**Komplexlabor-Entwurf**

|  |  |
| --- | --- |
| **Aufgabenstellung** | **Kugellabyrinth** |
|  |  |
| **Entwurfsausgabe** | **20.09.2022** |
|  |  |
| **Testat** | **02.11.2022** |
|  |  |
| **Fertigungszeitraum** | **45. bis 50 KW 2022** |
|  |  |
| **Abgabetermin** | **20.12.2022** |
|  |  |
| **Benotung:** | **Unterschrift Prüfer** |

**Mit der Unterschrift erklären die Studierenden, dass die eingereichte Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde.**

Dirks, Jannes Datum: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Kramer, Jakob Datum: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Merbt, Felix Datum: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Inhaltsverzeichnis**

[1 Vorüberlegung und Planung 3](#_Toc122414759)

[1.1 Präzisieren der Aufgabenstellung 3](#_Toc122414760)

[1.2 Erstellen der Anforderungsliste 4](#_Toc122414761)

[1.3 Ausarbeiten der Funktionsstruktur 5](#_Toc122414762)

[2 Mechanische Entwicklung 7](#_Toc122414763)

[2.1 Entwicklung von Lösungsansätzen 7](#_Toc122414764)

[2.1.1 kardanische Aufhängung 7](#_Toc122414765)

[2.1.2 Aufbau der Anriebe 8](#_Toc122414766)

[2.1.3 Gestaltung der Fernsteuerung 8](#_Toc122414767)

[2.2 Bewertung der Lösungsansätze 10](#_Toc122414768)

[2.2.1 kardanische Aufhängung 10](#_Toc122414769)

[2.2.2 Aufbau der Anriebe 11](#_Toc122414770)

[2.2.3 Gestaltung der Fernsteuerung 11](#_Toc122414771)

[2.3 Gesamtkonzeptes des mechanischen Aufbaus 12](#_Toc122414772)

[2.4 Berechnungen und Betrachtungen kritischer Lösungsansätze 13](#_Toc122414773)

[3 Elektronik- und Softwareentwicklung 14](#_Toc122414774)

[3.1 Auswahl des Antriebs und der Ansteuerung 14](#_Toc122414775)

[3.1.1 Antrieb 14](#_Toc122414776)

[3.1.2 Ansteuerung durch die Sensorik 16](#_Toc122414777)

[3.2 Versuchsaufbau des Antriebs und der Sensorik 19](#_Toc122414778)

[3.2.1 Antrieb 19](#_Toc122414779)

[3.2.2 Sensorik 20](#_Toc122414780)

[3.3 Konzeption der Hardware 21](#_Toc122414781)

[3.4 Problemlösung der fehlerhaften Hardware 22](#_Toc122414782)

[3.5 Konzeption der Software 22](#_Toc122414783)

[3.5.1 Anforderungen 22](#_Toc122414784)

[3.5.2 Programmfunktionen 22](#_Toc122414785)

[3.5.3 Programmstruktur 23](#_Toc122414786)

[3.6 Testphase 24](#_Toc122414787)

[4 Resümee 24](#_Toc122414788)

[5 Anhang 25](#_Toc122414789)

[6 Quellen 25](#_Toc122414790)

# Vorüberlegung und Planung



(Bild 1: Kugellabyrinth)

## Präzisieren der Aufgabenstellung

Im ersten Termin wurde der Umfang der Aufgabenstellung besprochen. Die Arbeit ist nach den ausgehändigten Anforderungen im Team und unter Einhaltung der Terminierung zu absolvieren. Dabei sind alle Vorgehensweisen, welche im Studium vermittelt wurden zu berücksichtigen. Die Dokumentation ist anhand der Teilaufgaben durchzuführen.

Insbesondere wurde Folgendes besprochen:

* das Eingabegerät (Handstück) steuert das Labyrinth
* die Kugel darf nicht durch das Eingreifen in das System aufgelegt werden
* ein Hauptkriterium ist, dass die Fertigung alleinig durch die Gruppe geschieht
* die Bewertung während der Entwicklungsphase soll nur durch +/-/o geschehen
* Schrauben M3 bevorzugt verwenden, hier sollte ein minimalistischer Ansatz in der Vielfalt gewählt werden

## Erstellen der Anforderungsliste

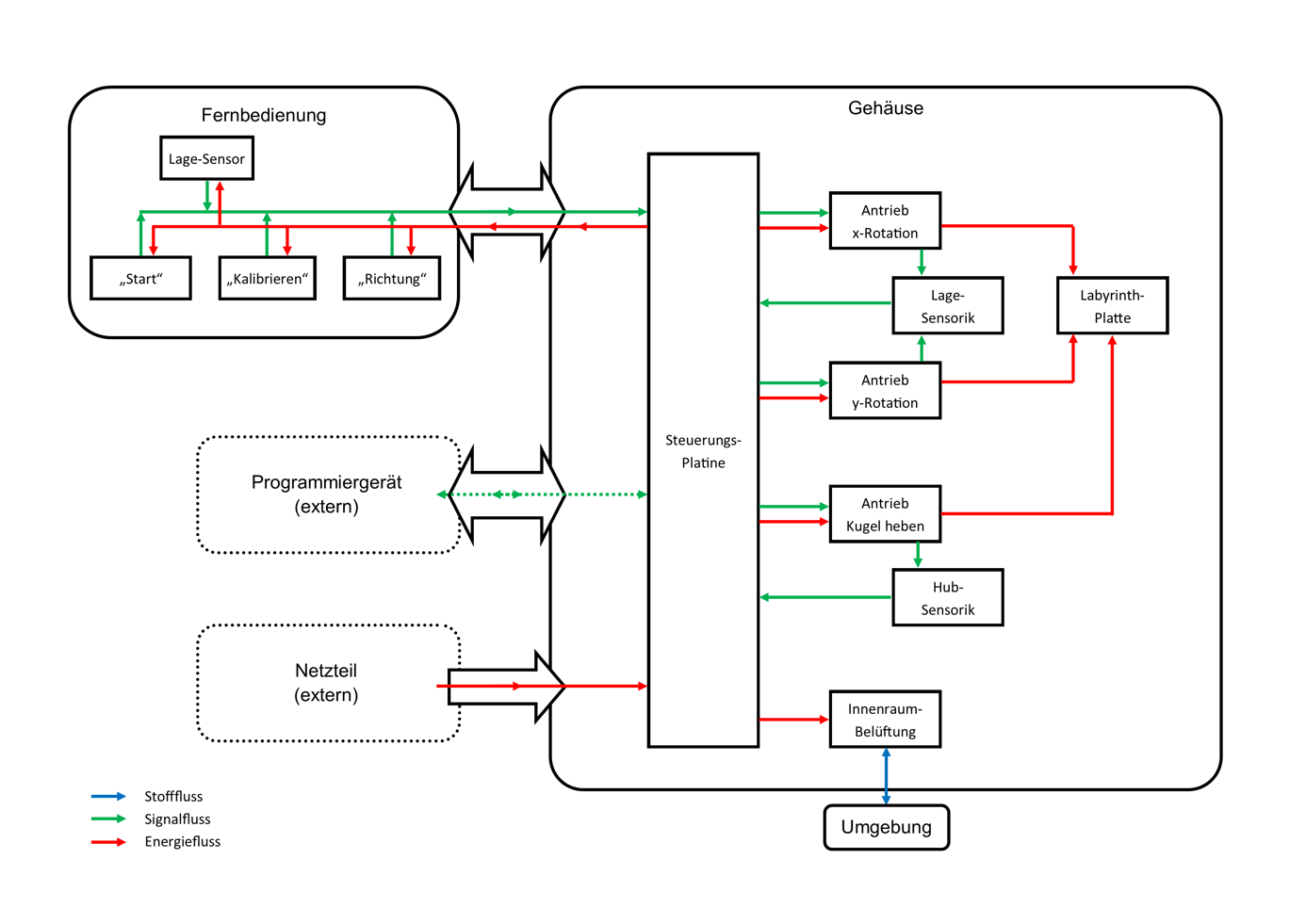
Das Gesamtkonzept wurde in der Gruppe besprochen und anhand dessen sowie der Aufgabenstellung eine Anforderungsliste erstellt. In der Anforderungsliste werden alle relevanten Rahmenbedingungen gelistet, um eine strukturierte Übersicht zum Auftrag zu erlangen.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Anforderungsliste Kugellabyrinth vom 22.09.2022** | | Festforderung(F),  Mindestforderung(M),  Ziele(Z), Wünsche(W) |
| **Zuordnung/ Anforderung** | **Detail/Wert** | **F/M/Z/W** |
| **Ansteuerung** | | |
| Kabelgebunden | Lösbare USB-C Steckverbindung | F |
| Ortsungebunden | von beliebiger Seite steuerbar | F |
| Ergonomische Fernbedienung | Form- und Gewichttechnisch gut in der Hand liegend | F |
| **Mechanik** | | |
| Aufhängung | Kardanisch aufgehängt | F |
| Drehachsen | Auf der Achse der Kugelmitte |  |
| Montage- /Wartungsfreundlich | Normteile, einfaches und schnelles öffnen des Gehäuses | F |
| Verlustsicherung | Spielkörper gegen Verlust/Herausfallen gesichert | F |
| **Elektronik** | | |
| Elektromotor | Preiswürdig und passende Baugröße | F |
| Ein-/Ausschalter | gemäß Vorgabe | F |
| Stromversorgung | Labornetzteil mit 12V maximal 1A mit Laborkabel (rot/schwarz) | F |
| Verarbeitungseinheit | Mikrocontroller Arduino uno oder ähnliche | F |
| Drehratensensor | Typ MPU-6050 ist zu verwenden | F |
| Kabelmanagement | Mechanische stabil und räumlich definiert | F |
| **Gesamtsystem** | | |
| Beanspruchung | Robust für Transport und Lagerung |  |
| Abmessungen | Größe von 20 cm x 20 cm x 10 cm nicht überschreiten | F |
| Umhausung | Vollständig gegen Vandalismus & Manipulation | F |
| Gewicht | Die Gesamtmasse sollte kleiner als 1kg sein | F |
| Labyrinth | Größe mindestens 100 mm x 100 mm, kardanisch gelagert | F |
| Spielkörper | Kugel mit Durchmesser 5mm | F |
| Reaktionszeit | Spielbar | F |
| Neigungswinkel | Begrenzt auf ca. +/- 10 Grad | F |
| Startposition | Definierte Startposition des Spielfeldes in der X-Y-Ebene | F |
| **Sonstiges** | | |
| Inbetriebnahme | Werkzeuglos durch Ein- /Ausschalter auf gerader Aufstellfläche | F |
| Sicherer Stand | Stabil (nicht Kippeln), Rutschfest | F |
| Autonomie | Betrieb durch Energieversorgung und Anschalten möglich | F |
| Abgabetermin | 20.12.2022 | F |

(Tabelle 1: Anforderungsliste)

## Ausarbeiten der Funktionsstruktur

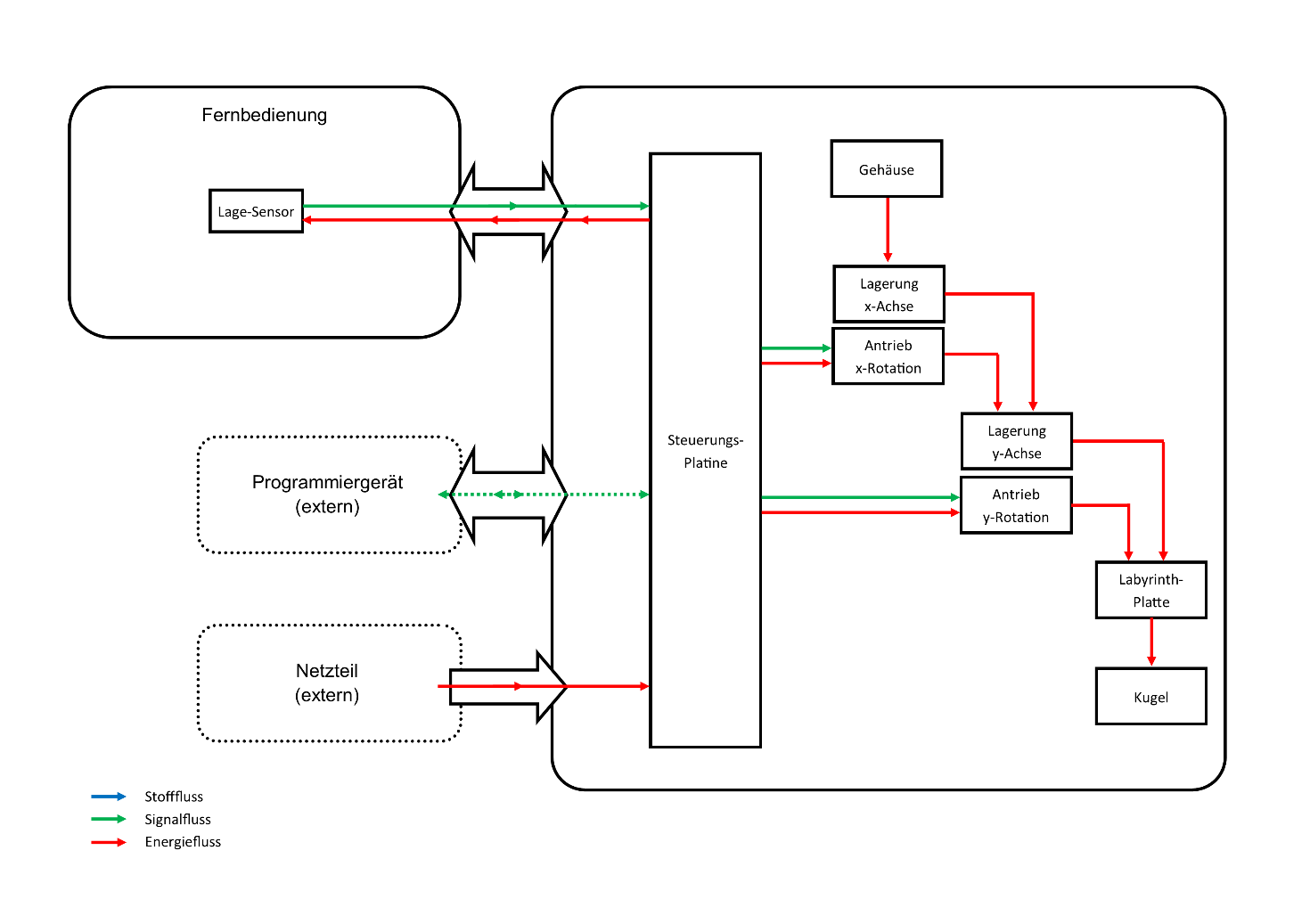
Anhand der Vorüberlegungen zu dem Gesamtkonzept wurde eine Funktionsstruktur entwickelt. Hier wurde ein Grafischer Lösungsansatz gewählt.



(Bild 2: Ursprüngliche Funktionsstruktur)

In der Funktionsstruktur in Bild 1 sind die einzelnen Komponenten des Labyrinth-Spiels wie Fernbedienung, Spielgehäuse etc. als Einheiten gezeichnet und durch Blockpfeile miteinander verbunden. Die Blockpfeile symbolisieren Verbindungsleitungen und geben die möglichen Flussrichtungen an. Gestrichelte Objekte und Verbindungen sind nicht Bestandteil der Projektaufgabe und werden daher nicht näher betrachtet.

Herzstück des Kugellabyrinth-Spiels ist die Steuerungsplatine, die jeglichen Signal- und Energiefluss an die jeweiligen Funktionen verteilt und die Signale der jeweiligen Sensoren und Bedienelemente intern verarbeitet. So ist hier auch eine Kontrolle vorgesehen, die die mithilfe der Fernbedienung eingestellte Soll-Lage mit der Ist-Lage der Labyrinth-platte vergleicht und die Antriebe entsprechend regelt. Des Weiteren ist ein Antrieb zum Heben der Kugel auf die Spielebene vorgesehen, welcher ebenfalls mittels Sensoren überwacht wird. Eine Innenraum-Belüftung dient der Luftzirkulation im Gehäuse und damit der Kühlung sowohl der Antriebe, als auch der Steuerungsplatine.



(Bild 3: Finale Funktionsstruktur)

Es ist erkennbar, dass in der ursprünglichen Funktionsstruktur Funktionen enthalten sind, die sich später nicht im fertigen Kugellabyrinth-Spiel wiederfinden (z.B. zusätzliche Eingabeelemente in Fernbedienung). In Bild 2 wird die endgültige Funktionsstruktur dargestellt.

Der Entschluss, nicht geforderte Funktionen weg zu lassen, geschah vor der Fertigungsfreigabe. Nach dem Aufzeigen der Lösungsansätze und dem Fertig entwickelten Produkt wurde verdeutlicht, dass nicht geforderte Features nicht mit in die Bewertung einfließen und der Aufwand der Aufgabe dadurch erheblich steigt bzw. weniger Fokus auf den geforderten Funktionen liegt.

Das Weglassen der Funktionen dient ebenfalls der Benutzerfreundlichkeit, da nach dem Einschalten des Systems nach kurzer Initialisierungszeit direkt gespielt werden kann. Eine Bewegung der Fernbedienung führt direkt zu einer Bewegung des Systems, ohne vorher ein Menü durchlaufen zu müssen.

# Mechanische Entwicklung

## Entwicklung von Lösungsansätzen

Es wurden, wie in der Aufgabenstellung gefordert, drei Lösungsansätze für die folgenden Teilprobleme entwickelt. Dabei wurde auf die damit verbundene Ansteuerung sowie die Sensorik geachtet. Die Lösungsansätze wurden mittels normgerechter Handskizzen dokumentiert und falls nötig durch Stichpunkte oder Schaltpläne verdeutlicht.

### kardanische Aufhängung

Die kardanische Aufhängung wird mittels einer gelagerten Rahmenkonstruktion umgesetzt, welche anschließend in das Gehäuse Integriert wird. Zudem wird die Lagerung betrachtet.

**Lagerung**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Kugelllager | Gleitlager | Bohrung als Lager |
|  |  |  |
| Eine Seite der Welle mit einem Kugellager gelagert und die andere Seite fest in eine Bohrung eingestzt. | Eine Seite der Welle mit einem Gleitlager gelagert und die andere Seite fest in eine Bohrung eingestzt. | Eine Seite der Welle in einer geriebenen Bohrung gelagert und die andere Seite fest in eine Bohrung eingestzt. |

(Tabelle 2: Lagerung)

**Aufhängung**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Montage auf Grundplatte | Montage in Dekel | Montage in Seiten- und 3D-Druckteil |
|  |  |  |
| Aufhängung über zwei Lagerblöcke aus PMMA montiert in der Grundplatte | Aufhängung über zwei Lagerblöcke aus PMMA am Deckel | Aufhängung über ein Seitenteil der Umhausung und einem 3D-Druckteil druch die Grundplatte |

(Tabelle 3: Aufhängung)

### Aufbau der Anriebe

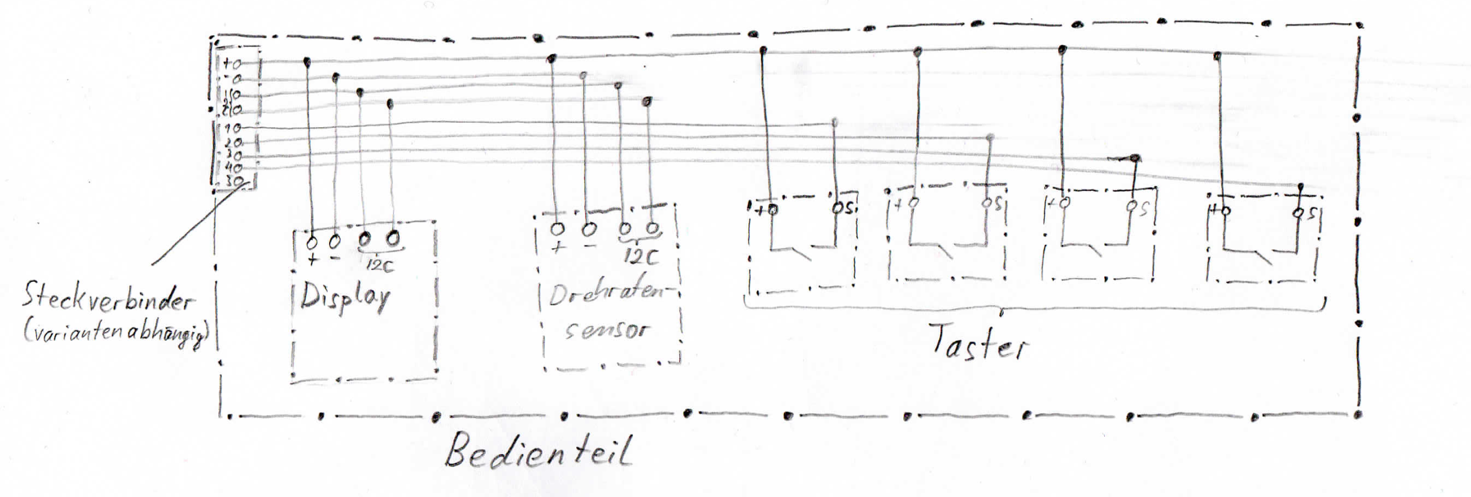
|  |  |
| --- | --- |
| Bowdenzug | Hebelarm |
|  |  |
| Motoren sind auf der Grundplatte montiert und es wird ein Bowdenzug an dem Kardanisch aufgehängten Spielfeld so befestigt, dass die Drehung des Motos in eine Neigung des Spielfeldes umgesetzt wird. Der Bowdenzug wird dafür vom Motor auf eine Rolle aufgerollt. | Einer der Motoren wird in der Aufhängung des Spielfeldes befestigt, der andere auf dem Rahmen der kardanischen Aufhängung. Ein Hebelarm, welcher an je einem Motor montiert ist, leitet die Drehbewegung an die Spielfläche über ein Kugellager welches auf Laufschienen läuft weiter. |

(Tabelle 4: Antriebe)

### Gestaltung der Fernsteuerung

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Smartphone | Mini-Labyrinth | Handheld |
|  |  |  |
| Simple Form aus PMMA-Zuschnitten mit eingefasstem Display, Lagesensor innenliegend, zusätzliche Bedienelemente möglich | Tischgerät mit Selbst-Nivellierung durch Druckfedern, Bedienelemente und Display möglich. Steht immer auf Untergrund. PMMA-Zuschnitte und 3D-Druckteile. | Ergonomische Form mit Griffmulden, Display und Bedienelemente möglich, PMMA-Zuschnitte und 3D-Druckteile notwendig. |

(Tabelle 5: Fernsteuerung)

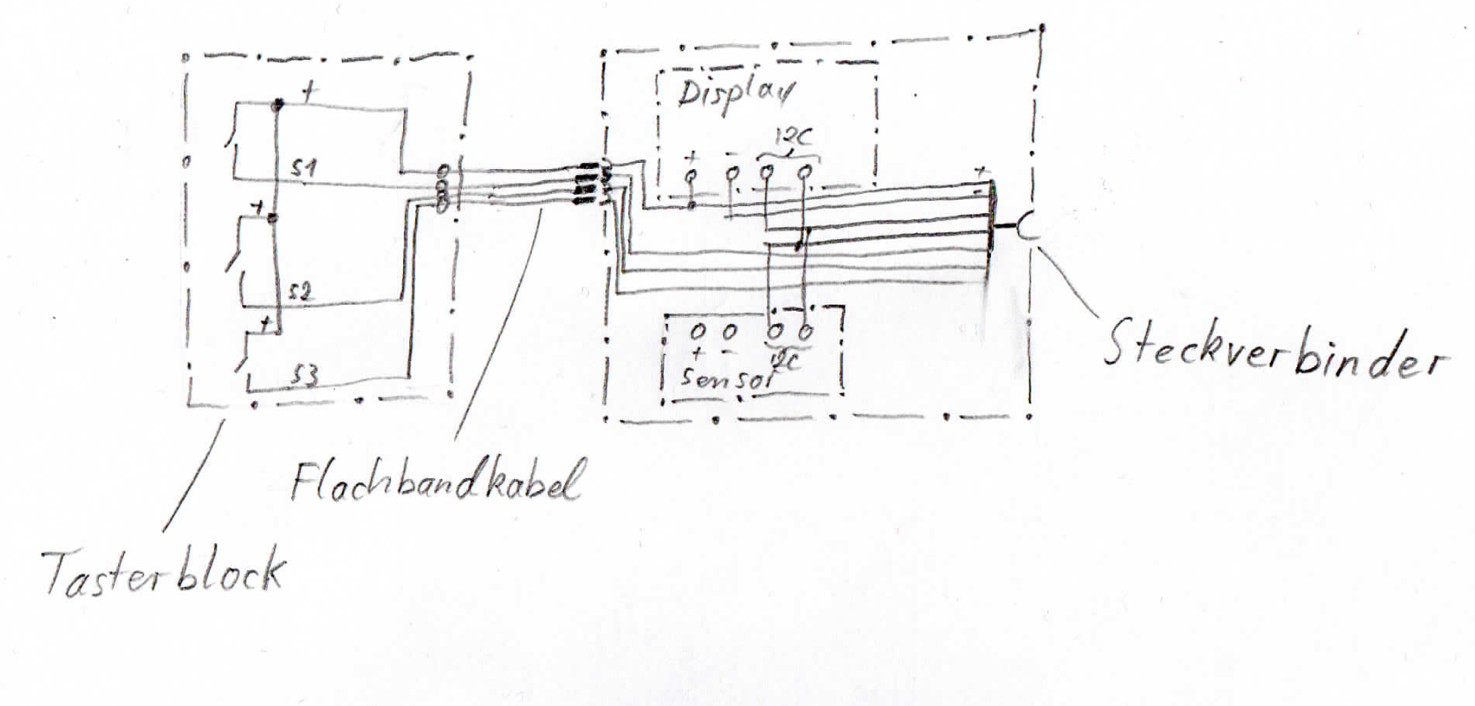


(Bild 4: Schaltplan für Varianten „Smartphone“ und „Handheld“)

In der Fernbedienung werden Display und Sensorplatine mit dem I²C-Standard angesprochen. Zudem können weitere Bedienelemente, wie z. B. Taster, über zusätzliche Leitungen angeschlossen werden. Auf diese Weise werden zusätzlich zu den zwei Adern für die Spannungsversorgung zwei Adern für den I²C-Bus sowie je eine Ader pro Taster benötigt.

Für die Varianten „Smartphone“ und „Handheld“ wird das gleiche Schaltungskonzept verfolgt (Bild 3). Hierbei sind alle Komponenten in einem Gehäuse, sodass keine Leitungsverlegung in andere Komponenten als das Labyrinth notwendig ist.

Im Gegensatz dazu wird bei der Variante „Mini-Labyrinth“ (Bild 4) die Taster-Einheit in das feststehende Unterteil eingesetzt, während die Sensoreinheit und das Display im beweglichen, aufgesetzten Oberteil verbaut sind. Der Steckverbinder zum Labyrinth wird ebenso in das Oberteil eingesetzt, die Taster werden über ein beweglich verlegtes Flachbandkabel mit dem Oberteil verbunden.



(Bild 5: Schaltplan für Variante „Mini-Labyrinth“)

Bei der vertiefenden Konzeptentwicklung wird auf die Einbindung eines Displays und zusätzlicher Taster verzichtet. Ein Display wird für das gewählte Spielkonzept nicht zwingend benötigt, sodass nicht weiter mit Display geplant wird. Ebenso werden keine zusätzlichen Taster mehr benötigt, da die Rückholung der Kugel nun anders gelöst wird.

## Bewertung der Lösungsansätze

Im Folgenden werden die Lösungsansätze nach selbstgewählten Kriterien unter Betrachtung des Aspekts der Einzelfertigung bewertet. Die Bewertung wurde wie besprochen nicht nach den üblichen Normen umgesetzt, sondern vereinfacht dargestellt. Anhand der Bewertung wurden die geeigneten Ansätze ausgewählt.

### kardanische Aufhängung

**Lagerung**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Kugellager** | | **Gleitlager** | | **Bohrung** | |
| **++** | **--** | **++** | **--** | **++** | **--** |
|  | Teuer |  | Teuer | Günstig |  |
|  | Hoher Montageaufwand |  | Presspassung notwendig | Einfache Montage |  |
|  | zwei Bauteile |  | zwei Bauteile | ein Bauteil |  |
|  | Schlechte Verfügbarkeit |  | Schlechte Verfügbarkeit | Verfügbar |  |
|  | Teilweise Eigenfertigung |  | Teilweise Eigenfertigung | Komplette Eigenfertigung |  |
| ++: Vorteile. --: Nachteile | | | | | |

(Tabelle 6: Bewertung der Lagerung)

Hier wurde die einfachste Lagerung realisiert durch eine Bohrung und einer darin beweglichen Welle ausgewählt. Die liegt daran, dass die Herstellung einfach und durch den geringsten Aufwand möglich ist. Zudem werden hierfür am wenigsten Bauteile benötigt und es muss kein Kaufteil abgesehen vom Rohmaterial für die Welle erworben werden. Bei der Fertigung werden hier die am wenigsten genausten Toleranzen gefordert. Es ist keine Presspassung vorhanden, welche für ein PMMA-Bauteil ungeeignet wäre.

**Aufhängung**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Montage auf Grundplatte** | | **Montage am Deckel** | | **Montage in Seiten- & 3D-Druckteil** | |
| **++** | **--** | **++** | **--** | **++** | **--** |
|  | Montageaufwand moderat | Einfache Montage |  |  | Hoher Montageaufwand |
| Gute Verfügbarkeit |  | Gute Verfügbarkeit |  |  | schlechte Verfügbarkeit |
| Keine Materialbeschränkung |  | Keine Materialbeschränkung |  |  | Materiallimit von 80g |
| Kompakte Bauweise |  | Kompakte Bauweise |  |  | Weniger kompakt |
| ++: Vorteile. --: Nachteile | | | | | |

(Tabelle 7: Bewertung der Aufhängung)

Die Montage am Deckel bringt die meisten Vorteile mit sich. Durch eine Montage am Deckel, wir realisiert, dass die komplette Aufhängung währen der Montage frei zugänglich ist und anschließend einfach in das Gehäuse eingesetzt und elektrisch durch einen Steckverbindung verkabelt werden kann. Dies ist auch hilfreich bei der Wartung, Reinigung und Instandsetzung. Ebenso werden keine 3D-Druckteile verwendet, somit sind die vorgegebenen 80g Gesamtmasse aller 3D-Druckteile vollständig für andere Bauteile verfügbar. Durch die einheitliche Materialverwendung in der Aufhängung wird ein homogenes Gesamtbild erreicht.

### Aufbau der Anriebe

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Bowdenzug** | | **Hebelarm** | |
| **++** | **--** | **++** | **--** |
| Spielfrei | Nur Zugkräfte können übertragen werden | Keine zusätzlichen  Stellelemente erforderlich | Spiel in der Führung |
| Montage im Leerraum unterhalb des Labyrinths | Zusätzliche Bauteile zur Motorfixierung notwendig | Einfache Konstruktion möglich |  |
|  |  | Anbringen der Motoren direkt in der Aufhängung |  |
| ++: Vorteile. --: Nachteile | | | |

(Tabelle 8: Bewertung der Antriebe)

Der Lösungsansatz Hebelarm wurde gewählt da die simple Umsetzung der Bewegung bekannt und bewährt ist. Durch die gut sichtbare Positionierung der Antriebmechanik direkt am Spielfeld ist für den User die Funktionsweise gut nachvollziehbar, was für die in der Aufgabenstellung geforderte Verwendung als Demonstrator passend ist. Die Problembetrachtung und eine kritische Bewertung werden unter dem Kapitel 2.4 Berechnung und Betrachtung kritischer Lösungsansätze abgehandelt.

### Gestaltung der Fernsteuerung

Eine Betrachtung der Vor- und Nachteile der Fernbedienung liefert folgende Tabelle:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Smartphone** | | **Mini-Labyrinth** | | **Handheld** | |
| **++** | **--** | **++** | **--** | **++** | **--** |
| Einfache Platten-Konstruktion | Schlicht | Definierte  Ruhelage | Hoher Fertigungsaufwand | Ergonomisch geformt | Sperrig |
| PMMA-Zuschnitte |  | Leichte Bedienbarkeit | Federn könnten sich lösen | Leichte Bedienbarkeit | 3D-Druckteile notwendig |
| Leichte Bedienbarkeit |  |  | Schlecht transportabel |  |  |
|  |  |  | 3D-Druckteile notwendig |  |  |
| ++: Vorteile. --: Nachteile | | | | | |

(Tabelle 9: Bewertung der Gestaltung der Fernbedienung)

Es zeigt sich, dass die Variante „Smartphone“ der beste Lösungsansatz ist, sodass dieser weiter verfolgt wird. Die anderen Lösungsansätze werden verworfen.

In der Konstruktionsphase wird deutlich, dass aufgrund der gewählten Funktionsstruktur keine zusätzlichen Bedienelemente benötigt werden, da die Spielstruktur so einfach wie möglich gehalten wird. Somit entfällt die Option, Taster in die Fernbedienung zu integrieren. Auch das Display wird nicht mehr benötigt. Stattdessen soll die Sensorplatine im Fokus stehen: Durch die transparenten Acrylglasplatten wird ein aufgeräumtes Design geschaffen, sodass die Bedienenden freien Blick auf die verbaute Elektronik erhalten.

Die Platten-Konstruktion erlaubt es, die Sensorplatine mit Stiften in der Fernbedienung zu fixieren. So sind nur vier Schrauben in den Ecken notwendig, um die Konstruktion zusammen zu halten. Ausschnitte in den Platten sorgen dafür, dass die Sensorplatine gerade in der Fernbedienung liegt und keine unerwünschten Berührungspunkte entstehen.

## Gesamtkonzeptes des mechanischen Aufbaus

Die oben dargestellten Teillösungen wurden nach der Bewertung in der Gruppe zusammengeführt und das Gesamtkonzept ausgearbeitet. Dieses beinhaltet die einzelnen Teillösungen die wie Folgt beschreiben werden können.

Die kardanische Aufhängung ist durch Bohrungen in PMMA- oder PLA-Bauteile und einer Welle zu realisieren. Hierbei ist auf eine sehr gute Gängigkeit der Lager zu achten. Für die Herstellung der relevanten Flächen ist falls nötig spanend nachzubearbeiten. Des Weiteren wird die Aufhängung über den Deckel der Umhausung realisiert.

Der Antrieb überträgt die Bewegung des Motors über einen Hebelarm auf ein Kugellager, welches auf glatten Laufflächen abrollt.

Für die Fernsteuerung wird von der Größe eine Art Smartphone entworfen, der Sensor wird dort im inneren Montiert und über eine USB Typ C Verbindung mit der Verarbeitungseinheit Verbunden.

Weiter wurden der Sonstige Aufbau in Catia gezeichnet und so in der Entwicklungsphase räumliche Anpassungen wie vorgenommen.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

(Bild 6: Ausgewählte Lösungsansätze)

## Berechnungen und Betrachtungen kritischer Lösungsansätze

Die Auslenkung des Labyrinths über die Kugellager verfügt nur über ein geringes Spiel in den Führungen, sodass nahezu kein Totbereich in der Ansteuerung vorgesehen ist. Insbesondere in der Mittelstellung des Systems hat das geringe Spiel nahezu keine Auswirkungen, da die Kreisbahn des Lagers am Hebelarm in dieser Stellung im rechten Winkel zu den Laufflächen steht. Bei größeren Winkeln des Labyrinths wird das Spiel zwar größer, empirisch kann dennoch kein merklicher Totbereich festgestellt werden.

Das Drehmoment des Motors wird bei einer Versorgungsspannung von 4,8 V mit 30 Ncm angegeben. Bei der vorhandenen Spannung von 5 V liegt es noch etwas höher. Da das Labyrinth jedoch weitgehend ausbalanciert ist, muss lediglich das Trägheitsmoment überwunden werden. Hierfür ist aus Erfahrungswerten bekannt, dass ein Drehmoment von 30 Ncm sehr deutlich ausreichend dimensioniert ist.

Die Lagerung des Labyrinths mittels Stiften im gebohrten Acrylglas wird hinsichtlich der Festigkeit des Acrylglases (Material: PMMA) überprüft. Hierbei wird die Flächenpressung an der Lagerstelle berechnet und mit der Zugfestigkeit von PMMA verglichen.

Die Masse des gesamten beweglichen Teils (Labyrinth und bewegliche Rahmenkonstruktion) ergibt sich zu   
m=0,373 kg. Der Stiftdurchmesser beträgt d=4 mm, die Einstecktiefe ist a=6 mm. Durch das abgeschlossene Gehäuse kann keine zusätzliche Kraft auf das System einwirken, sodass bei stationärem Betrieb von einer statischen Belastung (Belastungsfall I) ausgegangen werden kann.

Die wirkende Gewichtskraft ergibt sich zu:

F = m\*g = 0,373 kg \* 9,81 m/s² = 3,66 N (1)

Die Kraft verteilt sich auf zwei Lagerstellen, sodass für die Flächenpressung p in den Lagerstellen gilt:

p = F/(2\*A) = F/(2\*d\*a) = 3,66 N / (2\*4 mm \* 6 mm) = 76,25 mN/mm² (2)

Die Zugfestigkeit wird für PMMA mit Rm =70 N/mm² angegeben. Als Sicherheitsfaktor wird S=10 gewählt. Es wird angenommen, dass die Angabe für die Zugfestigkeit ebenfalls als maximal Zulässige Spannung bei Druckbelastung herangezogen werden kann. Abweichungen hiervon werden durch den sehr hohen Sicherheitsfaktor abgedeckt. Die maximal zulässige Spannung bei Druck ergibt sich so zu:

σD zul = Rm/S = 70 N/mm² / 10 = 7 N/mm² (3)

Der Vergleich von zulässiger Spannung und vorhandener Spannung zeigt, dass σD zul >> p.

Dies zeigt, dass der Werkstoff Acrylglas für die in der Konstruktion auftretenden Lagerkräfte geeignet ist.

Ebenso ist die Einstecktiefe mit a=6 mm groß genug gewählt. Eine separate Betrachtung der Festigkeit des Stiftes ist aufgrund der geringen Kräfte im System nicht erforderlich.

# Elektronik- und Softwareentwicklung

## Auswahl des Antriebs und der Ansteuerung

### Antrieb

|  |  |
| --- | --- |
| **Servomotor mit Hebelarm** | **Schrittmotor** |
|  |  |
| Die Servos bewegen über einen Hebelarm ein Kugellager in zwischen zwei Laufflächen (Ähnliches Prinzip einer Kurvenscheibe). Der Winkel der Fläche ist abhängig vom Kreisbogen des Hebels und dem Entstehenden Dreieck zur Rotationsachse. | Schrittmotoren treiben direkt die Achsen an, für die Übersetzung von gewünschtem Winkel der Spielfläche zu der Gesteuerten Ebene ist also direkt. |

(Tabelle 10: Antreibe)

In diesem Kapitel werden folgende Antriebsarten betrachtet:

* Servomotor
* Schrittmotor
* Gleichstrommotor

Der Gleichstrommotor ist Funktionsbedingt ungeeignet, da dessen Bewegung auf Grund der Bauart und deren Wirkungsweise kontinuierlich stattfindet. Mit einer entsprechend aufwendigen Folgemechanik wäre eine Verwendung möglich, jedoch ist dies zu Aufwendig und Kostenintensiv.

Die Vor- und Nachteile von Servo- und Schrittmotor werden in einer Nutzwertanalyse aufgezeigt und bewertet.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nutzwertanalyse Antrieb** | | | | | |
| **Bewertung mit +/-** | | **Servomotor** | | **Schrittmotor** | |
| **Nr.** | **Kriterium** | **Eigenschaft** | **Wertung** | **Eigenschaft** | **Wertung** |
| 1 | Geräusche |  | + |  | - |
| 2 | Vibration |  | + |  | - |
| 3 | Geschwindigkeit |  | + |  | + |
| 4 | Ansteuerung |  | - |  | + |
| 5 | Kosten |  | + |  | - |
| 6 | Verfügbarkeit |  | + |  | + |

(Tabelle 11: Bewertung der Antreibe)

Bei Verwendung eines Standard Nema-17 Schrittmotors wird die Motoransteuerung über ein Impulsmuster an die 4 Eingänge des Motors realisiert. Ein Mustertakt entspricht einem vollständigen Schritt des Motors, welcher einer Winkeländerung von 1,8° der Motorachse und damit auch der Spielebene entspricht. Durch Verwendung von Mikroschritten, also einer Änderung des Impulsmusters, lässt sich diese Steuergenauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit um den Faktor 16 erhöhen.

Zur Ansteuerung sind entweder zwei Transistoren pro Anschlusskontakt notwendig die eine Freie Belegung mit +12 oder GND ermöglichen, oder es wird ein Schrittmotorentreiber zu verwenden, der einen STEP (Schritt) und einen DIR (Richtung) Eingang besitzt.

Für die Ansteuerung der Servos ist lediglich eine Stromversorgung mit 5V und maximal 1A notwendig. Die Stellung des Motors wird dann über ein PWM-Signal kontrolliert, es sind also weniger Komponenten auf der Platine notwendig.

Ein weiterer Vorteil der Servos liegt in der Konstruktionsbedingten höheren resultierenden Winkelauflösung der Spielebene: Die verwendeten Servos haben mithilfe von Servo.writeMicroseconds() ohne Geschwindigkeitseinbuße eine Auflösung von etwa 1000 Schritten pro 180 °, die Nema 17 Schrittmotoren können eine Präzision von 100 Schritten pro 180° erreichen. Allerdings ist die Winkelübertragung bei den Schrittmotoren direkt, d.h. die finale Auflösung im Spielbereich +- 15° liegt bei 30° / 16 Schritten = 1,875 °/Step.

Diese Auflösung ist zum Spielen ungeeignet, sie lässt sich nur auf kosten der Dynamik durch Mikrostepping erhöhen. Die Servos allerdings wandeln etwa 150° Drehung in +- 15° Spielfeldneigung um. Hier ist die Stellpräzision also 0,04 °/Step, also weitaus feiner als für ein präzises Spielen notwendig wäre.

Der größte Nachteil der Schrittmotoren ist allerdings, dass keine absolute Positionssteuerung möglich ist. Es müssen Referenzpunkte angefahren werden, um danach relativ die Position einzustellen. Das bedeutet auch dass in Fällen wo das Haltemoment des Motors überschritten wird ein Schrittverlust erfolgt und die Referenzfahrt erneut notwendig ist. Die Servos hingegen fahren sofort mit Einschalten der Stromversorgung ihre durch das PWM-Signal bestimmte Stellung an.

Da die Drehwinkel der Schrittmotoren direkt auf die Fläche gegeben werden ist das Kinematische Modell denkbar einfach, bei den Servos dagegen wird eine Rotation in eine translatorische und dann wieder rotatorische Bewegung verwandelt. Daher ist das kinematische Modell hier komplexer, insgesamt überwiegen die Vorteile der Servo-Variante deutlich gegenüber der Stepper-Variante.

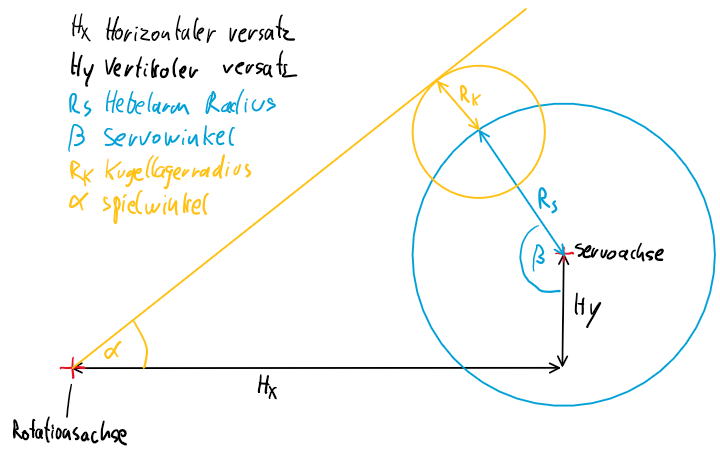
### Ansteuerung durch die Sensorik

Die Sensorik wurde durch die Aufgabenstellung Festgelegt. Es handelt sich dabei um einen MPU-6050. Dieser verfügt über die folgenden relevanten Features:

* Gyroskop
* 3-Achs-Beschleunigungssensor

Durch die Bewegung der Fernbedienung werden Signale vom MPU-6050 über ein USB Typ C Kabel an die Verarbeitungseinheit weitergegeben, mit Hilfe Dieser Daten werden dann die Motoren angesteuert.

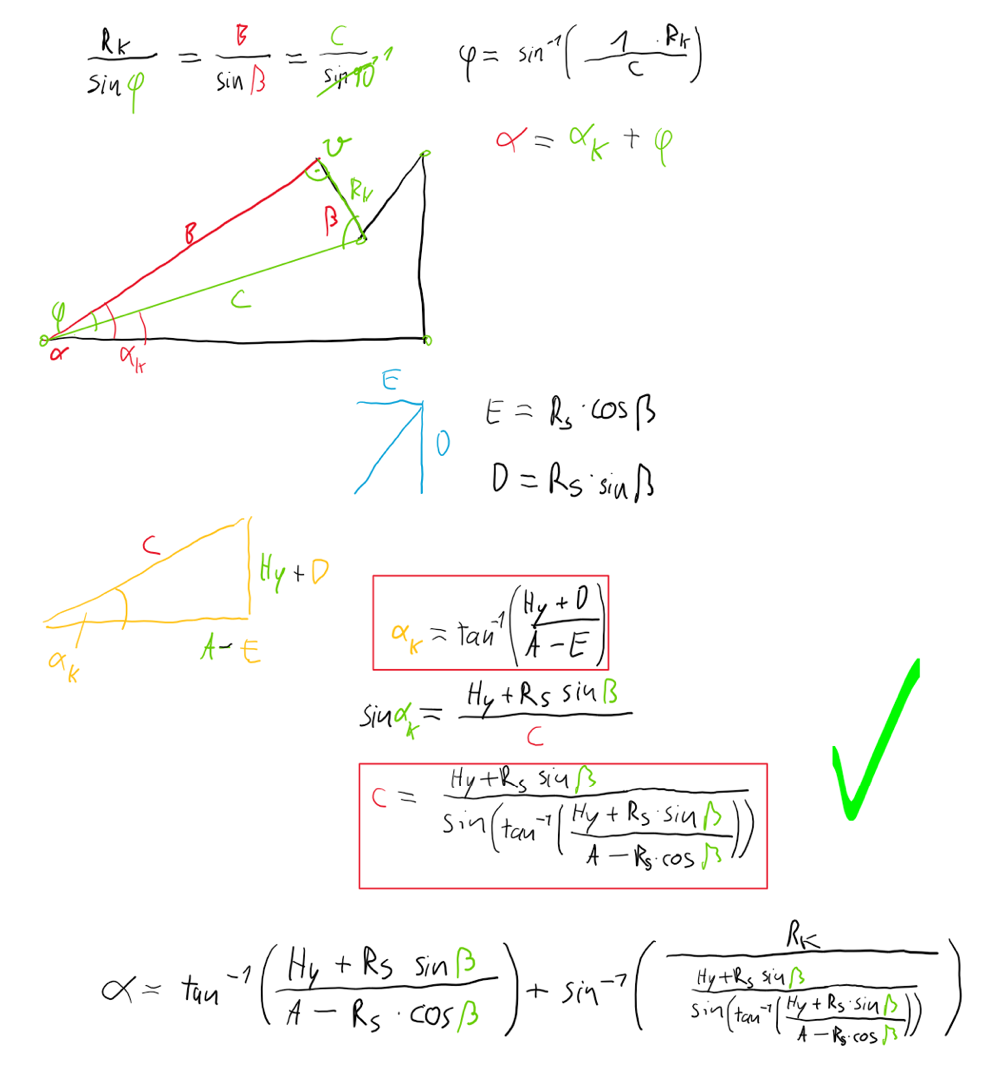
Für die Umsetzung des gewünschten Drehwinkels ist das Erstellen eines Kinematischen Modells der Konstruktion nötig. Dieses Lässt sich durch Aufzeichnen der Geometrie und umstellen der resultierenden Formeln bestimmen:



(Bild 7: kinematisches Modell 1)

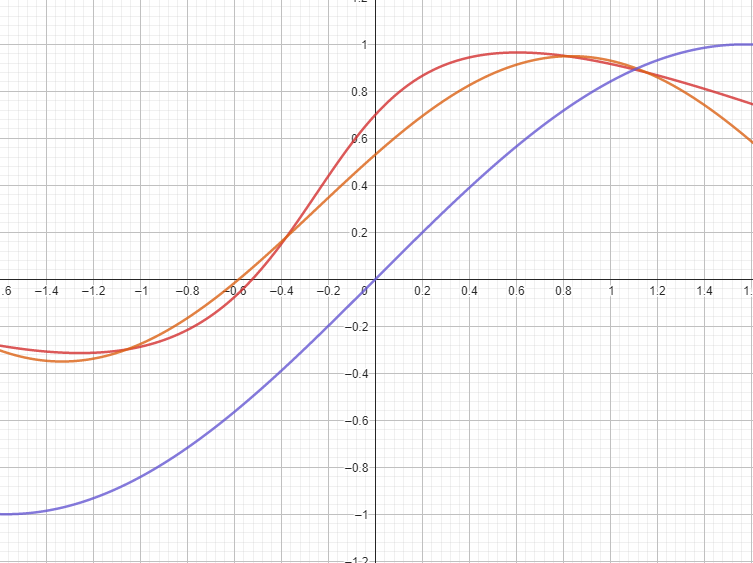
Die Erstellung eines Kinematischen Modells hat sich als Äußerst herausfordernd herausgestellt. Danach sehr vielen Ansätzen des Erstellens einer Funktion B(a) keine reale Funktion bestimmt werden konnte, wurde ein alternativer Ansatz gewählt. Eine für unseren Zweck zwar Nutzlose Funktion a(B) konnte bestimmt werden nachdem eine günstige Position der Winkel gewählt wurde:

  
(Bild 8: kinematisches Model 2)



(Bild 9: kinematisches Model 3)

Jetzt ist es möglich eine deutlich simplere Funktion über den Graphen zu legen und nach B aufzulösen. Zwar ist der verlauf nicht perfekt, eine genauere Funktion höheres Gerades lieferte aber keine merkbare Veränderung der Spielweise bei schlechterer Perfomance.



(Bild 10: kinematisches Model Plot)

Durch das Rechnen und die Verwendung der Math Bibliothek stellte sich allerdings heraus, dass die Laufzeit des Programms unter dem extraaufwand litt. Daher konnten wir die Aufgestellte Funktion zur Umrechnung nicht anwenden, ohne die Spielbarkeit merklich zu verschlechtern.

Für die Winkelerfassung wird ein MPU-6050 6 Achsen Gyroskop verwendet. Dieses ist aufgrund seiner Präzision, weiten Verbreitung und dem damit eingehenden Angebot an Dokumentation und Bibliotheken die Standartauswahl für Hobby und Prototypenanwendungen. Durch Auswahl von Generischen Bauteilen reduziert sich der Programmieraufwand und die Problembehebung fällt leichter. Da wir für unsere Anwendung keine außerordentlich hohe Präzision brauchen sind die gewählten Komponenten für diesen Zweck ideal.

Das Auslesen der Daten sowie das Ansteuern der Servos stellte dank umfassender Dokumentation keinerlei Problem dar. Für das Filtern von Zittern wird ein Infinit Impulse Response Filter verwendet:

Der Koeffizient a wird je nach Achse durch praktisches Spielen ermittelt. Das Ziel ist dass feine Bewegungen zwar sofort umgesetzt werden, die Motoren aber im Stillstand kaum Geräusche von sich geben.

## Versuchsaufbau des Antriebs und der Sensorik

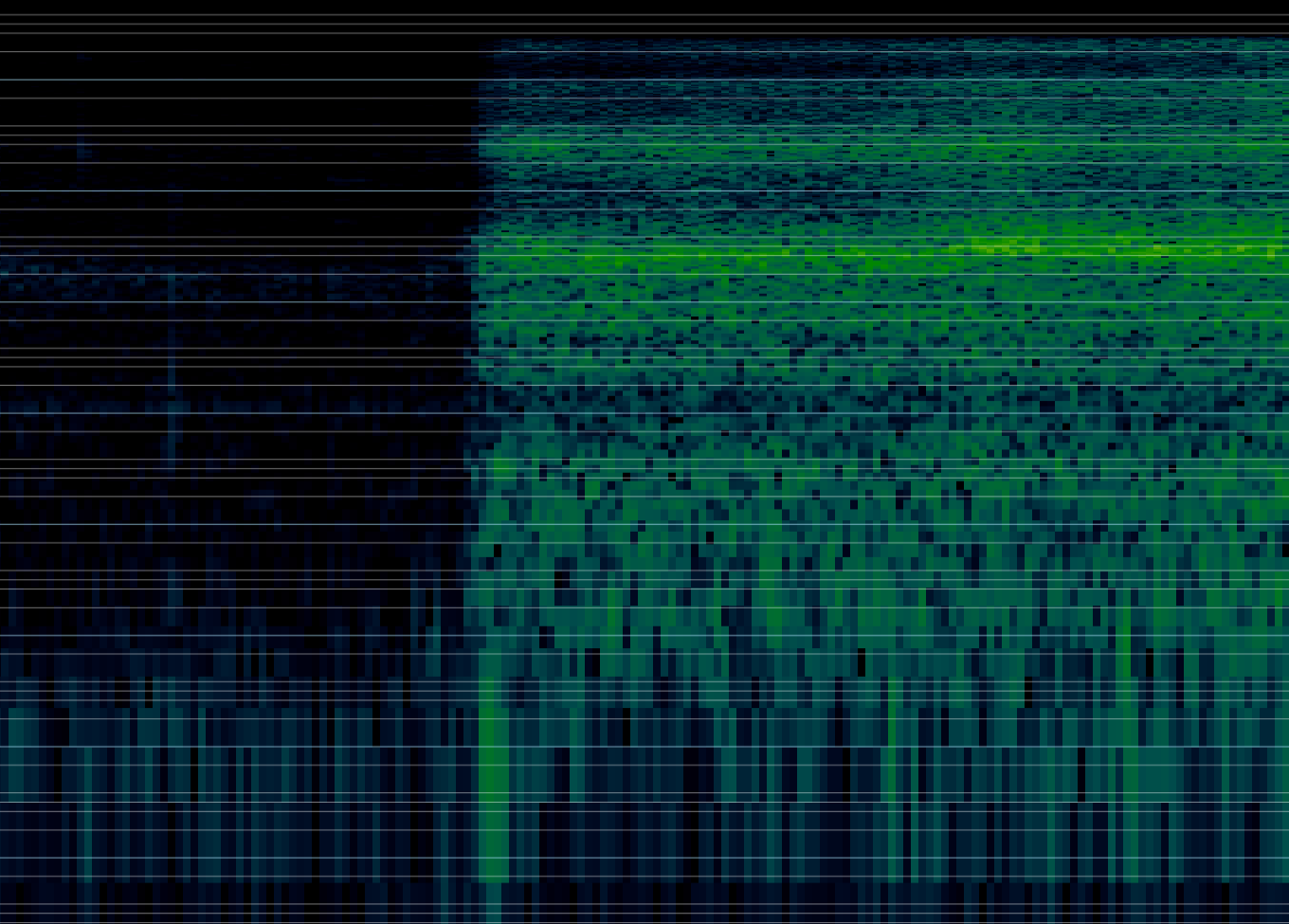
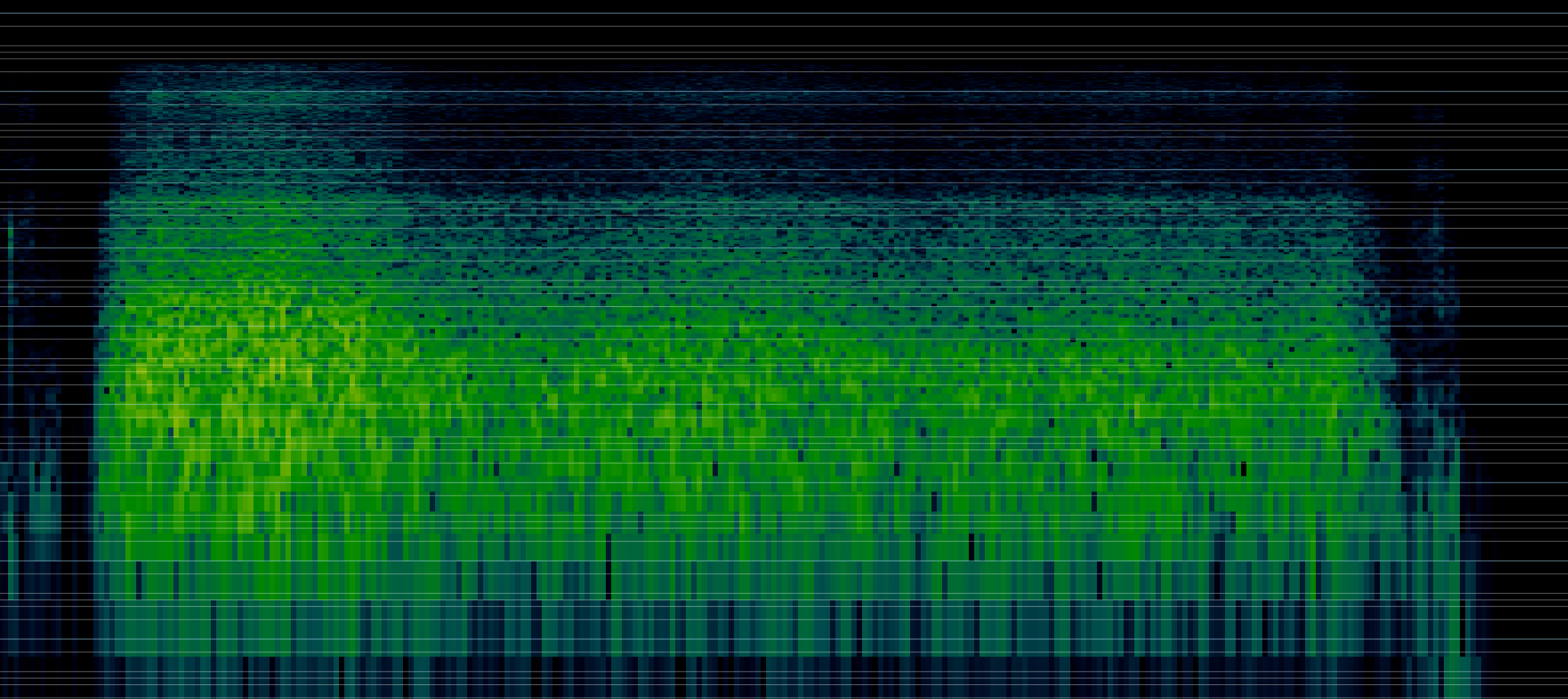
### Antrieb

Für einen ersten Test wurde der Servomotor mit einem Kurzen Programm angesteuert

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

(Bild 11: Untersuchung der Geräuschentwicklung)

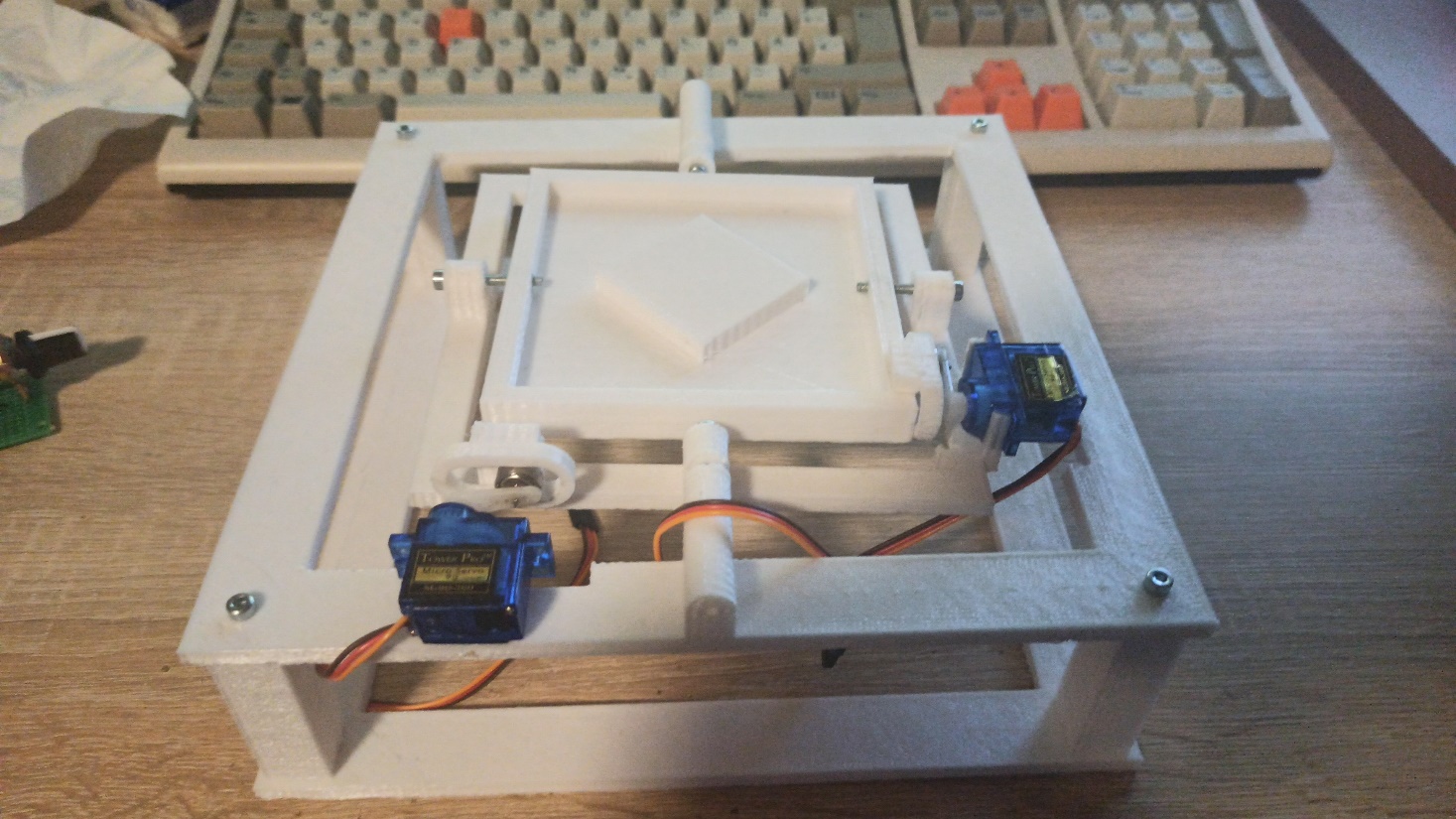
Ebenfalls wurde die Geräuschentwicklung bei Verwendung von Servo.writeMicroseconds() untersucht. Hierbei wird der Servo mit deutlich kleineren Schritten angesteuert. Ziel ist es die Betriebsgeräusche zu reduzieren. Zur Erfassung wurde sowohl eine Lautstärke-app als auch ein Spektrometer verwendet. Trotz hörbar geringeren Bewegungsgeräuschen konnte in der App kaum eine Reduzierung der DB zahl vernommen werden. Dier Untersuchung mit einem Spektrometer hat allerdings eine akustische Veränderung erfasst:



(Bild 12: Erfassung der Geräusche)

Für diesen Versuch wurde in beiden Fällen dieselbe Strecke mit derselben Geschwindigkeit zurückgelegt. Die Frequenz der Fahrtgeräusche hat sich geändert, es wäre also denkbar, dass die App keine Reduzierung der Intensität angezeigt hat, da die Geräusche nur subjektiv angenehmer sind, nicht aber leiser.

Für die Ansteuerung wurde ein Prototyp 3d Gedruckt. Dieser hat dazu gedient unser Konzept als Funktional zu bestätigen und uns ein Gefühl für Spielbarkeit und Entwurfseigenschaften gegeben:



(Bild 13: Prototyp)

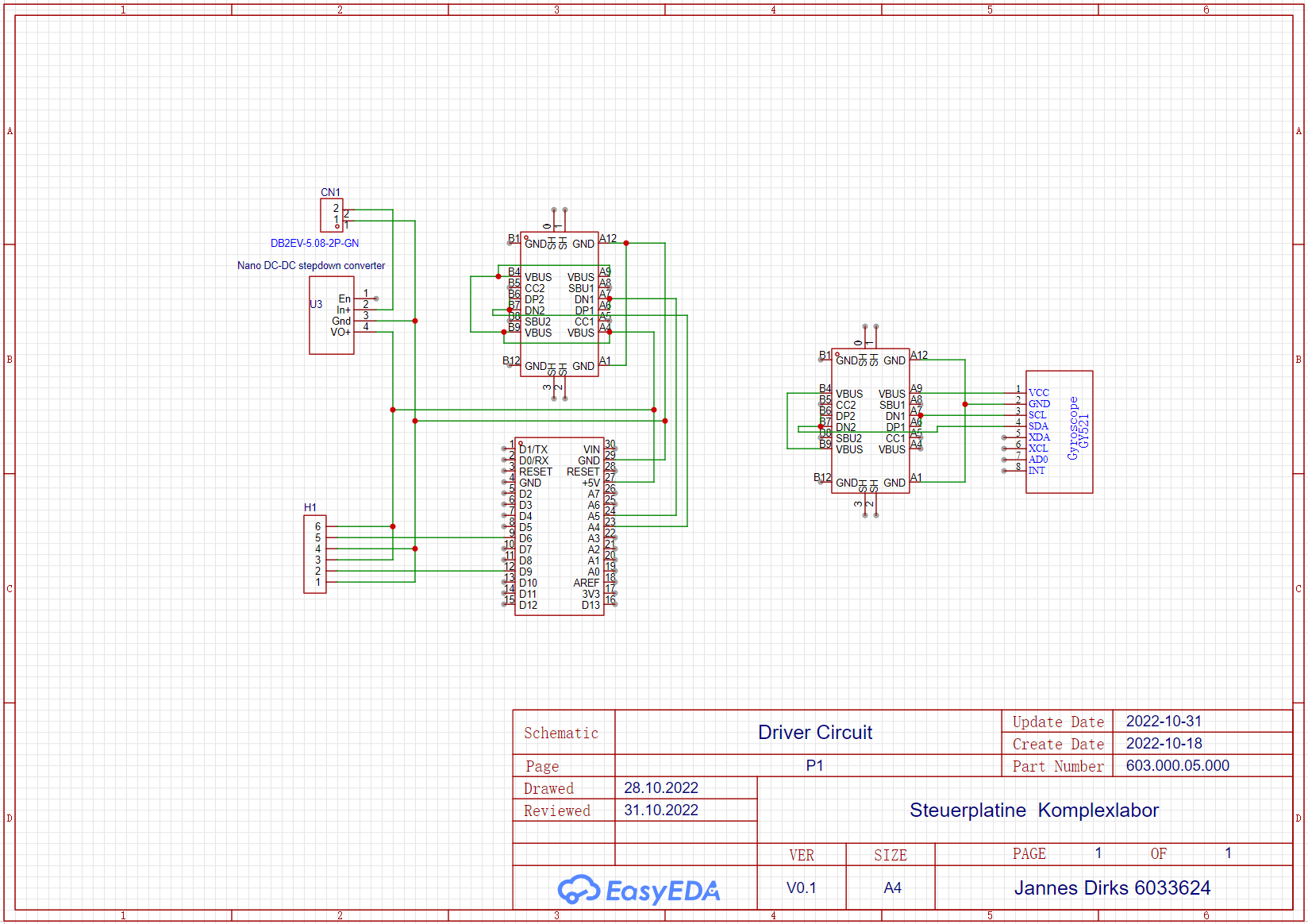
### Sensorik

Unser erster Versuch daten aus dem gewählten MPU 6050 hat sich direkt als erfolgreich erwiesen:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

(Bild 14: Test des MPU6050)

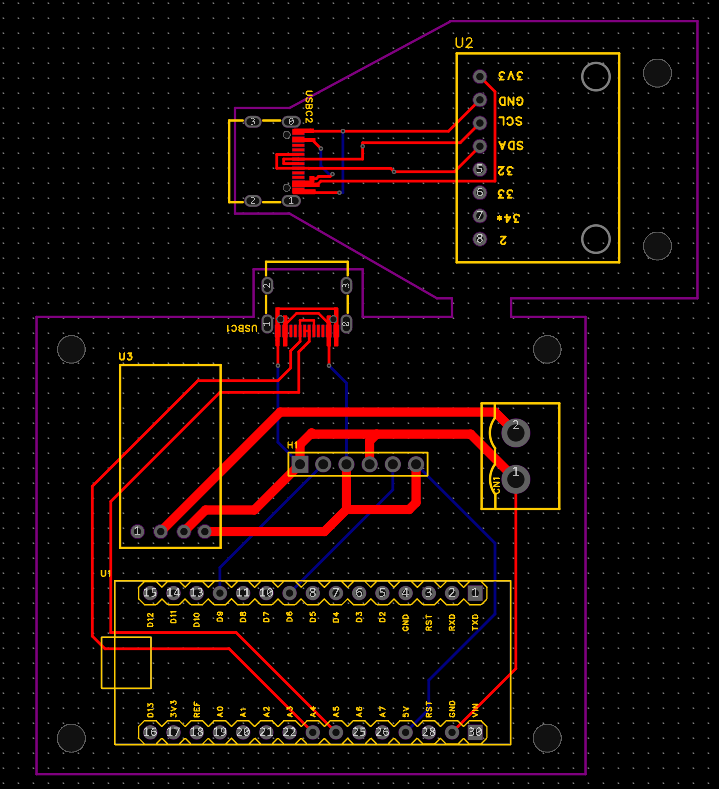
## Konzeption der Hardware



(Bild 15: Steuerplatine)

Durch unsere Variantenwahl ist die Elektronik zum Antreiben der Servos denkbar einfach. Auf der Platine Dient ein Buck Converter Dazu die 12V Spannung des Netzteils auf 5V für die Servos und den Arduino zu reduzieren. Durch die Wahl eines Arduino Nanos statt eines Arduino Unos, wie in der Aufgabenstellung vorgeschlagen, konnte die Größe der Platine ohne Einbußen der Funktionalität reduziert werden. In unserem Projekt werden Vier Arten Stecker verwendet: das Kabel zur Fernbedienung ist ein USB-C Kabel dessen Buchse durch die SMD-Bestellung fertig aufgelötet geliefert wurde, des Weiteren wird ein 5,08mm DB2EV Stecker für den Anschluss an die im Gehäuse verbauten Bananen-Plug-Buchsen verwendet. Dieser zeichnet sich durch hohe übertragbare Ströme aus, da ebenfalls die Servos mit 2.54mm Steckern auf der Platine befestigt werden lässt sich der gesamte Aufbau nur durch Lösen von Steckern demontieren. Für die Spannungsversorgung wird ein IAGCK Nano Buck-Converter verwendet, dieser kann laut Datenblatt bis zu 2.5 Ampere bei 5V bereitstellen. Wir rechnen mit einer Maximalbelastung von 1A bei 5V.

Die Platinen haben beide die Anforderung möglichst leicht, aber sicher in ihrem jeweiligen Gehäuse montiert zu werden. Bei der Accelerometer Platine in der Fernbedienung wird dies durch zwei Löcher zur Sicherung mit Stiften erreicht. Des Weiteren ist das Gehäuse so ausgelegt, dass der USB-C Port in einem vorgesehenen Slot liegt und die Lötstellen somit vor Krafteinwirkungen geschützt sind. Die Hauptplatine verfügt genau wie das Gehäuse über 4 Löcher zur Befestigung. Als Abstandshalter zwischen Unterseite der Platine und Gehäuse dienen generische Platinen Abstandsstücke.

Ein Bild, das Text, Elektronik, Schaltkreis enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

(Bild 16: Steuerplatine Modell)

## Problemlösung der fehlerhaften Hardware

Während der Erprobung hat sich herausgestellt, dass die direkt unter dem Buck-Converter geführten Kommunikationsleitungen zum Accellerometer bei Stromspitzen (bspw. raschen Bewegungen) induktiv Störungen empfangen. Dies führte zu einem Ausstieg des Sensors und damit dem Erliegen des Betriebs.

Abhilfe hat ein Abtrennen der Kommunikationsadern und ein anschließendes externes Verlegen dieser Leitungen geschaffen. Dieses Problem hat sich aufgrund der Abwesenheit von offensichtlichen Beschädigungen als recht schwer zu diagnostizieren herausgestellt. Nach wiederholtem Durchmessen der Platine und Abwesenheit jedweder Verdrahtungsfehler konnte das Problem durch das Ausschlussverfahren erfasst werden.

## Konzeption der Software

### Anforderungen

Um für ein Brauchbares Spielerlebnis zu sorgen und um die Messwerte des MPU-6050 korrekt in ein eindeutig definiertes und möglichst präzises Abbild.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Eigenschaft | Wert | Einheit |
| Hohe Responsivität, also eine optimierte Programmzykluszeit | 25 | Hz |
| Eventuell nicht linearer Verlauf der Winkelansteuerung |  |  |
| Eine Filterfunktion, um das Zittern des Benutzers zu entfernen |  |  |
| Ansteuerung des Motors unter Betrachtung der Geräuschentwicklung |  |  |
| Kombination der Akzelerometer und Gyroskopwerte |  |  |
| Übersichtlichkeit (Funktionen, Konstantenregister, Kommentare) |  |  |
| Anschläge bei +/- 10 Grad Neigung |  |  |

(Tabelle 12: Anforderungen der Software)

Die genaue Bestimmung einiger Eigenschaften wie Responsivität oder einer nichtlinearen Drehwinkelübertragung lassen sich nur im Versuch bestimmen. Dabei hat wurde festgestellt, dass eine Lineare Übertragung des angepeilten Winkels auf die nicht linear verlaufende Geometrie aufgrund der hohen Responsivität im Vergleich zu unserem Kinematischen Model für das Spielgefühl besser ist.

### Programmfunktionen

**Accx\_filtered()**

Die Funktion Accx\_filtered nimmt genau wie Accy\_filtered den neusten Sensorwert an und addiert ihn auf den Infinite response Filter. Der resultierende Wert wird dann über Return zurückgegeben

**Gyroswitch**

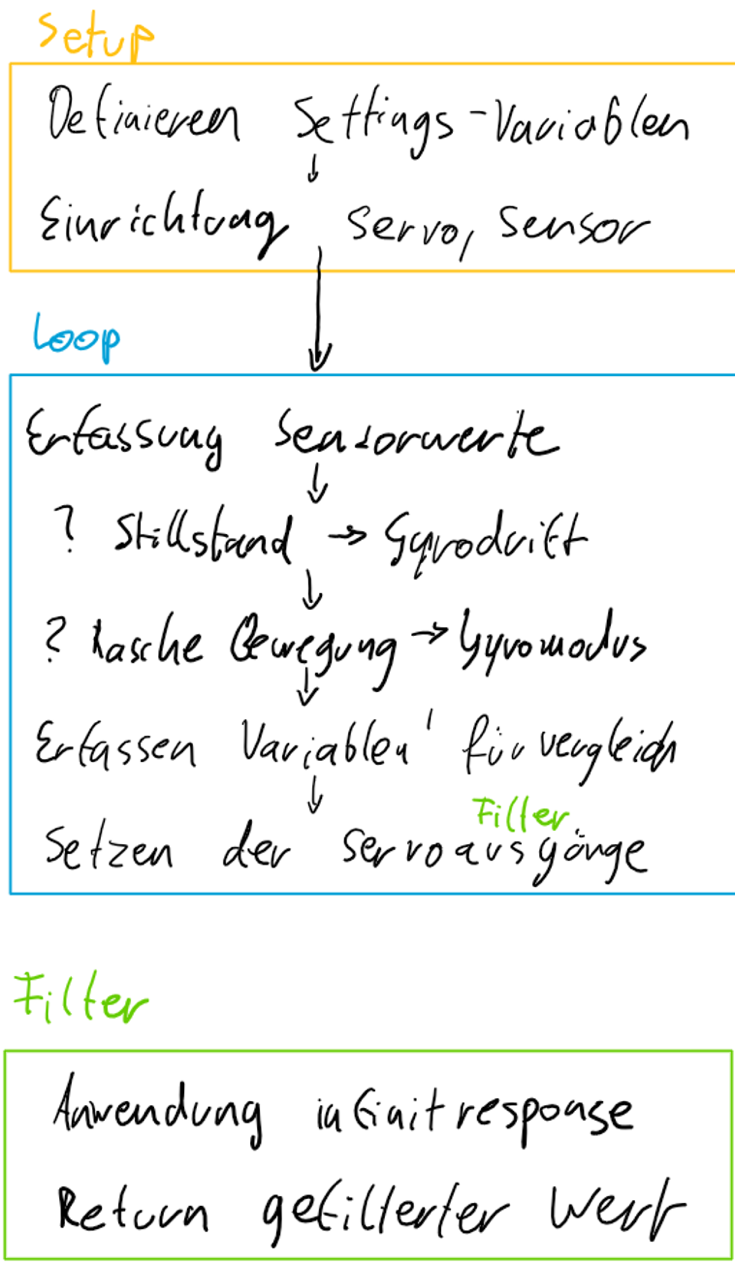
Die Gyroswitchflag nimmt eine wichtige Rolle ein. Wenn das Accellerometer hohe Beschleunigungen wahrnimmt ist es möglich das Drehungen der Fernbedienung nicht korrekt erkannt werden. Das Gyroskop ist in diesem Falle der genauere Sensor, leidet allerdings unter Drift. Auch wenn in der Loop Funktion eine Driftkompensation programmiert ist wird der Gyrosensor auf diese Art nur kurz verwendet. Deshalb ist der Drift kein merkbarer Einfluss. Die erhöhte Dynamik des Sensors kann also ohne Nachteil genutzt werden.

**Setservos()**

Setservos() nimmt die gemessenen Beschleunigungen der beiden Achsen und bestimmt daraus die Notwendigen Ansteuersignale für die Servos. Hierzu wird eine Map() Funktion verwendet. Da diese Probleme mit der Präzision bei Kommazahlen hat, werden die eingehenden Variablen alle um den Faktor 100 erhöht. Dadurch verschieben sich die Nachkommastellen und ein störendes Runden wird ausgeschlossen. Bei dem hier bestimmten Positionswert handelt es sich um die Pulsweite in Microsekunden. Sie reicht von 1000 bis 2000 und stellt beim Servo -90° bis 90° ein. Da der Aufbau Konstruktionsbedingt nicht in die Anschläge fahren darf mapt die Funktion die Ausgangswerte von +- 9.81 m/s2 auf 1100 bis 1900 ms um. Hätten wir uns statt einer linearen Ansteuerung für ein Mathematisches Modell entschieden, würde die Übersetzung ebenfalls hier stattfinden.

### Programmstruktur

Die Programmstruktur wird anhand eines Flussdiagrammes dargestellt und ist im Anhang in kommentierter Form beigefügt.



(Bild 15: Programmstruktur)

## Testphase

Die Testphase lässt sich in drei Teile aufteilen. Zuerst wurde mithilfe unseres Prototyps festgestellt, ob die von uns erdachte Konstruktion in Bezug auf Geschwindigkeit und Präzision spielbar ist. Nachdem kleinere konstruktive schwächen behoben wurde hat sich unser Konzept als ohne weiteres anwendbar bewiesen.

Der Zweite Teil unserer Testphase hat nach der Fertigung begonnen. Hierbei ging es unter anderem um das Vollenden der Steuerelektronik, der Geräuschanpassung der Motoren und generelle ausmerzen von Kinderkrankheiten wie quietschenden Lagern. Das Ergebnis dieser Phase war die Vervollständigung der Konstruktion und Elektronik.

In der Letzten Phase wurden überprüft welches Kinematische Modell am besten für das Spiel geeignet ist und welche Werte für Die Filter einzusetzen sind. Dazu wurde einem Gruppenteilnehmer nicht gesagt welches Programm, linear oder transformiert, aufgespielt ist und dann gefragt welches Spielerlebnis angenehmer war. Die Filtervariablen wurden so hoch wie möglich angesetzt um Geräusche in der Ruhelage zu minimieren, dabei aber nicht die Dynamik des Spiels merklich zu reduzieren.

# Resümee

Die Aufgabenstellung, ein Kugellabyrinth-Spiel zu entwerfen und zu fertigen, wurde entsprechend der Vorgaben umgesetzt. Es ist ein teil-stationäres Gerät entstanden, welches viele der in der Mechatronik üblichen Disziplinen umfasst und so zu einem Gesamtsystem vereint. Hier sind insbesondere die mechanische Konstruktion, die Softwareentwicklung sowie die elektrische Auslegung der Komponenten zu nennen.

Während der Projektzeit wurde deutlich, dass nicht jede zu Beginn favorisierte Lösung im Zeitplan umsetzbar ist, sodass zunächst Abstriche in der Konzeptionierung gemacht werden mussten. Dies eröffnete jedoch die Möglichkeit, die verbleibenden Funktionen umso besser auszuarbeiten und höherwertigere Ergebnisse zu erzielen.

Das Kugellabyrinth-Spiel ist einfach zu bedienen, wie mehrere Test-Spieler\*innen bestätigten. Die beim Design des Spielfeldes festgelegte Schwierigkeit wurde von den Spieler\*innen tendenziell als zu hoch bewertet, dies scheint dem Spaß jedoch nicht großartig zu schaden – nach dem Scheitern eines Spielversuches wurde stets ein weiterer Versuch unternommen. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass bei nur wenigen zur Verfügung stehenden Versuchen ein Erfolg erzielt wird.

Die während der Testphase aufgetretenen Probleme zeigen, dass bei der Ausarbeitung der Teillösungen nicht alle möglichen Fehlerquellen beachtet wurden. So wurde eine EMV-Bewertung schlicht nicht unternommen, da kein Beteiligter Probleme in diesem Bereich in Betracht gezogen hat. Hier muss selbstkritisch festgehalten werden, dass dies ein Versäumnis war.

Dieser Punkt trifft auch auf das Problem der aufgrund der elektrostatischen Aufladung des Labyrinths klebenbleibenden Kugel zu. Hierbei sind jedoch auch vom Lehrpersonal die daraus resultierenden Effekte unterschätzt worden.

# Anhang

1. Zeichensatz
2. Datenblatt Motor
3. Datenblatt MPU
4. Datenblatt Hebel
5. Datenblatt
6. Programm

# Quellen

|  |  |
| --- | --- |
| **Quelle** | **Link/Ort** |
| Aufgabenstellung | Bereitgestellt in Moodle |
| Datenblätter zu vorgegebenen Bauteilen | Bereitgestellt in Moodle |
| Tabellenbuch Metall | ISBN 978-3-8085-1725-3 |