2+
2. Renkforce RF2000v2
3. Creality Ender 3 V2

4. Durchführung

Dieses Kapitel erörtert die Durchführung der Aufgabenstellung. Die Strukturierung gleicht dem Aufbau der Aufgabenstellung.

- Hardware
- Software
- Testen
- Erweiterungen

4.1. Hardware

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die Hardware entwickelt wurde.

4.1.1. Präzise Anforderungen an die Hardware stellen

Damit das System eine Person im Bild einer Kamera verfolgen kann, muss gewährleistet sein, dass das System die Kamera drehen und neigen kann. Diese Drehbewegungen werden als Pan und Tilt bezeichnet.



Abbildung 4.1.: Pan-Bewegung[9]



Abbildung 4.2.: Tilt-Bewegung[10]

Die Pan-Bewegung soll dabei 360° durchführbar sein damit das System möglichst vielseitig genutzt werden kann. Die Tilt-Bewegung soll aus der Horizontalen mindestens 45° nach unten und oben ausführbar sein. Sowohl die Pan, als auch die Tilt Bewegung soll eine Mindestverstellgenauigkeit von einem halben Grad aufweisen. Die Geschwindigkeit der

4. Durchführung

Pan-Bewegung soll mindestens 180° pro 3 Sekunden betragen. Die Geschwindigkeit der Tilt-Bewegung soll mindestens 90° pro 2 Sekunden betragen.

Um zu gewährleisten, dass immer die Frontalansicht einer Person zu sehen ist, muss sich die Kamera mindestens in einer Achse im Raum bewegen können. Diese Arbeit beschränkt sich dabei auf eine gerade Achse. Die Bewegung entlang der Achse soll mindestens 50 cm betragen. Die Verstellgenauigkeit soll mindestens 1 mm betragen. Die Geschwindigkeit soll mindestens 10 cm pro Sekunde betragen.

Das System soll die beschriebenen Anforderungen mit der vorhandenen Kamera-Objektiv Kombination Sony A7 RII und Tamron 28-75 mm F2.8 Di III RXD erfüllen. Diese Kombination wiegt zusammen ca. 1,1 kg.

Hier eine tabellarische Übersicht der Anforderungen:

Anforderungsbeschreibung	Wert
Pan-Bewegung, Drehbereich	$\geq 360^\circ$
Pan-Bewegung, Verstellgenauigkeit	$\leq 0.5^\circ / \text{Schritt}$
Pan-Bewegung, Geschwindigkeit	$\geq 180^\circ / 3 \text{ Sekunden}$
Tilt-Bewegung, Drehbereich aus der horizontalen	$\geq \pm 45^\circ$
Tilt-Bewegung, Verstellgenauigkeit	$\leq 0.5^\circ / \text{Schritt}$
Tilt-Bewegung, Geschwindigkeit	$\geq 90^\circ / 2 \text{ Sekunden}$
Bewegung im Raum, entlang einer räumlichen Achse	$\geq 50\text{cm}$
Bewegung im Raum, Verstellgenauigkeit	$\leq 1\text{mm} / \text{Schritt}$
Bewegung im Raum, Geschwindigkeit	$\leq 10\text{cm} / \text{Sekunde}$
Gewicht der zu bewegenden Kamera	$\geq 1.1\text{kg}$

4.1.2. Vorhandene Projekte sichten und Umsetzungsideen sammeln

Um Ideen für das Projekt zu sammeln, wurde recherchiert was für Projekte schon vorhanden sind und welche hilfreich bei der Entwicklung der Hardware sein könnten. Bei der Recherche sind verschiedene Konzepte öfter aufgetaucht.

1. Einseitige Befestigung der Kamera entlang der auszuführenden Tilt-Bewegung-Achse

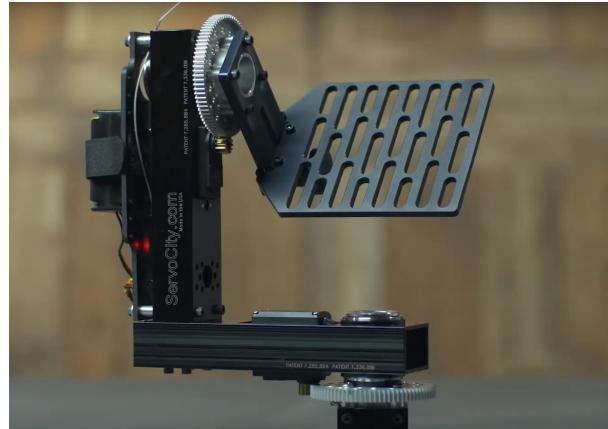


Abbildung 4.3.: Pan-Tilt Einheit der Firma ServoCity[7]

In Abbildung 4.3 ist zu sehen, dass die drehende Kamera Befestigung nur an der sich drehenden Seite befestigt ist. Dadurch wird ein starker einseitiger Druck aufgebaut, wodurch es notwendig ist, mit sehr stabilen Materialien wie Metallen zu arbeiten. Gleiches ist bei der Pan-Achse ersichtlich.

2. 3D-gedruckter Pan-Tilt-Kopf mit Differenzial Getriebe.

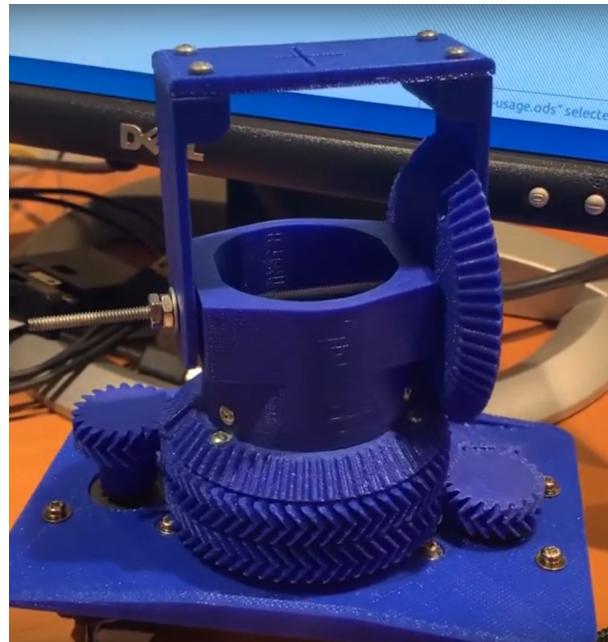


Abbildung 4.4.: 3D-gedruckter Pan-Tilt-Kopf mit Hilfe von einem Differential-Getriebe[1]

Der in Abbildung 4.4 zusehende Pan-Tilt-Kopf nutzt ein Differentialgetriebe, um sowohl die Pan, als auch die Tilt Bewegung mit Motoren auszuführen, welche beide in der gleichen Achse montiert werden können.

3. Beidseitige Befestigung der Kamera entlang der auszuführenden Tilt-Bewegung-Achse



Abbildung 4.5.: 3D-gedruckte Pan-Tilt Einheit mit Spiegelreflexkamera[4]

Abbildung 4.5 zeigt ein funktionierendes Pan-Tilt System mit einer montierten Spiegelreflexkamera. Zu sehen ist, dass im Gegensatz zu dem System auf Abbildung 4.3, die Kamera beidseitig entlang der Tilt-Achse befestigt ist. Dadurch verteilt sich das Gewicht der Kamera gleichmäßiger.

Nach Betrachtung aller Konzepte, bietet sich für die Umsetzung dieser Studienarbeit der grundsätzliche Aufbau des dritten gezeigten Systems in Abbildung 4.5 am besten an. In dem Video, aus welchem das Bild entnommen wurde, wird gezeigt, dass das System mit einer Spiegelreflexkamera tadellos funktioniert und mit Hilfe von einem billigen 3D-Drucker für Privatanwender gebaut werden kann. Somit müssen keine hochpräzisen Metallarbeiten erledigt werden, welche voraussichtlich deutlich teurer wären. Das Differential-System hat den Konstruktions-Nachteil, dass bei Abschaltung der Motoren, die Kamera aufgrund des Gewichts, unkontrolliert nach vorne fallen würde.

4.1.3. Konzepte erstellen und Hardware konzipieren

Nach der Recherche wurde sich dazu entschieden, die Grundidee des Projekts aus Abbildung 4.5 als Orientierung zu nutzen. Ein bereits vorhandenes 3D-Modell des System, hat dabei geholfen, das entwickelte System und die dahinterstehenden Konzepte näher zu betrachten und zu verstehen[5].

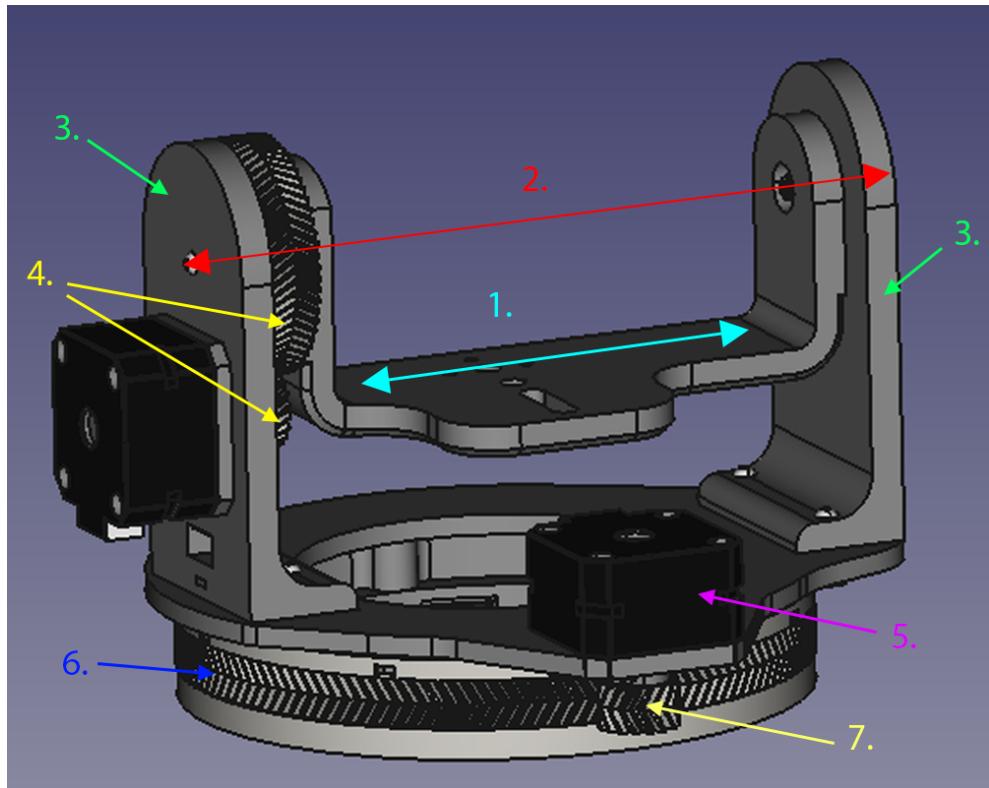


Abbildung 4.6.: 3D-Modell der Pan-Tilt Einheit von Isaac879

Tilt-Bewegung

Um die Tilt-Bewegung zu realisieren, wird das in Abbildung 4.6 gezeigte Prinzip übernommen. Zu sehen ist, dass die Kamera auf einer Fläche (4.6, 1.) unterhalb der Drehachse (4.6, 2.) montiert wird. Dadurch ergibt es sich, dass der Schwerpunkt der Kamera auf der Höhe der Drehachse ist. Des Weiteren fällt die Kamera bei Ausfall der Motoren somit immer wieder in die Grundposition zurück, wodurch keine ungewollten Effekte entstehen. Die groben Proportionen der seitlichen Befestigungsfüße (4.6, 3.) für die Tilt-Achse und die Zahnradübersetzung (4.6, 4.) werden aus dem Projekt von "Isaac879" übernommen. Beides hat sich in dem dazugehörigen Video [4] als gut umsetzbar und druckbar dargestellt. Des Weiteren werden durch d

Pan-Bewegung

In Abbildung 4.6 ist zudem zu sehen, dass die Einheit die die Tilt-Bewegung durchführt und der frontal zu sehende Motor (4.6, 5.) , zusammen auf einer Plattform befestigt sind. Diese Plattform ist so gelagert, dass sich diese unabhängig von dem weiter unterliegendem Teil (4.6, 6.) drehen kann. Dieses Teil ist fixiert und an der außen Seite mit Zähnen bestückt. Dadurch kommt es zu einer Pan-Bewegung der ganzen oberen Plattform, sobald

der Motor (4.6, 5.) sich dreht und das Zahnrad (4.6, 7.) um die fixierte Basis (4.6, 6.) fährt.

Dieses Konzept, dass sich eine Hauptplattform um eine statische Basis dreht, wird für diese Studienarbeit übernommen. Um zu gewährleisten, dass System weniger Fehleranfällig durch Einflüsse von außen ist, wird der Motor (4.6, 5.) mit dem Zahnrad (4.6, 7.) die Pan-Bewegung nicht außerhalb der statischen Basis durchführen, sondern wie in Abbildung 4.7 zu sehen, innen-läufig.

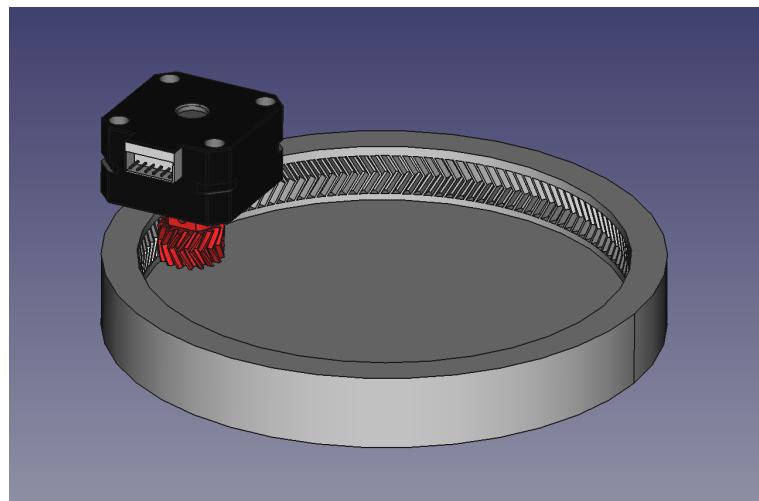


Abbildung 4.7.: Visualisierung des grundsätzlichen Aufbaus eines innen läufigen Zahnrads.

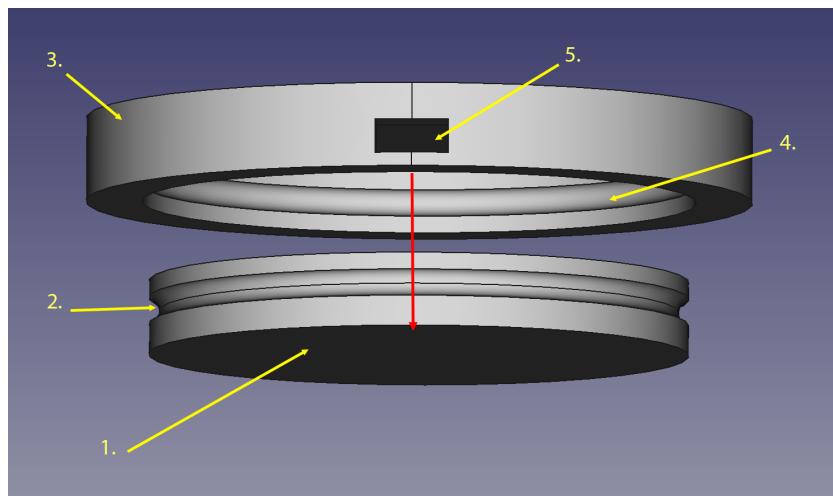


Abbildung 4.8.: Statische Basis (1.) mit Mulde an Außenseite (2.). Hauptplattform (3.) mit Mulde an Innenseite (4.). Loch für Kugeln in Hauptplattform für Befüllung der Kugeln (5.).

Kugellager

Damit die Drehbewegung der Hauptplattform um die statische Basis herum gewährleistet wird, verbindet ein Kugellager beide Teile miteinander. Für die Realisierung des Kugellager,

wird die Hauptplattform (4.8, 3.) um die Basis (4.8, 1.) gestülpt und jeweils die Außenseite der statischen Basis (4.8, 2.) und die Innenseite der Hauptplattform (4.8, 4.) erhalten eine rundliche Mulde. Nach dem übereinander Stülpen sind die Mulden nun auf einer Höhe, sodass durch ein Loch in der Hauptplattform (4.8, 5.) Kugeln in die Donut-förmige Aushöhlung eingeführt werden können.

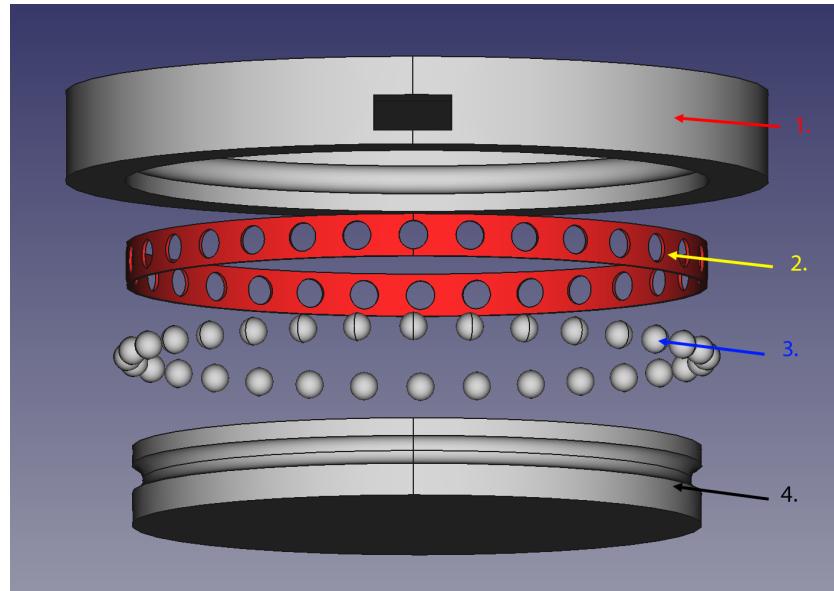


Abbildung 4.9.: Komponenten des Kugellagers. Hauptplattform (1.), Abstandhalter-Ring (2.), Kugeln (3.), statische Basis (4.)

Damit nicht die ganze Mulde mit Kugeln gefüllt werden muss, kommt ein Ring (4.9, 2.) zwischen Hauptplattform (4.9, 1.) und Basis (4.9, 4.). Dieser Ring ist dafür da, die eingeführten Kugeln (4.9, 3.) an ihrem Platz zu halten.

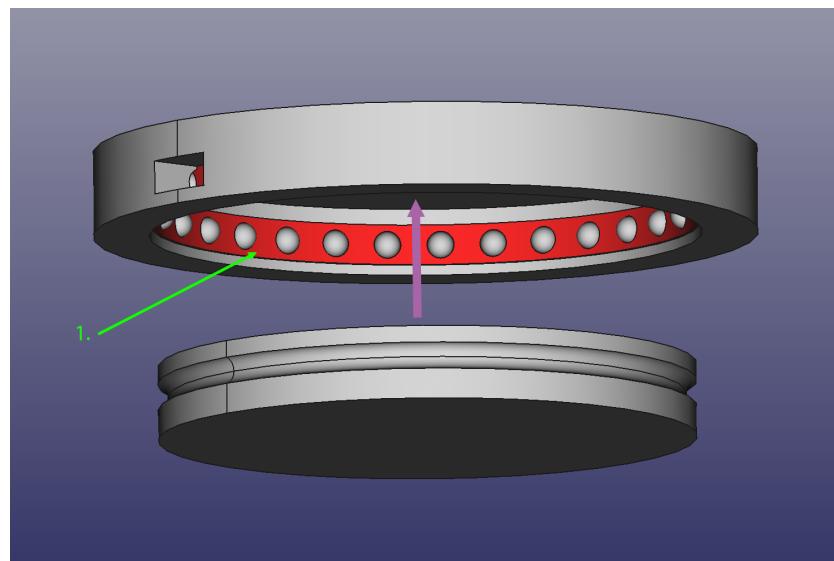


Abbildung 4.10.: Kugeln mit Abstandhalter-Ring (1.) in Hauptplattform. Statische Basis drüber.

In Abbildung 4.10 ist zu sehen, wie die Kugeln mit dem Abstandhalte-Ring (4.10, 1.) in der Hauptplattform liegen. Diese Abbildung dient nur der Illustration, da die Hauptplattform inklusive Kugeln nicht mehr über die Basis gestülpt werden könnte. Die Verbindung der beiden Teile entsteht ausschließlich durch die Einführung von Kugeln durch das Loch in der Hauptplattform. Dies muss nach fertigem Einfüllen geschlossen werden.

Slider

Die Bewegung des System entlang einer Achse im Raum, wird mit einem sogenannten *Slider* durchgeführt. Der Slider wurde ohne Anregung anderer Projekte entwickelt. Besonderer Fokus wurde darauf gelegt, dass die Bewegung im Raum gleichmäßig und die Länge variabel ist. Um eine möglichst gleichmäßige und ruckelfreie Bewegung zu gewährleisten, wurde sich dazu entschieden, das Pan-Tilt-System mit Hilfe eines Zahnriemens über zwei Aluminiumrohre zu ziehen.

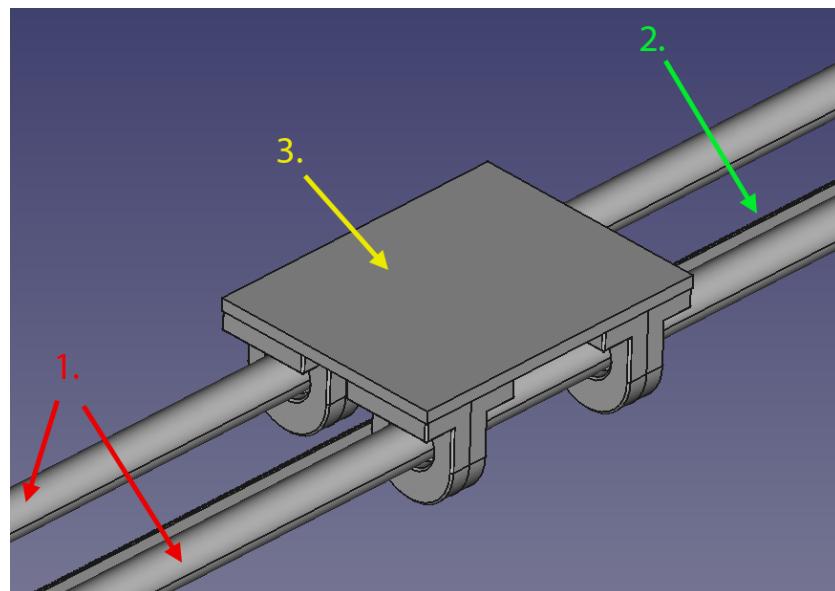


Abbildung 4.11.: Slider Aufbau: Bewegliche Plattform (3.) fährt mit Hilfe von starrem Zahnriemen (2.) über zwei Aluminiumrohre (1.).

In Abbildung 4.11 ist zu sehen, wie eine Plattform (4.11, 3.) an zwei parallele Aluminiumrohre (4.11, 1.) befestigt ist. Das Pan-Tilt-System wird auf die gezeigte Plattform montiert. Die Realisierung der Bewegung der Plattform entlang der Aluminiumrohre wird in Abbildung 4.12 gezeigt.

Der Motor welcher für die Bewegung des Sliders zuständig ist, bewegt sich immer mit dem restlichen Pan-Tilt-System. Daher kann die Länge der Aluminiumrohre und des starren Zahnriemens beliebig verändert werden.

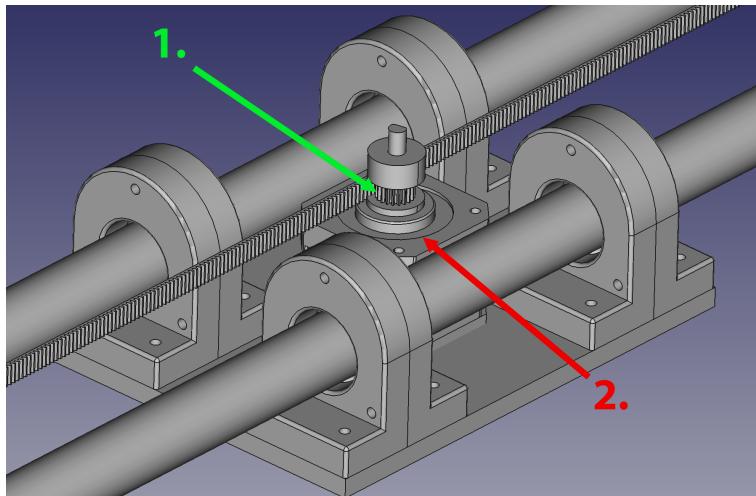


Abbildung 4.12.: Slider Aufbau: Motor (2.) mit Zahnrad (1.) ist an der Plattform befestigt.

Der Zahnriemen liegt so, dass das Zahnrad sich bei Drehung entlang des Zahnriemens bewegt.

Um die Bewegung möglichst gleichmäßig und ruckelfrei zu gestalten, werden die Befestigungen der Plattform an den Aluminiumrohren keinen direkten Kontakt zu den Aluminiumrohren haben. In die Befestigungen werden rund um die Aluminiumrohre Stahlkugeln platziert, welche sich zwar um sich selbst beliebig drehen können, allerdings nicht die Position verlassen können.

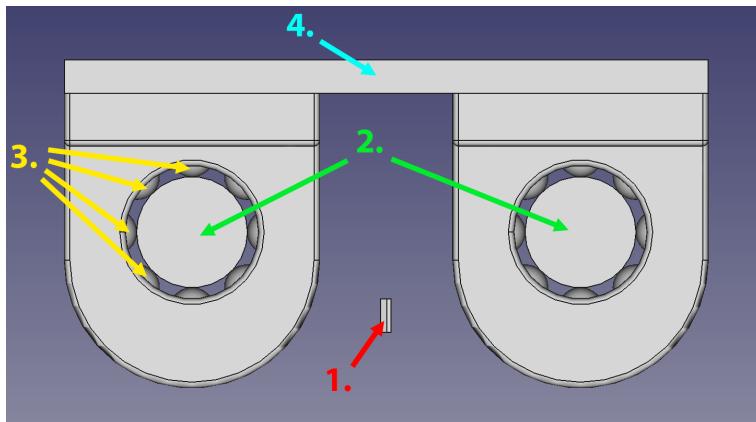


Abbildung 4.13.: Slider Aufbau Querschnitt: Plattform mit Befestigungen (4.). Stahlkugeln (3.) innerhalb der Befestigungen, um über Aluminiumrohre (2.) zu rollen. Zahnriemen (1.) mittig. Motor und Zahnrad wie in Abbildung 4.12 zur Übersichtlichkeit nicht zu sehen.

Elektronik-Management

Das Verarbeiten des Live-Bilds der Kamera erfolgt mit einem Raspberry Pi. Dieser ist in der Lage *Python*-Programme auszuführen und es kann für die Gesichtserkennung die bereits vorhandene Bibliothek *OpenCV* genutzt werden. Des Weiteren verfügt dieser über USB-B Schnittstellen, welche für den Eingang des Live-Bildes benötigt werden. Da der

Raspberry Pi allerdings nicht für präzise Schrittmotor Ansteuerungen geeignet ist, wird zusätzlich ein Arduino nano verwendet. Über serielle Schnittstellen des Raspberry Pis und des Arduino nanos können beide Einheiten bidirektional miteinander kommunizieren. Die Schrittmotoren arbeiten mit einer größeren Leitung als der Arduino nano bieten kann. Daher werden Motor-Treiber benötigt, welche mit Hilfe einer weiteren externen Stromquelle den Eingangsstrom des Arduino nanos verstärken. Um den Arduino nano und den Raspberry Pi nicht nur in einer Konsole über einen Computer zu steuern, werden ebenfalls ein kleines Display und ein Joystick in das System integriert. Darüber können die einzelnen Motoren angesteuert werden und das Gesichts-Tracking aktiviert und deaktiviert werden.

Um die Elektronikteile möglichst kompakt in das System zu integrieren, wird eine Box auf die Hauptplattform montiert, welche die ganze Elektronik beinhaltet.

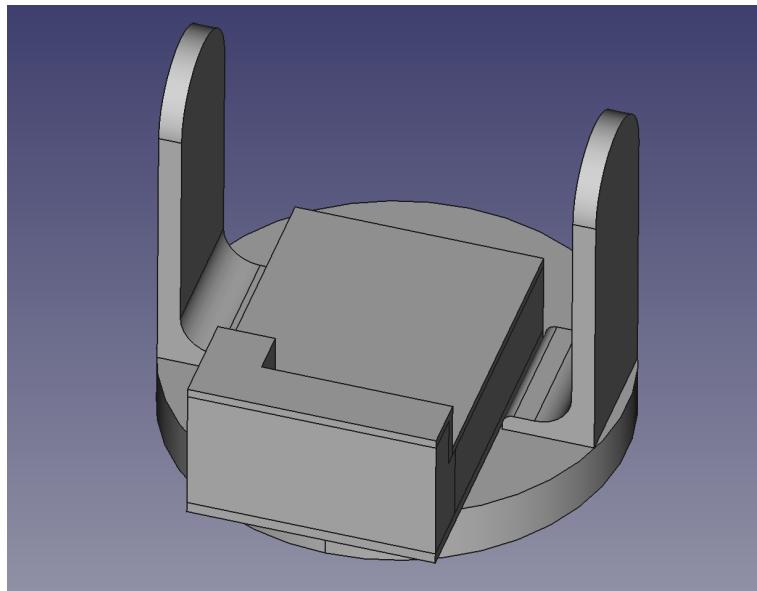


Abbildung 4.14.: Box für sämtliche Elektronik auf der Hauptplattform und neben den Füßen für die Tilt-Bewegung.

4.1.4. Hardware konstruieren

Kamerahalterung

Die Größe des ganzen Systems hängt maßgeblich von der Größe der Kamera ab. Daher wird als erstes das Teil konstruiert, auf welches die Kamera montiert wird. Im Folgenden wird dieses Teil als *Kamerahalterung* benannt. Um die Maße der Kamerahalterung festzulegen, werden die ausschlaggebenden Maße der Kamera ermittelt.

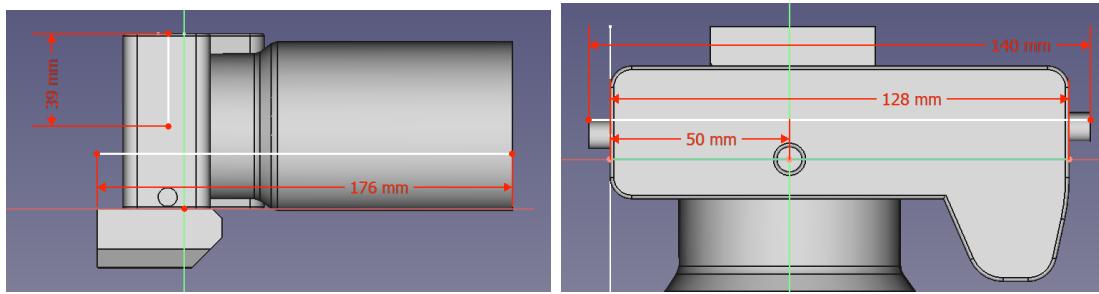


Abbildung 4.15.: Seitliche, auf dem Kopf Abbildung 4.16.: Ansicht auf das Kamera-stehende Ansicht eines Modells der Sony A7 modell von unten. Breite der Auflagefläche, RII. Länge der Kamera-Objektiv Kombina- Breite inklusive Zylinderförmige Befestigung und Höhe der Sensormitte angegeben. gen (Position in Abbildung 4.15 ersichtlich) und Abstand von Außenseite zu Mitte des Gewindelochs zur Befestigung der Kamera

Wie in Abbildung 4.16 illustriert, besitzt die Kamera mit einer 128 mm breite Auflagefläche. Daher muss die Auflagefläche der Kamerahalterung ebenfalls mindestens diese Breite aufweisen. Um einen kleinen Spielraum zu setzen, wird die Breite mit 131 mm definiert. In Abbildung 4.16 ist hinzu die Breite der Kamera inklusive zylinderförmige Halterungen ersichtlich. Die Halterungen sind nur oberhalb der Kamera vorhanden und in Abbildung 4.15 als Kreis erkenntlich. Diese haben zur Folge, dass die Breite oberhalb der Auflagefläche größer sein muss.

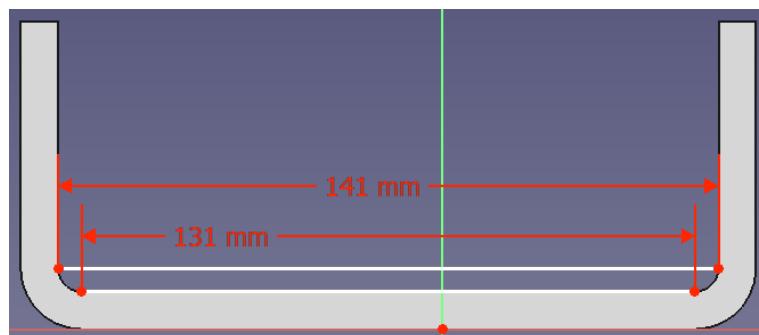


Abbildung 4.17.: Kamerahalterung: Auflagefläche für Kamera = 131 mm, komplette Breite für Kamera = 141 mm

Als nächstes wird die Form der Auflagefläche bestimmt. Zu beachten ist dabei, dass das Befestigungsgewinde der Kamera nicht mittig ist. Zudem hat die Kamera-Objektiv Kombination durch das Objektiv einen stark nach vorne verlagerten Schwerpunkt. Um das Gewicht besser zu verteilen, wird durch eine separate Objektivstütze das Gewicht des Objektives direkt auf die Auflagefläche verlagert.

Um den Schwerpunkt der Kamera-Objektiv Kombination auf die Tilt-Drehachse (4.18, 4.) zu verlagern, werden die Löcher zur Befestigung der Objektivstütze vor die Drehachse (4.18, 1.) und das Loch für die Befestigung der Kamera etwas hinter die Drehachse (4.18, 2.) verlagert. Die “Löcher“ sind dabei so geformt, dass die letztendliche Position der Kamera

4. Durchführung

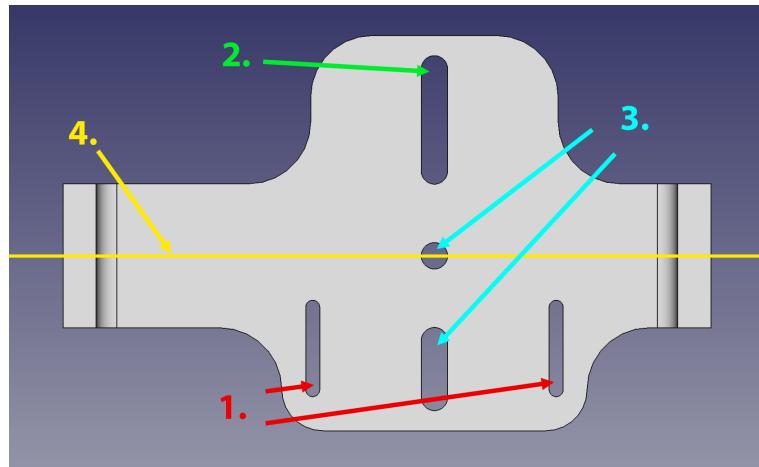


Abbildung 4.18.: Kamerahalterung Ansicht von oben: Löcher für Befestigung der Objektivstütze (1., $r = 1,7$ mm), Loch für Befestigung der Kamera (2., $r = 3,2$ mm), Optionale Löcher (3., $r = 3,2$ mm)

und der Objektivstütze für Feineinstellungen variiert werden können. Um zu gewährleisten, dass andere Objekte auf die Kamerahalterung montiert werden können, werden zusätzliche Löcher integriert (4.18, 3.).

Die Kamerahalterung wird an einer Seite an einem Fuß gehalten und auf der anderen Seite mit einem Zahnrad verbunden welches mit dem anderen Fuß verbunden ist (siehe Abbildung 4.6).

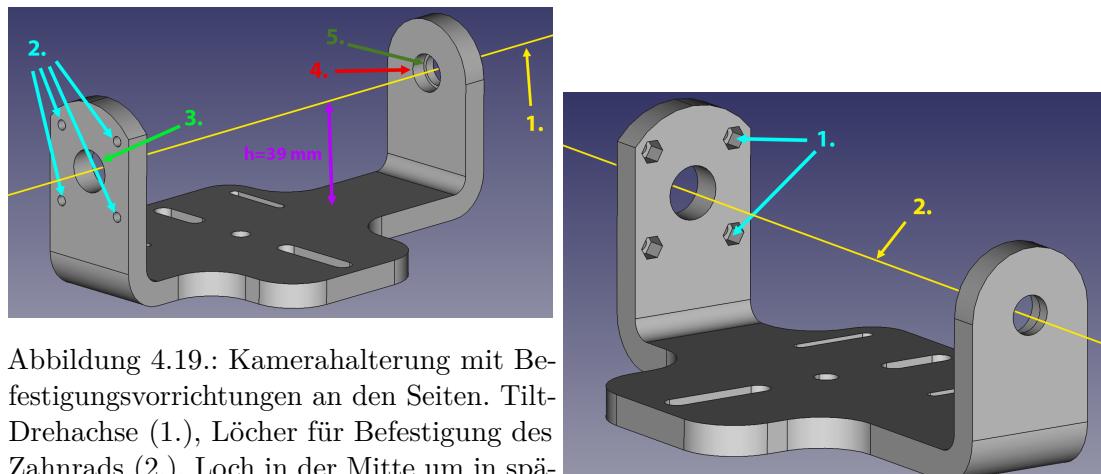


Abbildung 4.19.: Kamerahalterung mit Befestigungsvorrichtungen an den Seiten. Tilt-Drehachse (1.), Löcher für Befestigung des Zahnrads (2.), Loch in der Mitte um in späteren Schritten Kugellager im Zahnrad zu befestigen (3.), Loch mit größerem Durchmesser, sodass ein Kugellager rein passt (4.), Loch mit kleinerem Durchmesser, sodass Kugellager halt hat und fest gemacht werden kann (5.)

Abbildung 4.20.: Sechseckige Vertiefungen von der Innenseite für Muttern (1.), Tilt-Drehachse (2.)

In Abbildung 4.19 ist ersichtlich, dass auf der Seite an welcher die Kamerahalterung direkt an den Fuß montiert wird, das Loch zur Montage nicht durchgängig, sondern zwei

verschiedene Durchmesser hat (4.19, 4. und 5.). Dies ist notwendig, um ein Kugellager in diesem Loch zu befestigen. Auf der anderen Seite ist ersichtlich, dass neben einem großen Loch in der Mitte (4.19, 3.), 4 kleinere Löcher vorhanden sind (4.19, 2.). Diese werden benötigt um ein Zahnrad an die Kamerahalterung zu schrauben. Die Schrauben sollen dabei zuerst durch das Zahnrad, dann durch die Kamerahalterung gesteckt werden. Dadurch ergibt es sich, dass auf der inneren Seite der Kamerahalterung Muttern benötigt werden. Damit diese nicht durchdrehen, werden auf der Innenseite sechseckige Vertiefungen vorgenommen (4.20, 1.).

Objektivstütze

Die Objektivstütze wird benötigt, um das Gewicht der Kamera inklusive des langen Objektives auf zwei Stellen aufzuteilen.

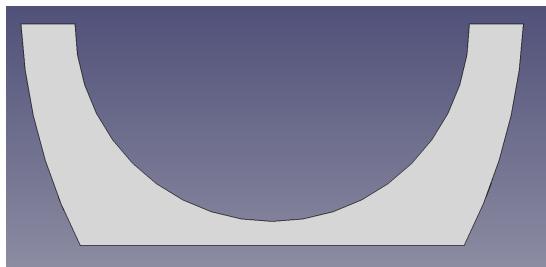


Abbildung 4.21.: Frontale Ansicht auf die Objektivstütze. Die Form ist an das benutzte *Tamron*-Objektiv angepasst.

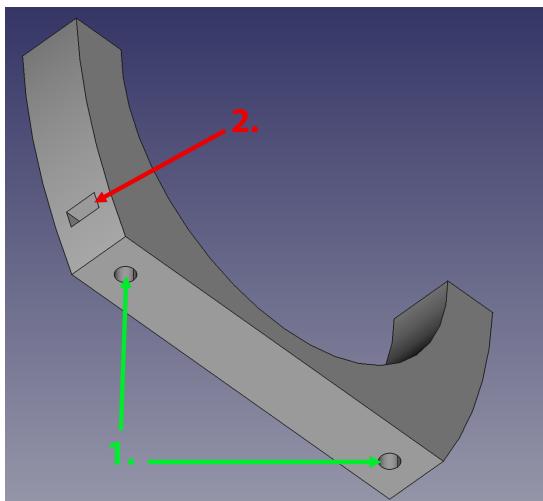


Abbildung 4.22.: Löcher von unten (1.) und Einschübe für Muttern an den Seiten (2.) ermöglichen eine Befestigung an den dafür vorhergesehenen Löchern an der Kamerahalterung (4.18, 1.)

Zahnrad an Kamerahalterung für Tilt-Bewegung

Damit die Kamerahalterung entlang der Tilt-Achse gedreht werden kann, wird ein Zahnrad an die Kamerahalterung montiert. Da das Zahnradgetriebe aus dem Projekt von Isaac879 gut funktioniert hat und gezeigt wurde, dass diese Zahnräder von herkömmlichen 3D-Druckern gedruckt werden können, wurde die gleiche Anzahl an Zähnen für diese Studienarbeit genutzt. Das kleinere Zahnrad, welches direkt am Motor befestigt ist (4.6, 4.), hat 21 Zähne. Das Zahnrad an der Kamerahalterung hat 64 Zähne. Das Zahnradgetriebe erfüllt des Weiteren auch die Anforderung, dass die minimale Schrittweite kleiner als 0.5°

sein muss.

Die Schrittweite der Motoren liegt bei 1.8° pro Schritt. Allerdings kann ein Schritt mit Hilfe der benutzten Motortreiber auf bis zu 16 Teilschritte geteilt werden. Dadurch ergibt sich folgende Rechnung:

$$\frac{21}{64} * 1.8^\circ \approx 0.59^\circ \text{ pro ganzem Schritt.}$$

Mit Hilfe des Motortreibers, kann dieser Wert beliebig durch 2, 4, 8 oder 16 geteilt werden. Dadurch wird die Anforderung der minimalen Schrittweite deutlich erfüllt.

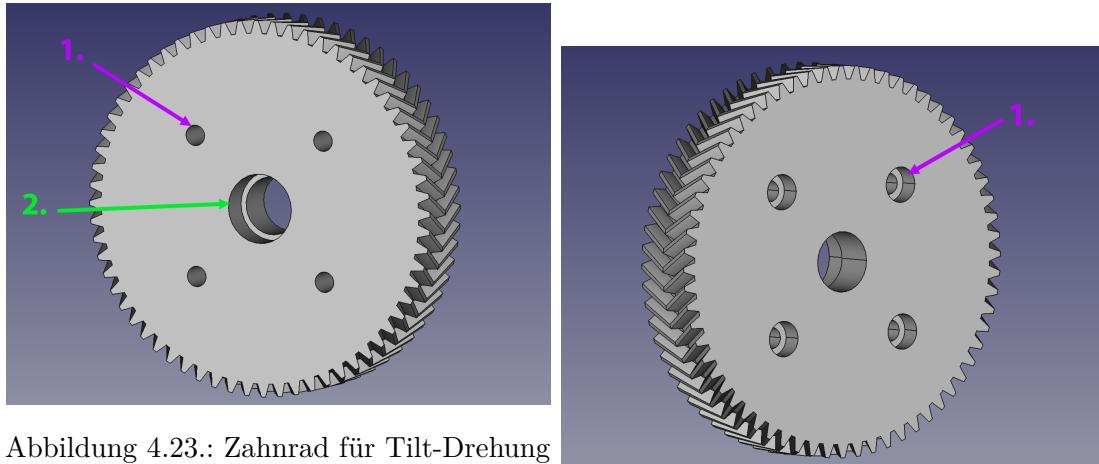


Abbildung 4.23.: Zahnrad für Tilt-Drehung an Kamerahaltung. Löcher zur Befestigung an Kamerahalterung (1.). Loch mit unterschiedlichem Durchmesser innerhalb des Zahnrads zur Befestigung eines Kugellagers (2.).

Abbildung 4.24.: Zahnrad für Tilt-Drehung an Kamerahalterung (1.). Vertiefungen an Löchern für Schraubenköpfe (1.).

Wie in Abbildung 4.23 und 4.24 zu sehen, wird eine Doppelschräg-Verzahnungen für die Zähne verwendet. Durch die schräge Verzahnung werden die Kräfte gleichmäßiger übertragen. Es besteht im Gegensatz zu einfachen parallelen Zähnen immer Kontakt zwischen den Zähnen zweier Zahnräder. Eine einfache schräge Verzahnung würde allerdings zu ungewollten Axialkräften führen, welche die sich zu drehenden Zahnräder auseinander ziehen würden. Dies wird durch eine Doppelschräg-Verzahnung vermieden da somit immer zwei, sich ausgleichende, Axialkräfte entstehen.

In Abbildung 4.23 sind vier Löcher zur Befestigung des Zahnrads an der Kamerahalterung ersichtlich (4.23, 1.). Auf der anderen Seite des Zahnrads sind zusätzlich Vertiefungen an den Löchern vorhanden damit keine Schraubenköpfe aus dem Zahnrad hinaus ragen (4.24, 1.). Damit das Zahnräder mit der Kamerahalterung sich drehen kann, wird in das Zahnräder ein Kugellager befestigt (4.23, 2.). Die Befestigung basiert auf dem gleichen Prinzip wie die Befestigung des anderen Kugellagers in der Kamerahalterung (4.19, 4. und 5.).

Zahnrad an Motor für Tilt-Bewegung

Um die Kamerahalterung mit montiertem Zahnrad zu drehen, wird ein weiteres Zahnrad benötigt, welches mit einem Motor gedreht wird. Die Anzahl der Zähne beträgt 21. Das Zahnrad ist wie das andere Zahnrad doppelschräg-verzahnt.

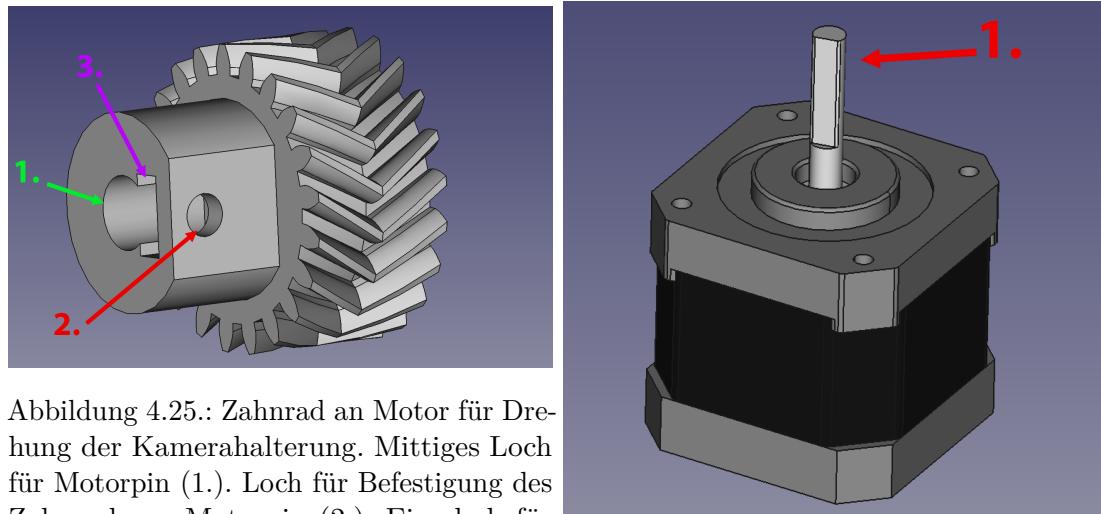


Abbildung 4.25.: Zahnrad an Motor für Drehung der Kamerahalterung. Mittiges Loch für Motorpin (1.). Loch für Befestigung des Zahnrads an Motorpin (2.). Einschub für Mutter damit Schraube gegen Motorpin geschraubt werden kann (3.).

Abbildung 4.26.: Verwendeter Nema 17 42x42mm Schrittmotor. Motorpin (1.)

Mit einem Loch in der Mitte (4.25, 1.) wird das Zahnrad auf den Motorpin (4.26, 1.) gestülpt. Für die Fixierung wird zuerst eine Mutter in den vorgesehenen Einschub platziert (4.25, 3.), wodurch danach eine Schraube das Zahnrad an den Motorpin befestigen kann.

Rechte Befestigung der Kamerahalterung

Die Kamerahalterung, die Zahnräder und der Motor werden durch ein Befestigungsfuß miteinander verbunden und zusammen gehalten. Der Fuß wird dabei auf die Hauptplattform geschraubt.

Wie in Abbildung 4.27 und 4.28 ersichtlich, wird der Fuß mit drei Schrauben an die Hauptplattform geschraubt (4.27, 1. und 4.28, 2.). Für zusätzliche Stabilität wurden zwei kleine Erhebungen an den Fuß positioniert (4.28, 1.), welche Halt in vorgesehenen Löchern in der Hauptplattform finden. Die Löcher für die Befestigung des Motors mit Zahnräden entsprechen langgezogenen Löchern (4.27, 4. und 3.). Dies hat den Vorteil, dass der Motor in der Höhe verstellt werden kann und somit unterschiedliche Zahnräder an den Motorpin geschraubt werden könnten. Durch ein seitliches Loch im Fuß (4.27, 6.) ist es möglich, die Schraube zur Befestigung des Zahnrads am Motorpin zu erreichen. Eine leichte Erhebung am Loch zur Befestigung der Kamerahalterung (4.27, 5.) führt dazu, dass das befestigte Zahnräder nicht mit der seitlichen Oberfläche an dem Fuß reibt. Die Schraube zur

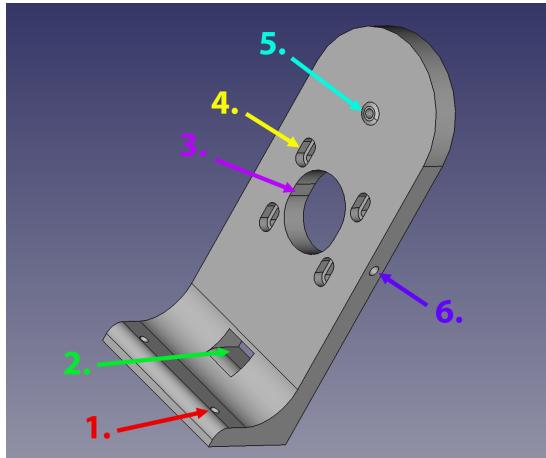


Abbildung 4.27.: Rechte Befestigung der Kamerahalterung. Löcher für Befestigung an Hauptplattform (1.). Loch um Kabel des Motors für die Tilt-Bewegung hindurch zu führen (2.). Langgezogenes Loch um Motorpin mit Zahnrad hindurch zu stecken (3.). Vier Langgezogene Löcher für die höhenverstellbare Befestigung des Motors (4.). Leichte Erhebung mit Loch um Kamerahalterung mit Zahnrad am Fuß zu befestigen und das Zahnrad bei Drehung nicht überall am Fuß Kontakt hat (5.). Seitliches Loch um Zahnrad an montiertem Motor festzuschrauben (6.).

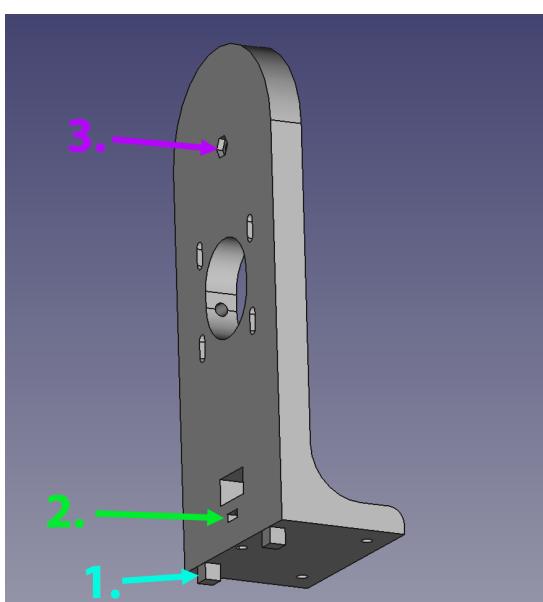


Abbildung 4.28.: Rechte Befestigung der Kamerahalterung. Ansicht von hinten-unten. Zwei Erhebungen in Hauptplattform für zusätzliche Stabilität (1.). Einschub für Mutter um Fuß mit weiterer Schraube an Hauptplattform zu schrauben (2.). Hexagonförmige Vertiefung für Mutter, welche Schraube zur Befestigung der Kamerahalterung fixiert (3.).

Befestigung wird mit einer Mutter fixiert, welche durch eine Hexagon-förmige Vertiefung im Fuß gehalten wird (4.28, 3.). Ein Loch mittig unterhalb der Befestigungsstelle des Motors (4.27, 2.) ermöglicht eine kurze Kabelführung der Motor-Kabel.

Linke Befestigung der Kamerahalterung

Die linke Befestigung der Kamerahalterung ist der rechten Befestigung nachempfunden, siehe Abbildung 4.29. Allerdings fehlen die Löcher zur Befestigung eines Motors und das Loch für die Kabelführung.

Hauptplattform

Die Hauptplattform verbindet die Befestigungen mit der Kamerahalterung. Sie dient des Weiteren für die Befestigung des Pan-Motors und einer Box für das Elektronik Management. Zudem ist die Hauptplattform um die statische Basis drehbar.

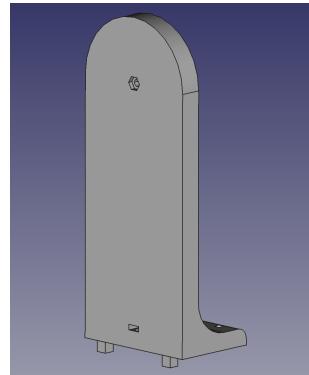


Abbildung 4.29.: Linker Befestigungsfuß. Vereinfachte Kopie der rechten Befestigung der Kamerahalterung 4.1.4.

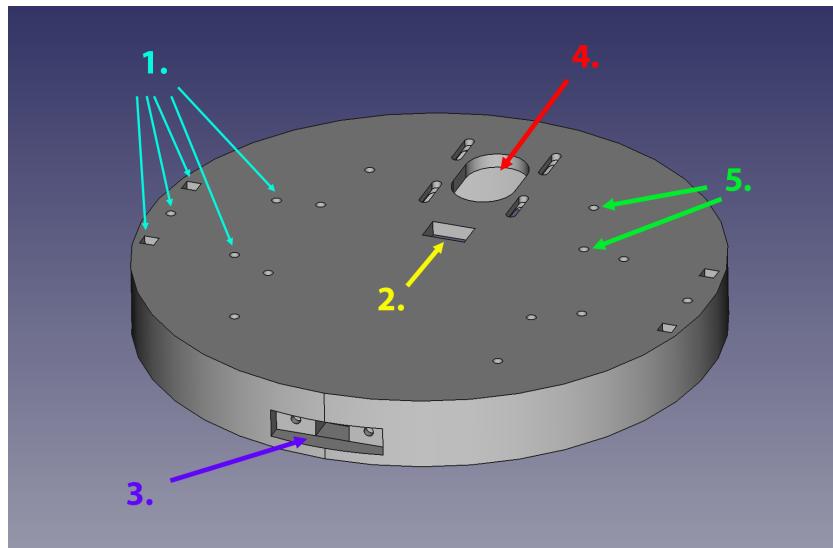


Abbildung 4.30.: Hauptplattform, Ansicht von oben. Befestigungslöcher für Befestigungsfuß (1.). Loch um Kabel des Slider-Motors von unten in die Elektronikbox zu führen (2.). Aushöhlung um Kugeln zwischen statische Basis und Hauptplattform einzufüllen (3.). Loch um Pan-Motor von oben auf die Hauptplattform zu montieren (4.). Alle weitere Löcher dienen zur Befestigung der Box für das Elektronik Management (5.).

Die Hauptplattform ist kreisförmig aufgebaut. Auf der oberen Oberfläche befinden sich Löcher zur Befestigung anderer Teile. Die Löcher zur Befestigung der Befestigungsfüße sind jeweils auf der linken und rechten Seite gleich. Drei runde Löcher, um mit Hilfe von Schrauben den Fuß an die Hauptplattform zu schrauben und zwei quadratische Aushöhlungen für die unteren Erhebungen des Fußes (4.30, 1.). Das rechteckige Loch in der Mitte der Hauptplattform ermöglicht es die Kabel des Slider-Motors mittig durch die statische Basis und die Hauptplattform in die Elektronik-Box zu führen (4.30, 2.). An der frontalen Seite befindet sich ein Loch, um Kugeln zwischen die Hauptplattform und die statische Basis zu führen (4.30, 3.). Neben dem Loch befinden sich zwei Löcher und eine Aushöhlung, um einen Stopfen in das Loch zu führen und an die Hauptplattform zu schrauben. Des Weiteren befinden sich Löcher für die Befestigung des Pan-Motors auf der Hauptplattform (4.30, 4.). Der dort befestigte Motor ist der in Abbildung 4.7 zu sehende

Motor, welcher die Hauptplattform durch Drehung eines Zahnrads und Zähnen auf der Innenseite der statischen Basis bewegt. Alle weiteren Löcher auf der Hauptplattform, dienen der Befestigung der Box für das Elektronik-Management (4.30, z.B. 5.).

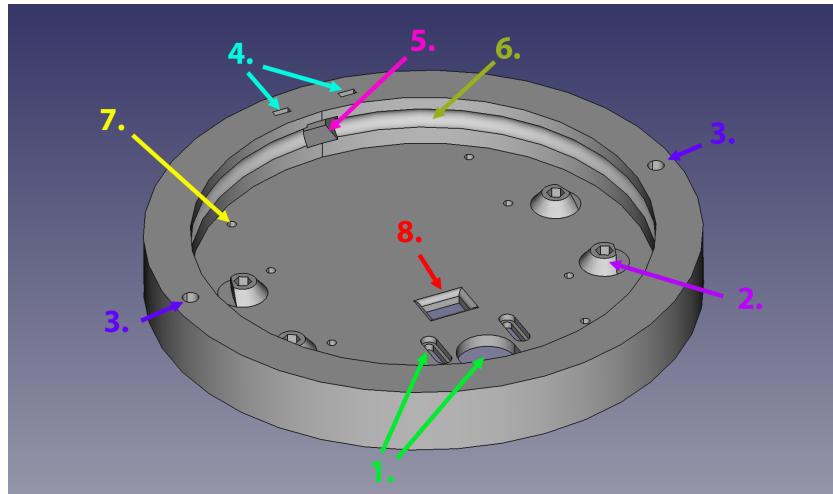


Abbildung 4.31.: Hauptplattform, Ansicht von unten. Löcher zur Montage des Pan-Motors (1.). Erhebungen mit sechseckigen Aushöhlungen für Muttern zur Befestigung der Befestigungsfüße (2.). Löcher zur Befestigung der Befestigungsfüße (3.). Einschübe für Muttern zur Befestigung des Kugeleinführungsstopfens (4.). Loch zum Einführen von Kugeln zwischen statische Basis und Hauptplattform (5.). Halbkreis-förmige Mulde für Kugeln zwischen statischer Basis und Hauptplattform (6.). Löcher zur Befestigung der Box für das Elektronik Management (7.).

Unterhalb der Hauptplattform ist zu erkennen, dass die seitlichen Löcher zur Befestigung des Pan-Motors ab der Mitte der Hauptplattform einen größeren Radius haben (4.31, 1.). Dadurch ragen die Schraubenköpfe nicht aus der Hauptplattform raus. Dies ist notwendig, da die statische Basis sich im Inneren der Hauptplattform befindet und die Hauptplattform sich um diese drehen soll. Dafür sind an den Erhebungen zur Fixierung der Muttern zur Befestigung der Füße ebenfalls nach außen gerichtete Einkerbungen ersichtlich (4.31, 3.). Um den Kugeleinführungsstopfen zu befestigen, befinden sich zwei Einschübe für Muttern auf der Unterseite der Hauptplattform (4.31, 4.). Dadurch kann der Stopfen an die Hauptplattform geschraubt werden und füllt das in Abbildung 4.31, 5. zusehende Loch, um Kugeln zwischen die statische Basis und die Hauptplattform zu befüllen. Der Stopfen selber ist dabei so aufgebaut, dass sich die Form der Mulde in der Hauptplattform (4.31, 6.) anpasst, siehe Abbildung 4.32.

Des Weiteren sind die Löcher zur Befestigung der Box für das Elektronik Management (4.31, z.B. 7.) und das Loch zur Kabelführung des Slider-Motors (4.31, 8.) ersichtlich.

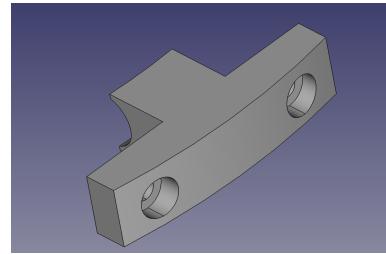


Abbildung 4.32.: Kugeleinführungsstopfen. Zwei Löcher an den Seiten um den Stopfen an die Hauptplattform zu befestigen (4.30, 3.).

Statische Basis

Die statische Basis dient als starres Element, um welches sich die Hauptplattform drum herum dreht.

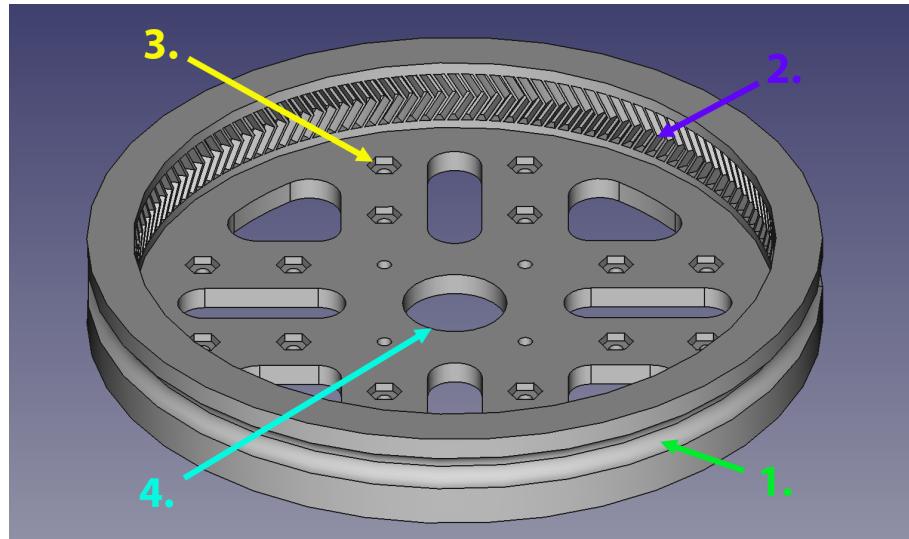


Abbildung 4.33.: Statische Basis. Mulde für Kugeln zwischen statischer Basis und Hauptplattform (1.). Innere doppelschräg Verzahnung (2.). Löcher mit sechseckiger Vertiefung für Befestigung des Sliders (3.). Loch zur Führung der Kabel des Slider-Motors (4.).

Um die Drehung der Hauptplattform zu ermöglichen, ist an der äußeren Seite der statischen Basis eine Mulde vorhanden (4.33, 1.). Diese ermöglicht es, Kugeln in den Platz zwischen der Mulde der Hauptplattform und der Mulde der statischen Basis zu platzieren. In der inneren Seite der statischen Basis befindet sich eine doppelschräg Verzahnung (4.33, 2.). Mit Hilfe der Verzahnung kann die Drehung der Hauptplattform durchgeführt werden. Auf die Details der Verzahnung wird in der nachfolgenden Erörterung des Zahnrads am Motor für die Pan-Bewegung eingegangen. Löcher in der Unterseite ermöglichen eine flexible Befestigung der statischen Basis auf dem Slider (4.33, 3.). Da ein Zahnräder an der Innenseite entlang fährt (vgl. Abbildung 4.7), ist es notwendig, dass keine Teile von unten herausragen. Damit die Befestigung trotzdem erfolgen kann, werden um die Löcher sechseckige Vertiefungen platziert. In diese Aushöhlungen können die Muttern gelegt werden, ohne

dass diese nach oben hin raus ragen. Damit die Kabel des Slider-Motors zu der Box für die Elektronik geführt werden können, wird in die statische Basis mittig ein großes Loch positioniert (4.33, 4.).

Zahnrad an Motor für Pan-Bewegung

Die Drehung der Hauptplattform um die statische Basis wird mit einem Motor realisiert, welcher an der Hauptplattform fixiert ist. Dafür wird an den Motorpin ein Zahnrad befestigt, welches den Motor und somit auch die ganze Hauptplattform bei Drehung entlang der Verzahnung der statischen Basis dreht. Die Anzahl der Zähne der Verzahnung im Inneren der statischen Basis und die Anzahl der Zähne des Zahnrads am Motor werden aus dem Projekt von Isaac879 übernommen. Die Anzahl der Zähne der statische Basis beträgt 144. Die Anzahl der Zähne des Zahnrads am Motor beträgt 17. Daraus ergibt sich folgende Berechnung für die minimale Schrittweite:

$$\frac{17}{144} * 1.8^\circ \approx 0.21^\circ \text{ pro ganzem Schritt.}$$

Zu beachten ist, dass dieser Schritt zusätzlich mit Hilfe des Motortreibers beliebig durch 2, 4, 8 oder 16 geteilt werden kann. Das Zahnrad selber ist genau so aufgebaut wie das in Abbildung 4.25 zu sehende Zahnrad. Nur die Anzahl der Zähne wurde von 21 auf 17 reduziert.

Slider Plattform

Die Slider Plattform ist dafür zuständig, die benötigten Teile um auf den zwei Aluminiumrohren hin und her zu fahren, zu verbinden. Zudem wird die statische Basis auf die Plattform montiert.

In Abbildung 4.34 werden die Löcher zur Fixierung der Befestigungen an die Aluminiumrohre mit gelb-gestrichelten Rechtecken markiert (4.34, 1.). Da die statische Basis auf die Plattform drauf geschraubt wird, befinden sich an den Löchern Vertiefungen für Schraubenköpfe. Die Befestigung der statischen Basis erfolgt mit den Löchern in den roten Rechtecken (4.34, 2.). Diese benötigen keine Vertiefungen für Schraubenköpfe, da die Schrauben von der Unterseite aus durch die Löcher geschraubt werden. In der Mitte der Plattform befindet sich ein Loch, um die Kabel des Slider-Motors durch die statische Basis und die Hauptplattform durch in die Elektronikbox zu führen (4.34, 3.). Alle weiteren Löcher dienen der Befestigung einer Einrichtung um den Motor für die Slider-Bewegung zu fixieren (4.34, z.B. 4.).

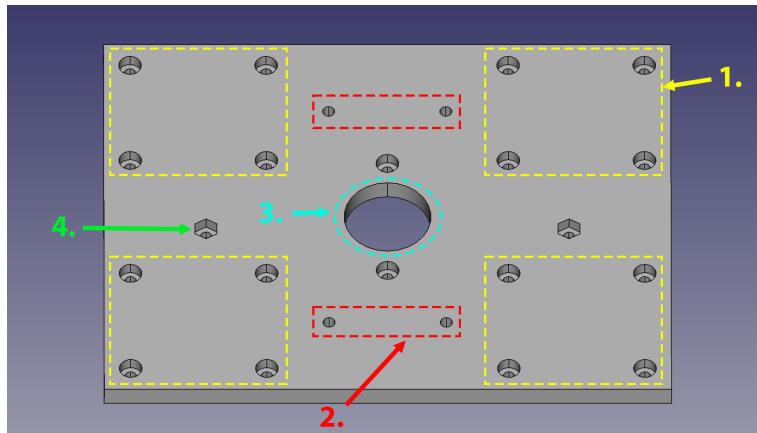


Abbildung 4.34.: Slider Plattform, Ansicht von oben. Löcher zur Fixierung von Befestigungen an den Aluminiumrohren (1.). Löcher zur Befestigung der statischen Basis auf der Plattform (2.). Loch um Kabel des Slider-Motors durch statische Basis und Hauptplattform in die Elektronikbox zu führen (3.). Alle weiteren Löcher dienen der Fixierung der Slider-Motor Befestigung (z.B. 4.).

Befestigungen an Aluminiumrohren

Damit die Slider Plattform mit der montierten statischen Basis über die Aluminiumrohre gleiten kann, werden Befestigungen benötigt, welche die Plattform mit den Aluminiumrohren dynamisch verbindet. Damit das Gleiten möglichst gleichmäßig und mit geringem Widerstand abläuft, wird kein direkter Kontakt zwischen den selbst konstruierten Teilen und den Aluminiumrohren hergestellt. Es wird ein selbst entwickeltes statisches Kugellager verwendet. Für die Realisierung des statischen Kugellagers, wird ein Teil entwickelt, welches durch zweifaches Ausdrucken zu einem Objekt zusammengeschraubt werden kann.

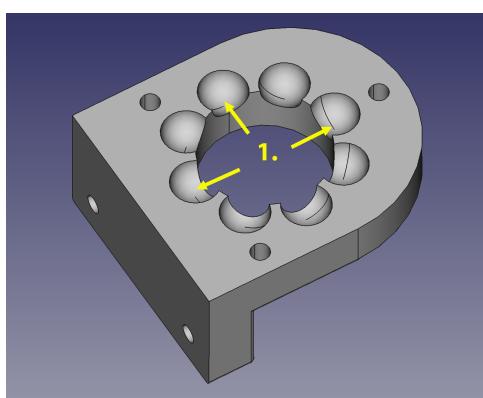


Abbildung 4.35.: Halbe Befestigung an Aluminiumrohr. Kugelmulden mit Radius $r = 4,5\text{mm}$, für Kugeln mit Radius $r = 4\text{mm}$ (1.).

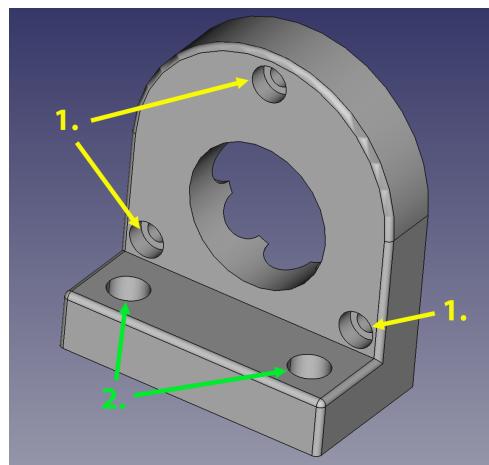


Abbildung 4.36.: Halbe Befestigung an Aluminiumrohr. Seitliche Löcher zur Fixierung zweier identischen Hälften aneinander (1.). Löcher zur Befestigung an Slider-Plattform (2.).

In Abbildung 4.35 sind auf der Oberseite des Objekts kugelförmige Mulden erkennbar (4.35, 1.). Diese haben einen Radius von 4,5 mm. In die Mulden werden Kugeln mit einem Radius von 4 mm positioniert. Dadurch ergibt es sich, dass die Kugeln etwas Raum haben um sich minimal zu auf der eigenen Stelle zu bewegen und sich zu drehen. Die Mulden sind dabei zur Mitte hin geöffnet, allerdings nur so, dass die Kugeln raus ragen, aber nicht zur Seite hin raus rollen können. Die Löcher neben den Mulden auf der Oberfläche in Abbildung 4.35, sind die selben wie in Abbildung 4.36 mit der Nummer 1. betitelten. Sie dienen dazu, zwei der gezeigten Hälften, zu einer Befestigung mit Kugeln in den Mulden zusammen zu schrauben. Die anderen beiden Löcher (4.36, 2.) werden genutzt, um die Befestigung an die Slider-Plattform zu schrauben.

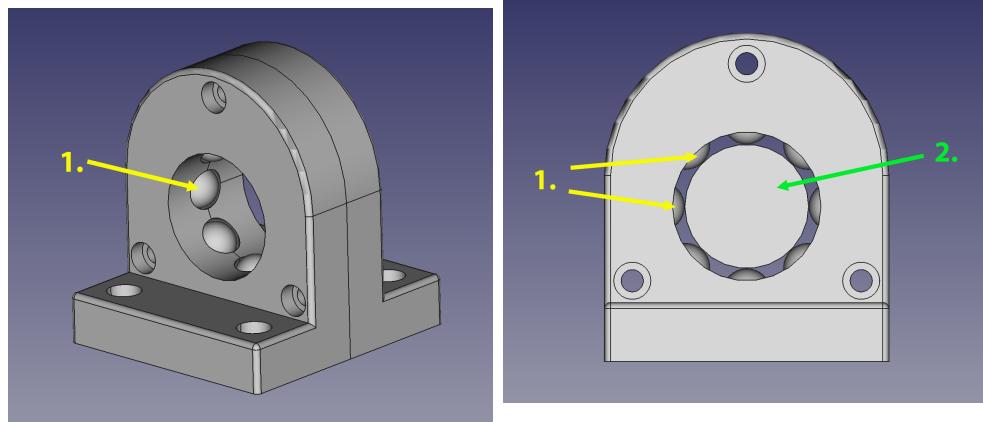


Abbildung 4.37.: Befestigung an Aluminiumrohr durch zwei identische Hälften. Modellhafte Stahlkugeln in den vorher gesehenen Mulden (1.).

Abbildung 4.38.: Befestigung an Aluminiumrohr durch zwei identische Hälften. Modellhafte Stahlkugeln in den vorher gesehenen Mulden (1.). Alurohr zur Demonstration in der Mitte (2.).

In Abbildung 4.37 ist erkennbar, dass zwei identische Hälften nebeneinander positioniert sind und in den Mulden Kugeln liegen (4.37, 1.). Abbildung 4.38 zeigt den Aufbau frontal von vorne mit einem Aluminiumrohr (4.38, 2.) in der Mitte zwischen den Kugeln (4.38, 1.).

Slider-Motor Befestigung

Die Bewegung der Slider-Plattform mit den Befestigungen an den Aluminiumrohren ergibt sich dadurch, dass ein Motor mit einem Zahnrad entlang eines straffen Zahnriemens entlang fährt, siehe Abbildung 4.12. Diese Abbildung zeigt allerdings nur das grobe Konzept und die Positionierung des Motors ist aufgrund des vorhandenen Platzes nicht so realisierbar wie gezeigt. Des Weiteren ist es notwendig, dass das Zahnrad am Motor und der Zahnriemen gegeneinanderdrücken. Ansonsten würde das Zahnrad beim Drehen am Zahnriemen abrutschen. Um diese Anforderungen zu erfüllen wird ein weiteres Teil

konzipiert, welches wie die Befestigungen an den Aluminiumrohren von unten an die Slider-Plattform montiert wird.

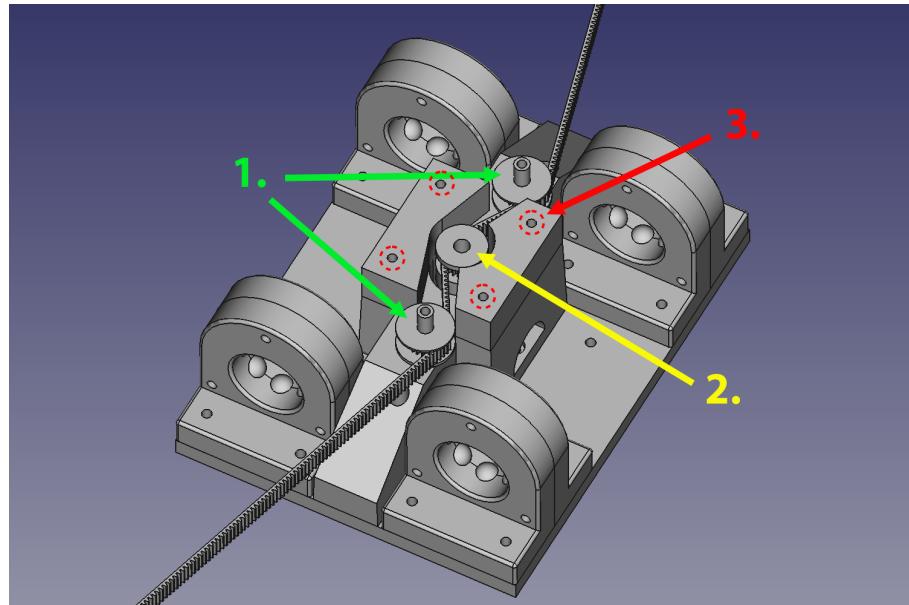


Abbildung 4.39.: Slider-Motor Befestigung in der Mitte auf Slider-Plattform. Vier Befestigungen an Aluminiumrohren. Zwei Umlenkrollen (1.) um Zahnriemen gegen Zahnrad am Motor zu drücken (2.).

In Abbildung 4.39 ist die Slider-Motor Befestigung mittig ersichtlich. Es erfüllt hauptsächlich zwei Funktionen. Den Motor für die Slider-Bewegung an den vorhergesehenen Löchern (4.39, 3.) zu befestigen und mit Hilfe von zwei Umlenkrollen (4.39, 1.) den gespannten Zahnriemen gegen das Zahnrad am Motor (4.39, 2.) zu drücken.

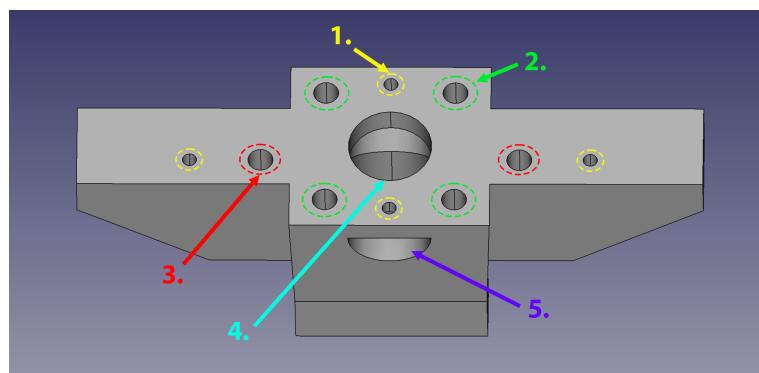


Abbildung 4.40.: Slider-Motor Befestigung, Ansicht von unten. Löcher zur Befestigung auf Slider-Plattform (1.). Löcher um Slider-Motor von unten zu befestigen (2.). Löcher um Umlenkrollen von unten zu befestigen (3.). Kabel des Slider-Motors werden durch seitliches halbkreis-Loch (5.) und dann durch mittiges großes Loch (5.) durch die Slider-Plattform, statische Basis und Hauptplattform in die Elektronikbox geführt.

In Abbildung 4.40 ist die konstruierte Slider-Motor Befestigung allein stehend von unten ersichtlich. Es befinden sich vier Löcher zur Befestigung an der Slider-Plattform auf der Unterseite (4.40, 1.). Die grün markierten etwas größeren Löcher (4.40, 2.) sind für die

Befestigung des Slider-Motors zuständig. Sie sind größer, da sich der Schraubenkopf im Objekt befindet. Die zwei rot markierten Löcher (4.40, 3.) werden für die Befestigung der Umlenkrollen verwendet. Um die Kabel des Slider-Motors durch die Hauptplattform, die statische Basis und die Slider-Plattform in die Elektronikbox zu führen, befindet sich auf der Unterseite ein mittiges großes Loch (4.40, 4.). Durch die halbkreisförmige Öffnung an der Seite (4.40, 5.) können somit die Kabel durch das große Loch geführt werden.

Füße zur Befestigung der Aluminiumrohre und des Zahnriemens

Der letzte Teil des Sliders besteht darin, die Aluminiumrohre und den Zahnriemen zu fixieren.

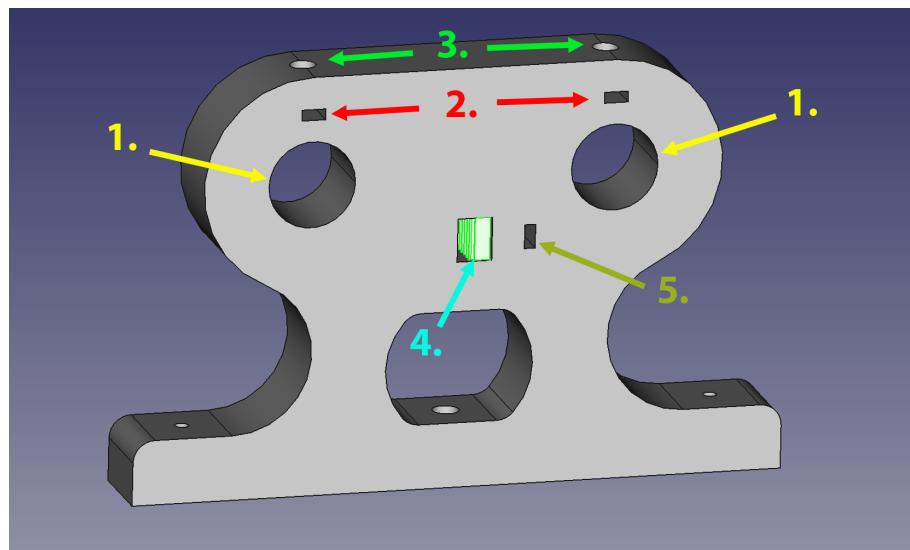


Abbildung 4.41.: Fuß zur Befestigung zweier Aluminiumrohre und eines Zahnriemens. Zwei Löcher um Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von $d = 20mm$ hindurch zu schieben (1.). Fixierung der Rohre mit Hilfe von Schrauben, welche durch Löcher von oben (3.) und Muttern in Einschüben (2.) auf die Röhren drücken. Loses Objekt (4.), welches mit Hilfe einer Schraube und einer Mutter in einem Einschub (5.) gegen die linke innere Wand des Loches drückt und somit einen Zahnriemen fixieren kann. Anschaulicher in Abbildung 4.42

In Abbildung 4.41 ist das für die Fixierung konstruierte Objekt zu sehen. Im oberen Teil befinden sich zwei Löcher, um Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von $d = 20mm$ hindurch zu schieben (4.41, 1.). Die Fixierung der Rohre erfolgt mit Schrauben, welche von oben gegen die Röhren drücken. Sie werden durch Löcher auf der Oberseite hindurch gesteckt (4.41, 3.) und bauen den Druck mit Hilfe von Muttern auf, welche mit seitlichen Einschüben in Position gebracht werden (4.41, 2.). Die Fixierung des Zahnriemens wird durch ein ähnliches Prinzip realisiert. Allerdings drückt nicht eine Schraube selber gegen den Zahnriemen. Die Schraube drückt gegen ein loses Objekt, welches ebenfalls mit Zähnen bestückt ist (4.41, 4.). Dieses drückt dann gegen den Zahnriemen.

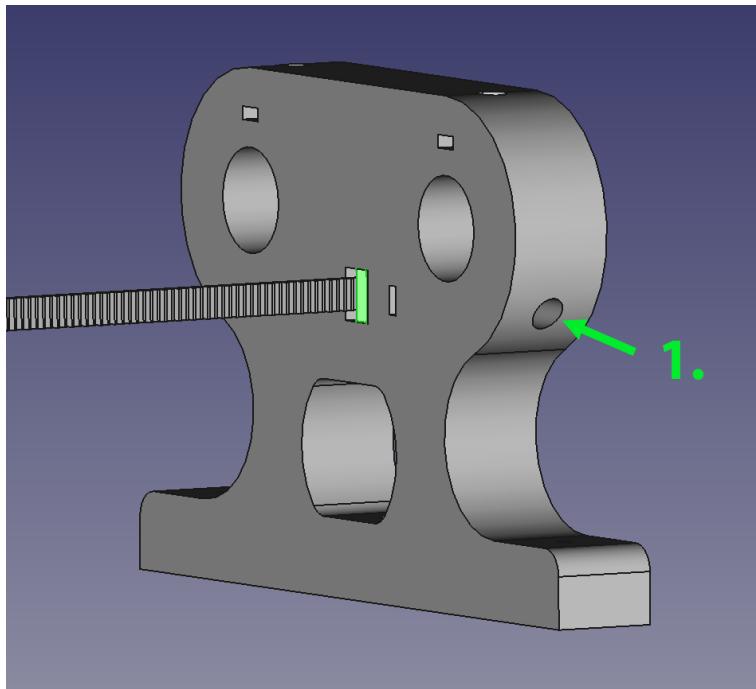


Abbildung 4.42.: Fuß zur Befestigung zweier Aluminiumrohre und eines Zahnriemens.
Seitliches Loch für die Fixierung des Zahnriemens

In Abbildung 4.42 wird ersichtlich, dass die Schraube von der Seite aus durch ein Loch geschoben (4.42, 1.) und dann durch die Mutter und gegen das lose Objekt geschraubt wird.

Elektronikbox

Die Elektronikbox beinhaltet sämtliche Elektronik-Komponenten und verbindet alle Motoren miteinander. Wie in Abbildung 4.14 gezeigt, wird die Elektronikbox auf die Hauptplattform drauf geschraubt. Um das ganze System zu steuern, wird an die Elektronikbox ein kleines Display sowie ein Joystick montiert.

Die Elektronikbox besteht insgesamt aus fünf verschiedenen Teilen.

1. Boden mit Wänden, siehe Anhang A.1
2. Front mit Befestigung eines Displays, siehe Anhang A.2
3. Deckel der Front mit Befestigung für Joystick, siehe Anhang A.3
4. Trennungsplattform zwischen Raspberry Pi und Arduino Nano, siehe Anhang A.4
5. Deckel der restlichen Elektronikbox, siehe Anhang A.5

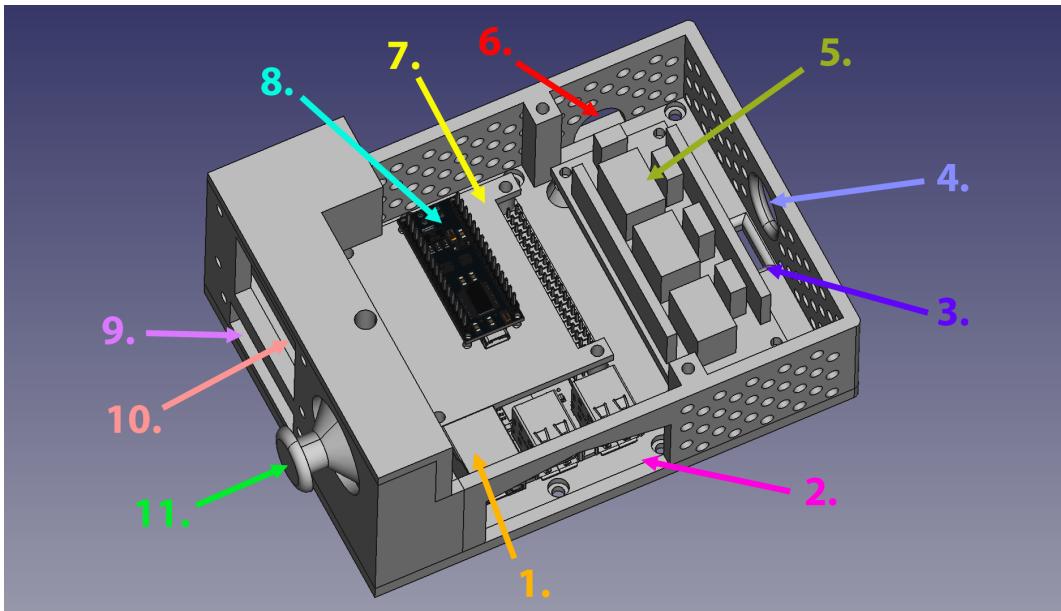


Abbildung 4.43.: Elektronikbox, Ansicht von oben ohne Deckel. Die Box ist in fünf Objekte geteilt. Boden mit Wänden. Front mit Löchern für einen Joystick (11.), ein Display (10.) und Zugang zu den seitlichen Eingängen (9.) des innen drin montierten Raspberry Pi (1.). Deckel über Display und Joystick. Plattform über Raspberry Pi für Montage des Arduino Nanos (8.). Nicht sichtbar auf dem Bild: Deckel über restlicher Elektronik. Die Wände sind für gute Luftzirkulation und Kühlung mit vielen Löchern bestückt. An der vorderen Seite ist ein großes Loch (2.), um an die USB-B Schnittstellen des Raspberry Pi's (1.) zu gelangen. Für die Kabel des Slider-Motors durch den Boden der Hauptplattform, ist ebenfalls in der Elektronikbox ein Loch vorhanden (3.). Für die Kabel des Pan-Motors ist ein Loch in der hinteren-seitlichen Wand positioniert (4.). Die Motortreiber zur Steuerung werden auf eine extra Platine gelötet und auf den Boden der Elektronikbox geschraubt (5.). Für die Kabel des Tilt-Motors ist an der hinteren Wand ein Loch so positioniert, dass es mittig des Befestigungsfußes des Tilt-Motors liegt (6.). Über dem montierten Raspberry Pi, wird zusätzlich zur Motor-Steuerung ein Arduino Nano (8.) verwendet. Dieser wird auf eine kleine Plattform (7.) geschraubt, welche auf den Raspberry Pi fixiert wird.

Da die Details der Teile nicht von größerer Bedeutung sind, befinden sich Bilder der einzelnen Objekt im Anhang im Kapitel A.

Auf dem Boden der Elektronikbox befinden sich leichte Erhöhungen, wodurch der Raspberry Pi (4.43, 1.) und eine Platine zur Verbindung der Motortreiber (4.43, 5.) direkt auf den Boden geschraubt werden können. Für die Befestigung des Arduino Nano's (4.43, 8.), wird eine Plattform (4.43, 7.) zwischen den Arduino und den Raspberry positioniert. Um Zugriff auf die USB-B Schnittstellen des Raspberry Pi's zu erhalten, wird in die vordere Wand ein breites Loch konstruiert (4.43, 2.). Für die Kabel des Pan-Motors (4.43, 4.) und die Kabel des Tilt-Motors (4.43, 6.) wird an den anderen Wänden ebenfalls ein größeres Loch gelassen. Die restlichen kleinen Löcher in den Wänden sind für eine gute Luftzirkulation und der daraus resultierenden Kühlung zuständig. Da die Kabel des Slider-Motors durch ein Loch in der Hauptplattform kommen, wird im Boden der Elektronikbox ebenfalls ein Loch an der gleichen Position konstruiert (4.43, 3.). Das Display für die Steuerung wird

an der Front befestigt (4.43, 10.). Unter dem Display befindet sich ein Loch um an die seitlichen Anschlüsse des Raspberry Pi's zu gelangen (4.43, 9.). Der Joystick wird an dem Deckel der Front befestigt (4.43, 11.).

4.1.5. Benötigte Hardware einkaufen

4.1.6. Hardware zusammenbauen

4.2. Software

4.2.1. Anforderungen an die Software stellen

4.2.2. UML-Diagramm konzipieren

4.2.3. Hardwareansteuerung implementieren

4.2.4. Gesichtserkennung implementieren

4.2.5. Algorithmus zur Verarbeitung der Position des Gesichts zu Motorbewegungen entwickeln und implementieren

4.2.6. Hardwareansteuerung, Gesichtserkennung und Algorithmus zur Verarbeitung zusammenführen

4.3. Testen

4.3.1. Hardware auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen

4.3.2. Software auf Funktionstüchtigkeit und Grenzen testen

4.4. Erweiterungen

5. Ergebnis

Referenzierung zu Aufgabenstellung.

→ Was habe ich geschafft, was habe ich nicht geschafft?

Als (Not-)Lösung: Tabelle der Aufgaben mit Spalte “konnte erledigt“ werden

6. Reflektion

Was habe ICH gelernt (ich erlaubt)

Hier auch Gedanken zu Recycling des 3D-Mülls

7. Ausblick

Ausblick mit Erweiterungsvorschlägen

8. Danksagung

Hier kommt die Danksagung hin

Literatur

- [1] Eyal Abraham. *Differential pan-tilt*. Mai 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=LF1JT0Pmddc> (besucht am 12.03.2022).
- [2] FreeCAD. *FreeCAD - Offizielle Website*. URL: <https://www.freecadweb.org/> (besucht am 07.03.2022).
- [3] Tobias Häberlein. *Technische Informatik - Ein Tutorium der Maschinenprogrammierung und Rechnertechnik*. Vieweg+Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1372-5.
- [4] Isaac879. *3D Printed DSLR Camera Pan Tilt Mount (Arduino/Stepper Driven) 2020*. Mai 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=uJ07mv4-0PY> (besucht am 12.03.2022).
- [5] Isaac879. *Pan-Tilt-Mount*, GitHub. März 2021. URL: <https://github.com/isaac879/Pan-Tilt-Mount> (besucht am 16.03.2022).
- [6] Python. *Python - Offizielle Website*. URL: <https://www.python.org/about/> (besucht am 06.03.2022).
- [7] ServoCity. *ServoCity Products: PT2645S Pan and Tilt System*. Juli 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=EfovZizgfh8> (besucht am 12.03.2022).
- [8] Wikipedia. *C-Programmiersprache*. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/C_\(Programmiersprache\)](https://de.wikipedia.org/wiki/C_(Programmiersprache)) (besucht am 06.03.2022).
- [9] Wikipedia. *Pan*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Panning_\(camera\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Panning_(camera)) (besucht am 03.03.2022).
- [10] Wikipedia. *Tilt*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tilt_\(camera\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tilt_(camera)) (besucht am 02.03.2022).
- [11] Wikipedia. *Ultimaker Cura - Wikipedia Artikel*. URL: <https://www.freecadweb.org/> (besucht am 07.03.2022).

A. Elektronikbox Komponenten

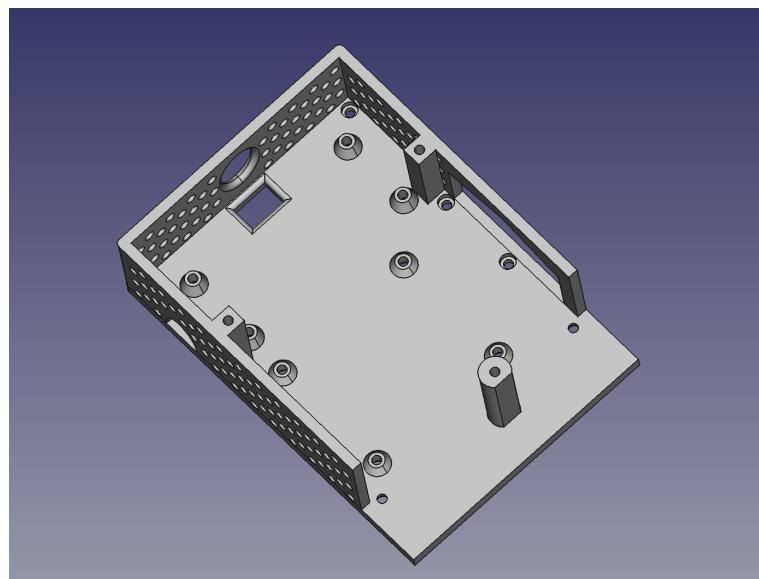


Abbildung A.1.: Elektronikbox - Boden mit Wänden

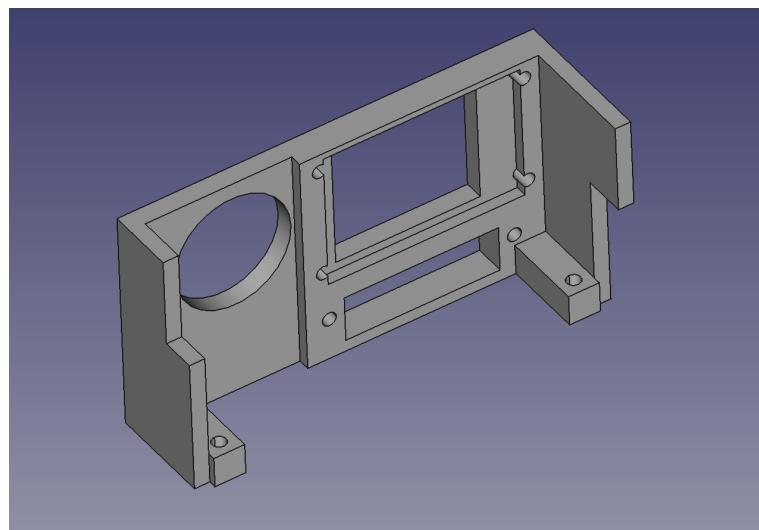


Abbildung A.2.: Elektronikbox - Front mit Löchern für Joystick, Display und Durchgang zu seitlichen Anschlüssen des Raspberry Pi's

A. Elektronikbox Komponenten

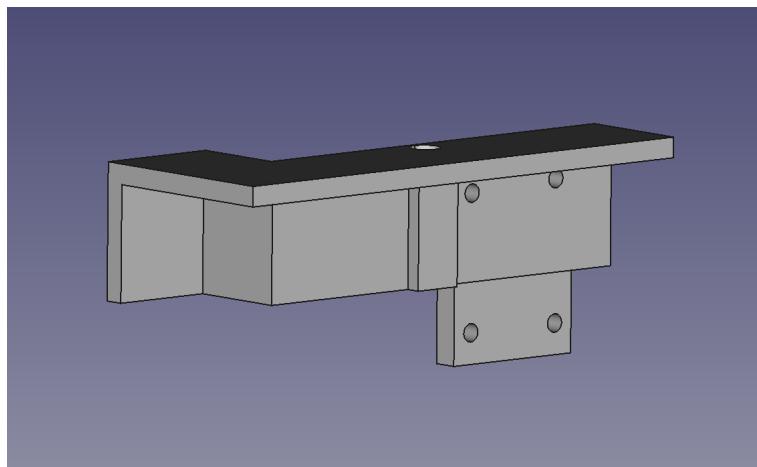


Abbildung A.3.: Elektronikbox - Deckel der Front mit Befestigungsmöglichkeit für Joystick

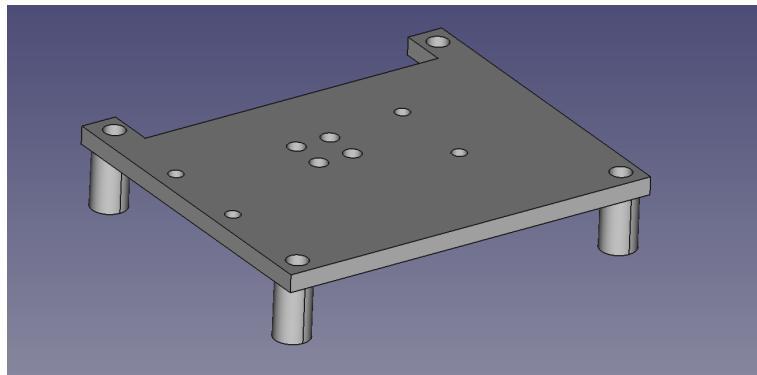


Abbildung A.4.: Elektronikbox - Trennungsplattform zwischen Raspberry Pi und Arduino Nano

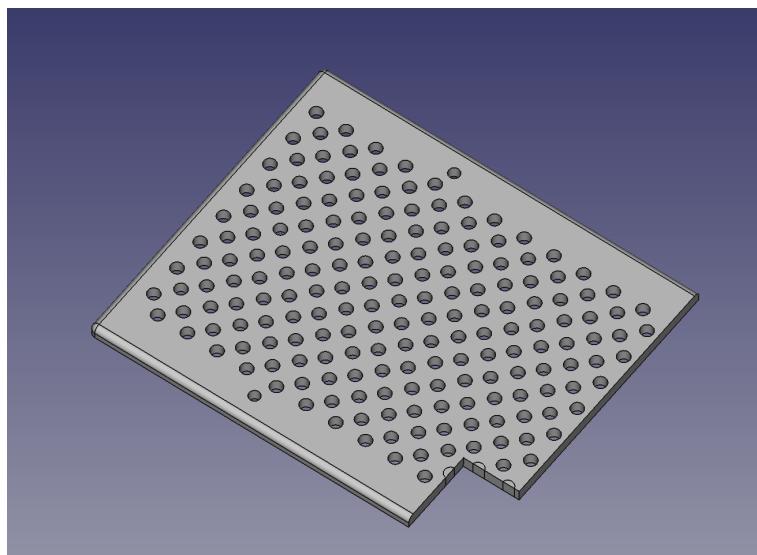


Abbildung A.5.: Elektronikbox - Deckel der restlichen Elektronikbox