Prototyping

Wheel Balancer

Dokumentation

Ein Bild, das Text, Schrift, Logo, Design enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Autoren: Emrah Tekin [emrah.tekin@stud.fhgr.ch](mailto:emrah.tekin@stud.fhgr.ch)

Mathias Hoffmann [mathias.hoffmann@stud.fhgr.ch](mailto:mathias.hoffmann@stud.fhgr.ch)

Patrick Lutz [patrick.lutz@stud.fhgr.ch](mailto:patrick.lutz@stud.fhgr.ch)

Referent: Andreas Bitzer, Manuel Schlegel FHGR, Institut Photonics und MR

GitHub: [EmrahTek/Prototyping\_Projekt\_HS25: This repository has been created for project tracking. All documentation and software data related to the project can be tracked here.](https://github.com/EmrahTek/Prototyping_Projekt_HS25)

OneDrive: [Projekt\_Prototyping\_HS25](https://1drv.ms/f/c/22ce4f5b18f5d7de/Es4z7KbC6IFDkd3V-5DYnFsBehKIkcVtXod3Z91sYJWAAw?e=Fs4RBV)

Dokumentversionen

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Version | Überarbeitung | Autor/in | Datum |
| V00.01 | Draft | Emrah Tekin | 12.09.2025 |
| V00.02 | Strukturierung | Patrick Lutz | 15.10.2025 |
| V00.03 | Zweite Iteration | Emrah Tekin | 20.1.2025 |
| V00.04 | Dritte Iteration | Emrah Tekin | 09.12.2025 |
| V00.05 | Komplette Überarbeitung | Patrick Lutz | 05.01.2026 |
| V00.06 | Nachbearbeitung | Matthias Hoffmann | 10.01.2026 |
| V01.00 | Finale Vesion | Patrick Lutz | 12.01.2026 |

Inhalt

[1 Ausgangslage 1](#_Toc219040255)

[2 Zielsetzung 1](#_Toc219040256)

[3 Abkürzungsverzeichnis 1](#_Toc219040257)

[4 Analyse 2](#_Toc219040258)

[4.1 Lösungsansatz 1 Reaktion Wheel 2](#_Toc219040259)

[4.2 Lösungsansatz 2 4](#_Toc219040260)

[5 Umsetzungsplanung 8](#_Toc219040261)

[5.1 Entscheidung 8](#_Toc219040262)

[5.2 Herstellungsprozess (Übersichtliche Beschreibung und CAD-Bilder/Entwürfe) 8](#_Toc219040263)

[5.3 Herstellungsverfahren 11](#_Toc219040264)

[5.4 Anpassungsspielraum 12](#_Toc219040265)

[5.5 Zeitaufwand 13](#_Toc219040266)

[6 Umsetzung 14](#_Toc219040267)

[6.1 Herstellungsprozess Bewertung 14](#_Toc219040268)

[6.2 Herstellungsprozess Anpassungen 15](#_Toc219040269)

[6.3 Funktionalität 16](#_Toc219040270)

[6.4 Stabilität und Steifigkeit 17](#_Toc219040271)

[6.5 Bedienbarkeit 17](#_Toc219040272)

[6.6 Fehlerbehebung (Optional) 18](#_Toc219040273)

[7 Inbetriebnahme 18](#_Toc219040274)

[7.1 Inbetriebnahme Prototyp 19](#_Toc219040275)

[7.2 Elektronik 19](#_Toc219040276)

[7.3 Software 19](#_Toc219040277)

[7.4 Parameter Anpassung -> Optimierung 20](#_Toc219040278)

[7.5 Kräfte und Geschwindigkeiten 21](#_Toc219040279)

[8 Reflexion 22](#_Toc219040280)

[8.1 Funktionsbewertung 23](#_Toc219040281)

[8.2 Verbesserungspotenzial am Prototyp 23](#_Toc219040282)

[8.3 Optimierung des Entwicklungsprozesses 24](#_Toc219040283)

[8.4 Video 24](#_Toc219040284)

[8.5 Pro- Contra-Analyse 24](#_Toc219040285)

[8.6 Fazit 25](#_Toc219040286)

[9 Quellenverzeichnis 25](#_Toc219040287)

[10 Abbildungsverzeichnis 26](#_Toc219040288)

# Ausgangslage

Ein Bild, das Im Haus, Boden, Haushaltsmittel, Holz enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Für das Prototyping Projekt soll ein System entwickelt werden, dass auf einem vorgegebenen Seil balanciert. Der Schwerpunkt des Systems hierbei, muss sich oberhalb des Seils befinden und darf keine Verbindungen zu Umgebung haben. Zudem soll es so realisiert sein, dass es theoretisch auch im Vakuum funktionieren könnte, sodass externe Einflüsse, wie Luftwiderstand oder andere beeinflussende Elemente aus der Umgebung, das Resultat verändern.

Abbildung : Challangeaufbau

Zur Umsetzung wurde jedem Team Komponenten zur Verfügung gestellt, welche optional verwendet werden können. Zum einen steht ein Servomotor mit einem ESC zur Verfügung. Eine weitere Elektronikkomponente, welche genutzt werden darf, ist ein Arduino und natürlich weitere kleine Elektronikbauteile, wie Kabel, Akkus, etc. Die Nutzung dieser Bauteile ist nicht zwingend, können aber zum Erreichen des Ziels sich als nützlich erweisen.

Die Aufgabe besteht darin, die Ausgangsituation genau zu analysieren und sich step-by-step sicher heranzutasten, um ein funktionstüchtiges System zu realisieren.

# Zielsetzung

Das Projekt verfolgt zwei Hauptaufgaben, welche bewältigt werden müssen. Das erste Ziel ist die Entwicklung eines Prototyps, der auf einem Seil möglich lange und selbstständig balancieren kann. Dabei gilt es einige Rahmenbedingungen zu beachten, welche in der Ausgangslage beschrieben wurden. Der zweite Punkt, ist die Erstellung einer Dokumentation, des Prototyps, um den ganzen Entwicklungsprozess und die Gedanken festzuhalten.

# Abkürzungsverzeichnis

|  |  |
| --- | --- |
| ESP32 | Mikrocontroller-Board auf Basis des ESP32 |
| MPU6050 | Sensor mit 3-Achs-Gyroskop und 3-Achs-Beschleunigungssensor |
| OOP | Objektorientierte Programmierung |
| TPU | Thermoplastic Polyurethane Filament (flexibles 3D-Druck-Filament) |
| ESC | Electronic Speed Controller (hier: THW-1060) |
| PLA-CF | Carbon-verstärktes PLA-Filament |

# Analyse

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst einmal ein Stift in die Hand genommen und frei nach Idee und Lösungen gesucht. Dies ermöglichte uns zuerst einen groben Überblick und ein besseres Verständnis der Ausgangslage. Durch das erste Visualisieren konnten erste Ideen für mögliche Lösungen gesammelt und analysiert werden.

Im nächsten Schritt erfolgten die Analyse und Informationssuche, um relevante technische und physikalische Aspekte zu erfassen. Dabei wurde geprüft, wie die zur Verfügung stehenden Komponenten, der Servomotor und der Arduino, sinnvoll eingesetzt werden könnten. Dabei spielt vor allem der gyroskopische Effekt, der durch den Servo-Motor ausgelöst werden kann, eine grosse Rolle. Dieser Effekt kann sehr hilfreich zum Lösen der Aufgabe sein.

Ein Bild, das Text, Wand, Im Haus, Wäscheklammer enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Ein Bild, das Text, Handschrift, Zeichnung, Entwurf enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Anhand dieser Erkenntnisse wurden verschiedene Konzeptideen entwickelt, welche anschliessen analysiert und deren Machbarkeit bewertet wurden. Ziel war es nicht ein Konzept zu wählen, welches nie umsetzbar wäre, sondern eine Variante auszusuchen, die eine ausgeglichene Balance zwischen Machbar und Herausforderung hat.

Abbildung : Erste Modell Versuche

Abbildung : Erste Skizzen

Durch die Analyse, sind daraus 2 Hauptideen entstanden, welche Parallel weiterverfolgt wurden. Lösungsansatz 1: Aktives Balancieren mit Reaktionsrad und Rückkopplung Regelung.

Lösungsansatz 2: Passives Stabilisieren über ein in eine Richtung schnell rotierendes Schwungrad, das sein Trägheitsmoment ausnutzt.

## Lösungsansatz 1 Reaktion Wheel

Ein Bild, das Text, Zeichnung, Entwurf, Handschrift enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.**Grundprinzip**

Abbildung : Grundidee Skizze

Ein Reaktionsrad ist ein rotierendes Rad, das zur aktiven Stabilisierung eines Systems genutzt wird. Durch die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit des Rades wird ein Drehmoment auf den Roboter übertragen, sodass das System zurückgekippt wird. Dieses System beruht auf dem Prinzip des Erhaltungssatzes des Drehimpulses, wodurch es auf dem Seil balancieren kann.

**Aufbau und Funktionsweise**

Im ersten Ansatz sollte der Roboter mithilfe eines Reaktionsrades aktiv stabilisiert werden. Ein MPU6050-Sensor misst kontinuierlich den Neigungswinkel sowie die Winkelgeschwindigkeit des Systems. Diese Messgrössen werden an einen ESP32-Mikrocontroller übertragen, der daraus eine Stellgrösse berechnet. Über den ESC wird der Servomotor vorwärts oder rückwärts angesteuert, sodass das Reaktionsrad die Kippbewegung des Systems laufend regelt.

Erste Tests mit Oszilloskop-Messungen und einfachen Regelalgorithmen zeigten, dass dieser Ansatz grundsätzlich möglich ist. Allerdings erfordert er eine aufwendige Regelungstechnik sowie eine sorgfältige Parametrierung der Steuerung.

**Analyse und Bewertung**

Der Einsatz eines Reaktionsrades hat den Vorteil, dass das System aktiv und dynamisch stabilisiert werden kann, was theoretisch sehr lange Balancezeiten ermöglichen würde. Doch der geschätzte Umsetzungsaufwand ist zu hoch. Um diese Aufgabe zu lösen, muss die Regelung sehr präzise sein und auch schon kleine Fehler oder Abweichungen in Sensorik oder Software, können schnell zu Instabilität führen.

Ein Bild, das Elektronik, Kabel, Elektrische Leitungen, Maschine enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Diese Erkenntnis liess uns zur Überlegung, ob diese Aufgabe nicht zufriedenstellend umsetzbar wäre. Aus diesem Grund haben wir uns von diesem Lösungsansatz distanziert und haben uns weiter auf den zweiten Lösungsansatz konzertiert.

Abbildung : Lösungsansatz 1 Versuchsaufbau

## Lösungsansatz 2

Ein Bild, das Elektronik, Im Haus, Kabel, Elektrische Leitungen enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.**Grundprinzip**

Abbildung : Lösungsansatz 2 Versuchsaufbau

Der zweite Lösungsansatz basiert auf dem physikalischen Prinzip eines Kreisels, der funktional mit einem Schwungrad vergleichbar ist. Ein rotierendes Schwungrad besitzt aufgrund seines hohen Massenträgheitsmoments eine ausgeprägte Neigung, seine räumliche Lage beizubehalten.

Gerät das System in eine Kipplage, wirkt die Trägheit der rotierenden Masse einer schnellen Lageänderung entgegen. Dadurch wird die Kippbewegung zeitlich verzögert und eine stabilisierende Wirkung erzielt. Dieses Verhalten ermöglicht eine passive Stabilisierung des Systems, da weder eine aktive Regelung noch externe Energie- oder Steuereinflüsse erforderlich sind. Somit erfüllt dieser Ansatz die vorgegebenen Randbedingungen.

**Analyse und Bewertung des Ansatzes**

Der Aufbau des Schwungrades, stellt grundsätzlich keine grossen mechanische Schwierigkeiten dar, da es keinen komplexen Aufbau der Sensorik (die nicht einmal benötigt wird) und Elektronik benötigt. Zudem fällt auch das präzise Zusammenspiel mit der Software weg, da diese unabhängig arbeiten kann. Die einzige Schwierigkeit liegt hierbei, bei der Gewicht- und Form-Auslegung des ganzen Systems und deren korrektes Trägheitsmoment zu bestimmen, um das System die Möglichkeit zu geben sich selbst auszubalancieren. Gleichzeitig ist die Stabilisierung stark von der korrekten Auslegung des Trägheitsmoments und der mechanischen Freiheitsgrade abhängig. Kleine konzeptionelle Fehler können dazu führen, dass die stabilisierende Wirkung vollständig verloren geht.

**Iteration 1**

Auf Grundlage der gesammelten Informationen und der Grundidee eines Kreisels wurde eine erste Iteration des Konzepts umgesetzt. Ziel war ein möglichst einfacher Aufbau mit einem Schwungrad. Wie im Bild zu sehen, steht das System in der ersten Iteration auf 2 Beinen und nicht auf einem Punkt. Hierbei war der Gedanke, dass somit die Stabilisation des Systems unterstützt wird, sodass das System nur die Balance in eine Richtung korrigieren muss.

Zusätzlich waren in der ursprünglichen Konzeptidee kleine Füsschen unterhalb des Modells vorgesehen, um den Schwerpunkt leicht nach unten zu verlagern und die Standfestigkeit zu erhöhen. Zudem bestand die Möglichkeit, Gewichte auf die Füsschen zu legen oder daran zu hängen, um den Schwerpunkt weiter nach unten zu drücken.

Der erste Prototyp wurde anschliessend konstruiert, 3D-gedruckt und aufgebaut. Zur Erhöhung des Trägheitsmoments des Schwungrades wurden mehrere M8-Schrauben symmetrisch im Rad verteilt eingesetzt (siehe Abbildung).

Ein Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Plan enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Ein Bild, das Screenshot, Cartoon enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Abbildung : Aufbau erster Iteration seitlich

Abbildung : Aufbau erster Iteration oben

**Bewertung der Iteration 1**

Die ersten Tests mit dem Aufgebauten System zeigte sehr schnell, dass sich das System nicht stabilisieren liess und kontinuierlich auf eine Seite umkippte. Eine weiterführende Analyse des Konzepts, gemeinsam mit den Coaches, zeigte einen grundlegenden Fehler im Aufbau.

Dadurch dass sich das Konstrukt auf zwei Beinen auf dem Seil steht, hilft es dabei nicht bei der Stabilisation, sondern es wurde hierbei ein entscheidender Freiheitsgrad genommen. Ein kreiselbasiertes System muss sich um einen Punkt frei bewegen können, um Kippbewegungen durch kontinuierlichen Trägheitsmomentausgleich auszugleichen. Der Aufbau mit zwei Balancierpunkten verhinderten diese freie Bewegung, sodass das Schwungrad seine stabilisierende Wirkung nicht entfalten konnte.

Diese Erkenntnis führte zur Entscheidung, das Konzept zu überarbeiten und eine weitere Iteration zu entwickeln, bei der die notwendigen Freiheitsgrade erhalten bleiben.

**Iteration 2**

In der zweiten Iteration wurde das Konzept nur Wort wörtlich auf den Kopf gestellt, um das in der ersten Iteration identifizierte Problem zu lösen. Das gesamte System wurde nun so überarbeitet, dass es auf einem einzelnen Punkt balanciert.

Wenn der Ansatz eines Kreisels grundlegender betrachtet wird, findet man immer nur Anwendungen mit einem Punkt als Auflage- /Drehfläche. Auch für unsere Anwendung benötigt das Schwungradsystem diese eine Punktauflage, denn nur so können alle notwendigen Freiheitsgrade erhalten bleiben. Das System muss sich in alle Richtungen bewegen können, um Kippbewegungen durch den Drehimpuls des Schwungrades kontinuierlich auszugleichen. Mit zwei Abstützungen würde diese Bewegung einschränken und die stabilisierende Wirkung des Schwungrades verhindern.Ein Bild, das Zeichnung enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Zur Umsetzung wurde das komplette System umgedreht. Auf dem ehemaligen Deckel, der nun als Boden fungiert, wurde ein kegelförmiges Bauteil mit einer Kerbe montiert. Auf diesem Punkt balanciert das gesamte System auf dem Seil. Durch diese Lösung konnte das Balancieren auf einem definierten Punkt sehr spontan und effektiv umgesetzt werden.

Abbildung : Aufbau zweiter Iteration

Das Umdrehen des Systems brachte viele unerwartete wesentliche Vorteil. Zum einen musste das gesamte Konzept nicht neu entwickelt werden, wodurch Zeit gespart wurde. Zum anderen konnte das Schwungrad und somit der Schwerpunkt des Systems näher an das Seil gebracht werden, was sich positiv auf die Stabilität auswirkt.

**Bewertung der zweiten Iteration**

Mit der zweiten Iteration konnte das initiale Problem der fehlenden Freiheitsgrade erfolgreich behoben werden. Das System ist nun in der Lage, sich frei auszurichten und die stabilisierende Wirkung des Schwungrades zu nutzen. Die Balanceeigenschaften verbesserten sich deutlich im Vergleich zur ersten Iteration.

Es kann keinen Vergleich zur Balanceeigenschaften zu vorherigen Anwendungen und Iterationen gemacht werden. Aber für die ersten Schritte auf dem Seil, liegt die geschätzte Balancierzeit oberhalb des erwarteten Wertes. Ein weiterer Beobachtungspunkt ist die Geschwindigkeit der Drehscheibe, welche für den Servo-Motor deutlich unterhalb des vorgegeben Leistungswertes liegt. Falls die Geschwindigkeit der Schwungscheibe noch erhöht werden könnte, sollte das System noch stabiler und länger auf dem Seil balancieren können. Dennoch stellte diese Iteration einen entscheidenden Fortschritt dar und bestätigte die grundsätzliche Eignung des Schwungrad-Ansatzes für die Aufgabenstellung.

# Umsetzungsplanung

Hier wird die ganze geplante Umsetzung des ersten Prototyps erklärt. Dabei wird beschrieben, welche Entscheidungen getroffen wurden, welche Herstellungsverfahren eingesetzt wurden und wo Anpassungsspielräume vorgesehen sind. Zudem wird darauf geachtet, dass dieser Abschnitt nicht allzu redundant gehalten wird, da viele Informationen schon in der Analyse erläutert wurde.

## Entscheidung

Dank einer ausführlichen Analyse-Phase konnten wir einige wichtige Erkenntnisse gewinnen, deshalb konnten wir uns einstimmig und gutem gewissen dafür entscheiden, den zweiten Lösungsansatz mit dem Schwungrad weiterzuverfolgen.

Diese Methode erwies sich als deutlich geeigneter für den Rahmen dieses Anwendungsfalls, da er ohne komplexe Regelungstechnik auskommt und auch einiges robuster erschien. Besonders die Erkenntnisse aus der ersten Iteration führten eigentlich schon zu einer Weiterentwicklung des Konzepts, bei der das System auf einem Punkt balanciert, um die notwendigen Freiheitsgrade für die kreiselbasierte Stabilisierung zu gewährleisten.

Aus diesem Grund wird in den weiteren Kapiteln ausschliesslich auf das gewählte zweite Lösungsansatz eingegangen.

## Herstellungsprozess (Übersichtliche Beschreibung und CAD-Bilder/Entwürfe)

Zunächst wurden einfache Skizzen auf Papier erstellt, um die Lage des Motors, die Seilführung und die Befestigung der Elektronik festzulegen. Anschliessend haben wir in Fusion 360 ein parametrisches 3D-Modell des Gehäuses und des Reaktionsrades aufgebaut. Wichtige Parameter wie Rad-Durchmesser, Wandstärke und Position der Schraubenmassen wurden als veränderbare Variablen angelegt. Aus diesen Modellen wurden STL-Dateien exportiert, die direkt auf dem 3D-Drucker verwendet werden konnten.

Der Herstellungsprozess startete mit Skizzen in der Analyse, welcher genauer erläutert wurde. In einem weiteren Schritt kommt die erste grobe Parametrisierung des ersten Prototyps in einem CAD-Programm. Dabei wurden die technischen Komponenten als Grundlage für die Konstruktion des ersten Prototyps verwendet. Ausser der Kammer der Schwungscheibe musste Schritt für Schritt angepasst werden, um das optimale Verhältnis zwischen Gewicht, Stabilität und Trägheitsmoment zu erhalten. Das ganze Konstruierte System kann man in 4 Bereiche unterteilen.

Ein Bild, das Spielplatz enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Der erste Bereich ist die Halterung der Elektronikkomponenten wie Arduino, ESC und Akku, welcher den oberen Teil der Konstruktion mit den ehemaligen zwei Stützbeinen darstellt. Für diesen Bereich wurde PLA verwendet, da es keine spezielle Belastung oder Einwirkung aushalten muss und PLA eine standardmässig solide Stabilität vorweist, um die Elektronikkomponenten zu halten.

Abbildung : Elektronikkomponenten-Halterung

Der zweite Bereich ist der mittlere Teil der Konstruktion, welcher die Halterung des Servomotors zu Aufgabe hat. Weiter hält diese Komponente alle anderen Komponenten zusammen, es wurde auch, wie schon beschrieben, als Grundstein der Parametrisierung des Systems genommen. Für diesen Bereich wurde auch PLA verwendet, da es die nötige Stabilität aufweist, alle Komponenten zusammen zu halten. Zudem erfüllt es die Hitzeanforderungen, da der Servomotor bei Verwendung sich erhitzen kann und die Komponente dabei nicht schmelzen darf.

Ein Bild, das Cartoon enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Abbildung : Servo- und Zwischenhalterung

Ein Bild, das Cartoon, Spielplatz, Kinderkunst enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Der Dritte Bereich ist die ganze Konstruktion der Sicherheitskammer für das Schwungrad, welche die untere Hälfte des Systems darstellt. Zudem gehört noch der Kegelpunkt dazu, auf welchem das System balancieren muss, welcher an der Unterseite in der Mitte der Fläche montiert ist. Die Hauptfunktion dieses Bereichs ist die zum einen die Bereitstellung eines Balancepunktes und zum anderen ist diese Kammer in erster Linie für die Sicherheit konstruiert worden. Denn, falls es zu einer unvorhergesehenen Ablösung oder Zerstörung des Schwungrades kommt, kann dabei schlagartig grosse kinetische Energie freigesetzt werden. Dies kann zu unkontrolliert umherfliegenden Bauteilen führen und stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Eine stabile und geschlossene Schwungradkammer ist daher essenziell, um Personen, Bauteile und die Umgebung zu schützen und ein sicheres Umfeld zu schaffen. Für diesen Bereich sind zwei verschiedene Materialien genutzt worden, da sie in diesem Bereich auch zwei verschiedene Aufgaben zu erfüllen gibt. Für die Stabilisation und der Bereitstellung des Balancierpunkts, wird PLA genutzt, da dieses Material die genügende Stabilität für diese Aufgabe aufweist. Für die zweite Aufgabe, der Sicherheitsbereitstellung der Umgebung, wird TPU genutzt. Im Gegensatz zu PLA wirkt TPU sehr weich und biegsam, wodurch es eine enorm hohe Schlagfestigkeit aufweist, mit dieser Eigenschaft eignet sich sehr gut für die Bewältigung dieser Aufgabe.

Abbildung : Schwungradkammer und Auflagekegel

Und der letzte und vierte Bereich ist das Kernstück des Systems, welches das Schwungrad beinhaltet. Auf der einen Seite wird das Schwungrad durch ein Kugellager gehalten und um die Rotation und das Drehmoment zu gewährleisten ist es auf der anderen Seite mit dem Servomotor verbunden. Das Schwungrad ist so konstruiert worden, dass es die Möglichkeit besteht, M8-Schrauben an dem Äusseren Ring des Rades zu montieren, um das Trägheitsmoment weiter zu erhöhen. Die maximale Kapazität der zu montierenden Schrauben beträgt 20. Nach einigen Tests, ist in der momentanen Anwendung 10 Schrauben eingesetzt, welches das System mit ihrer Trägheit unterstützen. Das Material des Schwungrades wurde aus PLA hergestellt. Es wird ebenfalls verwendet, da es wie in den vorherigen Bereichen, eine hohe Stabilität aufweist und speziell auch eine hohe mechanische Belastbarkeit aufzuweisen hat. Um eine noch höhere Belastbarkeit und Sicherheit zu gewährleisten, wurde beim Herstellen die Füllmenge auf 80% eingestellt.

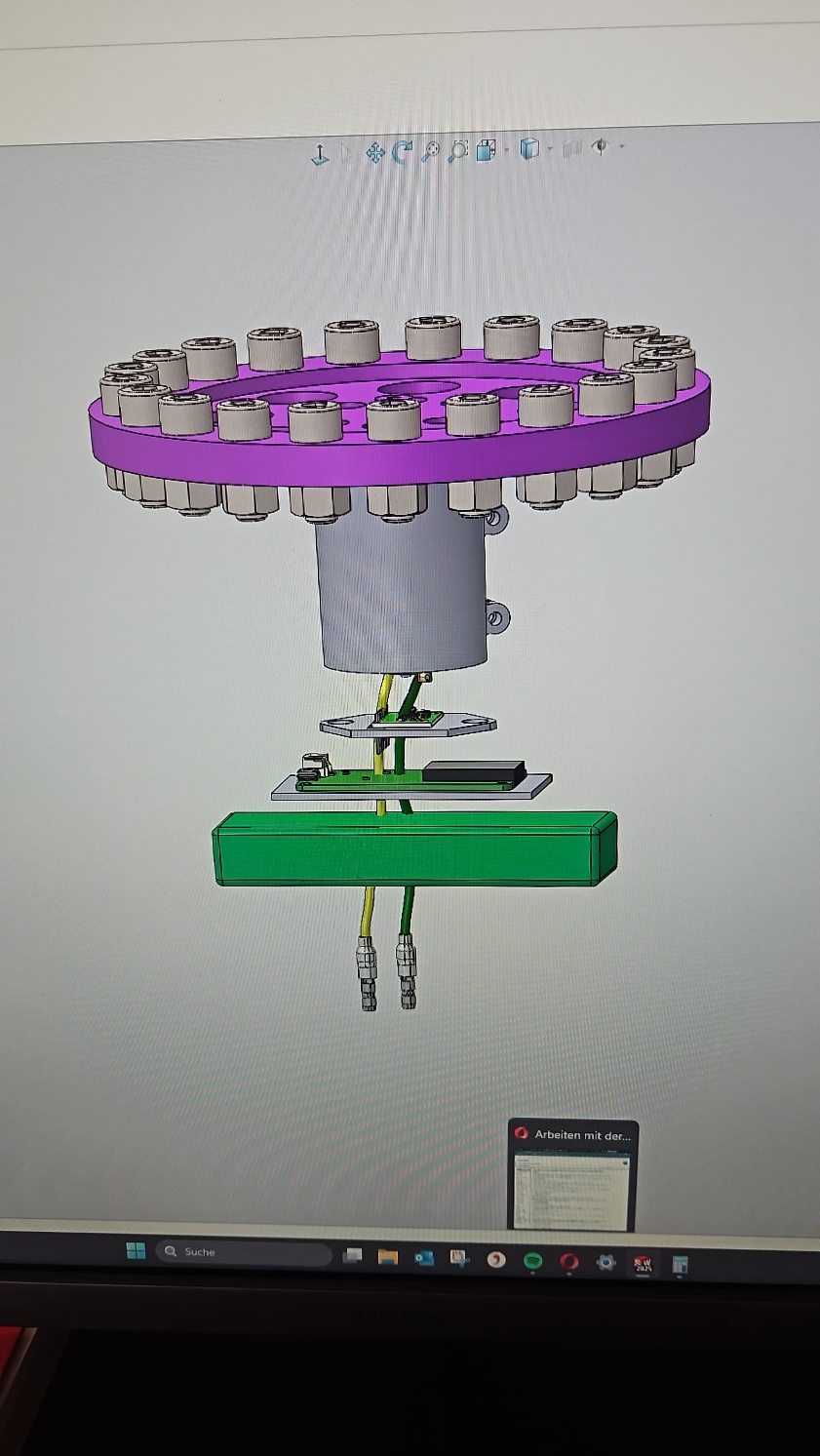


Abbildung : Schwungrad

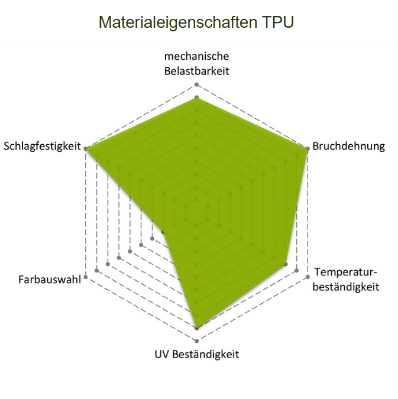
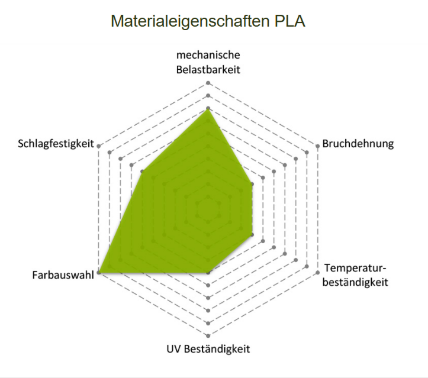
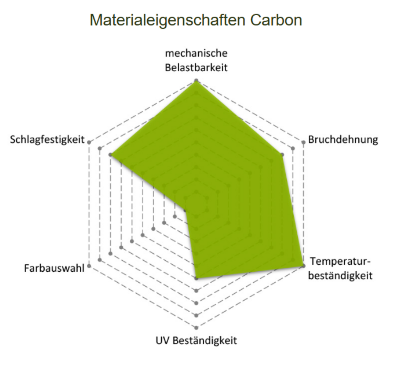
## Herstellungsverfahren

Für alle Kunststoffteile kam ein FDM-3D-Drucker der Marke Prusa zum Einsatz. Das 3D-Druckverfahren eignete sich bei dieser Aufgabe optimal, da diese Infrastruktur den Schülern für Projekte frei zur Verfügung gestellt wird. Ausserdem eignet sich der 3D-Druck auch sehr gut für ein paar weitere Eigenschaften. Zum einen handelt es sich um eine sehr flexible Herstellungsmethode, die schnelle und einfache Anpassungen ermöglicht. Zudem weist sie geringe Kosten auf und erlaubt eine hohe Detailgenauigkeit sowie grosse Designfreiheit. Zudem erlaubt dieses Verfahren die Verwendung von verschiedenen Materialien, welche auch hier in dieser Arbeit genutzt werden. Wie in den Beschreibungen der Bereiche, wurde hauptsächlich für die Stabilisation und die mechanische Belastung PLA eingesetzt, nur die Wände der Schwungradkammer sind aus TPU gedruckt worden.

Nach dem Druck werden die Bauteile alle zusammengefügt. Das geschieht durch den Einsatz von Schrauben Mutter, eingeschmolzene Inserts und Metallplättchen, um das Schwungrad mechanisch stabil zu lagern und das Trägheitsmoment gezielt zu erhöhen. Durch den Einsatz dieser Komponenten kann das System stabil und zuverlässig zusammengehalten werden, um seine Aufgabe zuverlässig zu erfüllen.

## Anpassungsspielraum

Abbildung : Materialeigenschaften



Im Rahmen des Prototypentwicklung ist es wichtig, immer einen flexiblen Aufbau zu haben, da so auf unerwartete Erkenntnisse und Testergebnisse einfach reagieren zu können. Aus diesem Grund wurde das System bewusst so konzipiert, dass ein möglichst grosser Anpassungsspielraum besteht. Durch den parametrischen Aufbau und die modulare Gestaltung einzelner Komponenten können kleine Anpassungen und Änderungen einfach umgesetzt werden, ohne das Gesamtkonzept zu verändern.

Die Struktur des Systems ist gegeben und bildet eine stabile Basis, jedoch sind alle relevanten Bauteile parametrisch ausgelegt. Dadurch können Masse, Geometrien und Massenverteilungen jederzeit angepasst werden, ohne das gesamte Konzept neu entwerfen zu müssen. Dies ermöglichte uns eine effiziente Optimierung während der Test- und Iterationsphasen.

Ein zentraler Anpassungspunkt ist das Schwungrad inklusive der Schwungradkammer. Beide Komponenten sind parametrisch modelliert und können hinsichtlich Durchmesser, Dicke und Volumen angepasst werden. Dadurch lässt sich das Trägheitsmoment gezielt verändern und durch eine einfache Designveränderung, welche unabhängig ist, kann die Fassmenge der Schrauben verändert werden. Die Schrauben können jederzeit hinzugefügt, entfernt oder in ihrer Position verändert werden. Auf diese Weise kann das Trägheitsmoment fein abgestimmt werden, ohne dass mechanische Änderungen am restlichen System notwendig sind. Das Einzige, was dabei beachtet werden muss, ist das es eine gleichmässige Verteilung des Zusatzgewichtes gibt. Ansonsten könnte die Gefahr entstehen, dass das Schwungrad ins Schwingen verfällt.

Da der Balancierkegel ein Modul ist, das erst in der zweiten Iteration hinzugefügt wurde, ist es nicht zugehörig zu einer festen Baugruppe. Aus diesem Grund kann dieses Bauteil sehr einfach ausgetauscht oder in seiner Geometrie angepasst werden. Zusätzlich können Änderungen am Öffnungswinkel, an der Kerbentiefe oder am Material schnell umgesetzt werden, um das Balanceverhalten auf dem Seil zu optimieren.

Diese offene Gestaltung halt uns sehr auf dem Weg zur Vervollständigung des Systems geholfen, da einige Änderungen gemacht werden mussten, um ans Ziel zu gelangen.

## Zeitaufwand

Der Gesamtzeitaufwand für das Modul Prototyping beträgt gemäss Modulbeschreibung rund 120 Stunden pro Person und setzt sich aus Präsenzzeit sowie begleitetem und eigenständigem Selbststudium zusammen. Der projektbezogene Arbeitsaufwand verteilte sich auf die folgenden Tätigkeitsbereiche:

**Voranalyse und Konzeptphase (ca. 10–20 h)**

* Analyse der Aufgabenstellung und Randbedingungen
* Ideengenerierung und Diskussion möglicher Lösungsansätze
* Erste Abschätzung der technischen Machbarkeit

**Konstruktive Ausarbeitung (ca. 30–40 h)**

* CAD-Modellierung der beiden Lösungsansätze
* Auslegung und Anpassung des Schwungrades
* Konstruktive Änderungen im Zuge der Iterationen

**Iteration und Tests (ca. 25–35 h)**

* Mechanische Anpassungen am Prototyp
* Montagearbeiten
* Funktionstests und Versuche auf dem Seil
* Bewertung des Balancierverhaltens

**Herstellung und Anpassungen (ca. 20–30 h)**

* Vorbereitung der Bauteile für den 3D-Druck
* Nachbearbeitung der gedruckten Teile
* Mechanische Anpassungen ausserhalb der reinen Druckzeit

**Elektronik und Parametrierung (ca. 10–15 h)**

* Aufbau und Verdrahtung der elektrischen Komponenten
* Anpassung der Motoransteuerung
* Erste elektrische Funktionstests

**Dokumentation (ca. 10 h)**

* Strukturierung der Dokumentation
* Ausarbeitung der einzelnen Kapitel
* Überarbeitung und Konsistenzprüfung

Der dargestellte Zeitaufwand liegt insgesamt im vorgesehenen Rahmen des Moduls und spiegelt den iterativen und praxisorientierten Charakter des Prototyping-Projekts wider.

# Umsetzung

Ein Bild, das Elektronik, Kabel, Im Haus, Maschine enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Die Umsetzung des Prototyps passiert auf der Basis der zuvor erfolgen Umsetzungsplanung und des CAD-Modells. Nach der Konstruktion und Herstellung der einzelnen Bauteile, wurden diese montiert und zu einem Ganzen System zusammengesetzt. Anschliessend wurden Motor, ESC und ESP32-Board montiert und auf dem Chassis verdrahtet. In den ersten Iterationen war zusätzlich der MPU6050-Sensor vorgesehen, in der finalen Version wurde jedoch auf seine Montage verzichtet. In weiteren Schritten wurde der Prototyp in mehreren Testläufen überprüft, um Funktionalität, Stabilität und Verhalten auf dem Seil zu analysieren und zu verbessern.

Abbildung : Erste finale Umsetzung

## Herstellungsprozess Bewertung

Insgesamt verlief der Herstellungsprozess weitgehend nach Plan. Die ersten Bauteile waren eine ungefähre Näherung des Endgültigen Prototypen. Natürlich mussten einige kleine Anpassungen an der Konstruktion und am dem ganzen Plan gemacht werden, doch wir wollten unseren Prototypen stetig verbessern, wodurch diese Schritte obligatorisch sind. Schlussendlich waren Die 3D-gedruckten der optimierten Version des Prototyps sehr gut aufeinander abgestimmt und passten gut zusammen, und der Motor konnte sicher im Gehäuse fixiert werden. Kleinere Probleme traten nur bei der Toleranz der Schraubenaufnahmen im Reaktionsrad auf, hier mussten Bohrungen leicht nachgearbeitet werden. Die Tests bestätigten, dass die gewählte Kombination aus PLA-CF und TPU sowohl Stabilität als auch eine gewisse Elastizität bietet.

## Herstellungsprozess Anpassungen

Während der Umsetzung wurden einige Anpassungen vorgenommen. Hierbei wurden einige Probleme behandelt, welche für die Erreichung des Anwendungsfalls essenziell waren.

**Sicherheit**

Während der Umsetzung zeigte sich, dass das Schwungrad aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeit und der eingesetzten Schraubenmassen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellt. Wenn während des betriebs des Systems sich unvorhergesehen schrauben Lockern oder das Schwungrad beschädigen würde, könnte das bei einer hohen Drehzahl schwerwiegende Folgen haben. Obwohl bereits eine elastische Sicherheitswand aus TPU vorgesehen war, wurde entschieden und empfohlen, eine zusätzliche Sicherheitsmassnahe vorzunehmen.

Ein Bild, das Transport, Kreis, Rad, Autoteile enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Dazu wurde die Geometrie des Schwungrades angepasst und am äusseren Rand eine umlaufende Kerbe konstruiert. Diese Kerbe ermöglicht das Einlegen einer Faserwicklung um das Schwungrad. Als Material wurde Basaltfaser verwendet, da sie eine hohe Stabilität und Zugfestigkeit aufweist. Die Faser wurde straff um das Schwungrad gelegt und mit einer Epoxidharz-Mischung fixiert. Sodass die zusätzliche Stabilisierung zuverlässig festigen kann, wurde ein zugeschnittener Fahrradschlauch über die Fasern gezogen, welcher nach der Aushärtung wieder entfernt wurde. Durch diese Massnahme wird das Schwungrad zusätzlich zusammengehalten. Die Faserwicklung wirkt wie ein Sicherheitsring, der die Kräfte bei hoher Drehzahl aufnimmt und verhindert, dass sich Schrauben oder Teile lösen.

Abbildung :Schwungrad verstärkt mit Basaltfaser

**Gewicht**

Während der Tests zeigte sich, dass das System funktionier und auch auf einem Seil balancieren kann. Die letzte grosse Herausforderung trat jedoch beim Einsatz auf einem sehr instabilen Seil auf, welches bei der finalen Challenge verwendet werden soll. Dabei wurde deutlich, dass das Gewicht des Prototyps zu hoch ist und das Seil sehr stark durchgedrückt wird, sodass es nicht mehr möglich ist auf dem Seil zu Balancieren.

Ein Bild, das Maschine, Bautechnik, Im Haus, Boden enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Als erste Massnahme wurde im Team diskutiert, das Gewicht des Systems zu reduzieren. Dazu wurden alle Baugruppen analysiert und mögliche Gewichtseinsparungen bewertet. Es stellte sich jedoch heraus, dass eine Gewichtsverringerung an den Bauteilen zu grosse Nachteile zufolge hätte. Insbesondere wären dabei Sicherheit, Stabilität sowie das notwendige Trägheitsmoment des Schwungrades stark beeinträchtigt worden. Auch an den elektronischen Komponenten konnte kein Gewicht eingespart werden, da diese für die Funktion des Systems zwingend erforderlich sind.

Abbildung : Versuchsaufbau mit Stützen

Deshalb wurde nach einer anderen Lösung gesucht, der die bestehenden Rahmenbedingungen nicht verletzt. Hierbei wurde ein Ansatz gesucht, welcher indirekt das System betrifft, da das System so wie es nun entwickelt wurde, nicht verändert werden kann. Es wurde eine Möglichkeit gefunden, um weitere Stabilität auf das Seil zu bringen, welches das Seil selbst betrifft. Dazu wurden links und rechts neben der Position, an der das System auf dem Seil aufliegt, Stützen angebracht. Mithilfe dieser Stützen, kann verhindert werden, dass sich das Seil an diesen Stellen biegt, wodurch das Seil verkleinert und stabiler wird. Mit diesen Stützen konnte das Problem erfolgreich behoben werden. Das Seil ist es nun ermöglicht das Gewicht des Systems zu tragen, sodass das System sich auf dem Seil balancieren kann.

## Funktionalität

Der entwickelte Prototyp erfüllt die grundlegenden funktionalen Anforderungen des Projekts. Das Schwungrad kann über den eingesetzten Servomotor zuverlässig auf hohe Drehzahlen beschleunigt werden. Durch die rotierende Masse entsteht ein stabilisierender Effekt, der es dem System ermöglicht, auf dem Seil zu balancieren.

Im Vergleich zum alternativen Lösungsansatz sowie zu früheren Iterationen konnte die Balancierdauer deutlich erhöht werden. Dies bestätigt, dass das gewählte Funktionsprinzip grundsätzlich geeignet ist, die geforderte Stabilisierung zu erreichen.

Während der Tests zeigte sich jedoch auch, dass das System empfindlich auf die Massenverteilung sowie auf die exakte Ausrichtung der Bauteile reagiert. Bereits kleine Abweichungen führten zu einer spürbaren Verschlechterung des Balancierverhaltens. Daraus ergibt sich weiterer Optimierungsbedarf, insbesondere im Bereich der mechanischen Ausführung und der Gewichtsverteilung.

## Stabilität und Steifigkeit

Während der durchgeführten Tests zeigten sich keine kritischen Verformungen der einzelnen Komponenten oder der tragenden Struktur. Der mechanische Aufbau erwies sich als ausreichend steif, um die während des Betriebs auftretenden Kräfte sicher aufzunehmen.

Bei niedrigen Drehzahlen des Schwungrades zeigte sich jedoch, dass das Gesamtsystem durch eine vorhandene Unwucht aus der Balance gebracht werden kann. Diese äusserte sich nicht in Form von strukturellen Verformungen, sondern in einer dynamischen Lageabweichung des Systems. Ursache hierfür ist die prototypische Ausführung des Schwungrades: Durch den Einsatz von 3D-gedruckten Bauteilen sowie verschraubten Zusatzmassen ergibt sich keine vollständig rotationssymmetrische Massenverteilung, wodurch insbesondere im unteren Drehzahlbereich Unwuchteffekte wirksam werden.

Bei ausreichend hoher Drehzahl des Schwungrades konnte hingegen ein stabiles Balancierverhalten beobachtet werden. In diesem Betriebsbereich überlagert der stabilisierende Effekt der rotierenden Masse die Unwuchteinflüsse, sodass das System zuverlässig balanciert.

Für zukünftige Iterationen kann eine Wuchtung des gesamten Schwungrades inklusive der montierten Schrauben in Betracht gezogen werden. Ziel ist es, die Unwuchteffekte insbesondere im niedrigen Drehzahlbereich zu reduzieren und damit den stabilen Betriebsbereich des Systems zu erweitern.

## Bedienbarkeit

Die Bedienung des Prototyps erfolgt hauptsächlich über eine Bluetooth-Verbindung zum Smartphone. Nachdem der Akku eingeschaltet ist, startet der ESP32 automatisch und der ESC wird initialisiert. Gleichzeitig aktiviert das System das integrierte Bluetooth-Modul und sendet ein Werbesignal.

Über die Smartphone-App Adafruit Bluefruit / Bluetooth Handy kann sich der Benutzer mit dem Prototyp verbinden. In der App steht ein Bedienfeld mit Schieberegler beziehungsweise Tasten zur Verfügung, mit dem sich die Motordrehzahl stufenlos einstellen lässt. Auf diese Weise kann die Geschwindigkeit des Reaktionsrades einfach und aus sicherer Entfernung gesteuert werden, ohne zusätzliche Taster oder Potentiometer am Gerät.

Die Elektronik ist weiterhin gut zugänglich, sodass bei Bedarf Sensor- oder Motoranschlüsse kontrolliert werden können. Für eine nächste Version wäre eine zusätzliche Sicherheitsfunktion, zum Beispiel ein physischer Not-Aus-Schalter, sinnvoll.

## Fehlerbehebung (Optional)

Typische Fehler während der Tests waren lose Steckverbindungen, falsch initialisierte ESC-Signale und unzureichend festgezogene Schrauben am Rad. Diese Probleme wurden durch systematische Kontrolle der Steckkontakte, eine definierte Startsequenz in der Software und den Einsatz von Schraubensicherung reduziert. Zudem zählt auch nicht optimal zusammenpassende Komponenten dazu, welche überarbeitet werden mussten. Diese konnten aber sehr schnell und flexibel angepasst werden und durch einen neuen Druck ersetzt werden. Dieser iterative Ansatz aus Testen, Anpassen und erneuter Umsetzung erwies sich als sehr effektiv und Lernintensiver Entwicklungsprozess.

# Inbetriebnahme

Nach dem Abschluss der mechanischen Entwicklung wurde der Prototyp schrittweise in Betrieb genommen. Ziel der Inbetriebnahme ist es die Funktion des Systems zu implementieren. Dazu gehört die Prüfung der Spannungsversorgung sowie die Ansteuerung des ESC mit PWM-Signalen vom ESP32. In den frühen Versuchen wurde zusätzlich die Kommunikation mit dem MPU6050-Sensor über I²C getestet, in der finalen Iteration wird der Sensor jedoch nicht mehr verwendet. Weitere gehört die Implementation der Motoransteuerung über den ESC, um dadurch gezielt die Parameter anzupassen, um eine möglichst stabile Balancierung auf dem Seil zu erreichen.

## Inbetriebnahme Prototyp

Als aller erstes wurde jede elektronische Komponente individuell getestet. Als nächstes wir die ganze Kommunikation zwischen den elektronischen Komponenten, sowie die Überprüfung der Anschlüsse und der Spannungsversorgung. Nach dem zusammenbauen des ganzen Systems wurde der Prototyp auf dem Boden ohne Seil getestet, um Motor, Sensor und ESC in einer Sicheren Umgebung zu prüfen. Das System wurde so zusammengebaut das Anfangs das Schwungrad ohne weiteres Zusatzgewicht durch Schrauben bestückt wurde. Zunächst wurden Tests mit der Drehgeschwindigkeit des Schwungrades gemacht, um ein Gefühl zu bekommen, wie sich das System verhält. In einem weiteren Test wurde das Schwungrad allmählich mit Zusatzgewicht bestückt um ein Stabileres balancierverhalten zu erreichen. Nachdem diese Tests erfolgreich durchgeführt wurden, wurde das System erstmals auf dem Seil positioniert. Hierbei erwies sich nur noch eine Problematik, welche unter Herstellungsprozess Anpassungen genauer beschrieben wurde, dass sich das System als zu schwer erwies. Abseits dieser Problematik konnte die Funktionalität des Systems auf dem Seil nachgewiesen werden.

## Elektronik

In der aktuellen Ausbaustufe besteht die Elektronik im Wesentlichen aus dem ESP32-Board, dem THW-1060-Regler (ESC), dem RS-540-Gleichstrommotor und einem 2S-LiPo-Akku. Der ESP32 übernimmt sowohl die Signalerzeugung für den ESC als auch die Bluetooth-Kommunikation mit dem Smartphone. Der ESC wird über ein PWM-Signal im Servobereich von ungefähr 1000 bis 2000 µs angesteuert, dass der Regler in eine entsprechende Motordrehzahl umsetzt.

Die Spannungsversorgung erfolgt vollständig über den LiPo-Akku; ESC und ESP32 teilen sich eine gemeinsame Masseleitung. Auf den ursprünglich vorgesehenen MPU6050-Sensor wird in dieser Iteration bewusst verzichtet. Die Stabilisierung wird ausschliesslich über das schnell rotierende Reaktionsrad und die manuelle Vorgabe der Drehzahl per Smartphone realisiert.

Aus Gründen der Flexibilität wurde keine eigene Leiterplatte entwickelt. Stattdessen sind die Komponenten mit Steckverbindern und Klemmen verschaltet, sodass Anpassungen an der Verdrahtung und der Positionierung der Elektronik während der Tests schnell möglich sind.

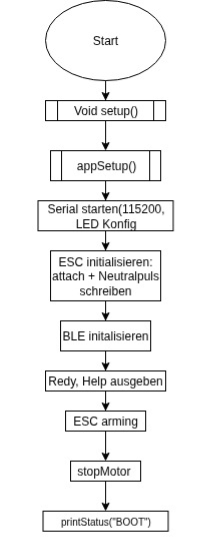
## Software

Die Software für den Prototyp wurde in der Arduino-IDE in C/C++ entwickelt und läuft auf dem FireBeetle ESP32. Im Setup-Teil initialisiert der Code die serielle Schnittstelle, das Onboard-LED-Pin sowie die Motoransteuerung. Der ESC wird an einem LEDC-fähigen GPIO (hier z.B. GPIO16) über das ESP32Servo-Modul mit einem PWM-Signal im Servobereich von 1000 bis 2000 µs betrieben und zu Beginn für etwa zwei Sekunden im Neutralpunkt „gearmt“. Anschliessend richtet das Programm die BLE-Kommunikation ein: Es wird ein UART-ähnlicher Dienst mit RX- und TX-Charakteristik erstellt, und das Board sendet unter dem Namen „FireBeetle\_ESC\_UART“ Advertising-Pakete, damit sich die Smartphone-App verbinden kann.

In der Loop-Funktion verarbeitet der ESP32 sowohl Befehle, die über die USB-Seriellschnittstelle eingegeben werden, als auch Daten, die von der Adafruit-Bluefruit-App über BLE gesendet werden. Die Kommunikation erfolgt entweder als Textbefehle (z.B. „HELP“, „ARM“, „STOP“, „FULL“, „+“, „-“ oder „1“, „2“) im UART-Modus oder als Steuerpakete aus dem „Control Pad“ (z.B. Pfeiltasten und die Tasten 1 und 2). Alle eingehenden Kommandos werden in einer gemeinsamen Funktion ausgewertet und in eine gewünschte Motordrehzahl in Prozent umgerechnet. Diese Prozentangabe wird dann in ein geeignetes PWM-Signal für den ESC umgesetzt; dabei ist nur Vorwärtsbetrieb im Bereich von etwa 1500 bis 2000 µs erlaubt.

Zur Bedienung kann die Geschwindigkeit schrittweise erhöht oder verringert werden, und bestimmte Befehle setzen den Motor sofort auf Vollgas oder Neutralpunkt. Gleichzeitig berechnet die Software aus der eingestellten Prozentzahl eine grobe, encoderlose Drehzahlschätzung und sendet einmal pro Sekunde eine Meldung der Form „RPM\_EST: xxxx“ zurück an das Smartphone. Für Debug-Zwecke werden zusätzliche Statusinformationen auch über den seriellen Monitor ausgegeben. Die aktuelle Softwareversion konzentriert sich damit bewusst auf eine zuverlässige Motorsteuerung und die Bedienung über Bluetooth; eine Sensordatenverarbeitung oder geschlossene Regelung ist in dieser Iteration noch nicht implementiert.

Abbildung : Software-Ablaufdiagramme



## Parameter Anpassung -> Optimierung

Während der Inbetriebnahme wurden verschiedene Parameter der Motorsteuerung schrittweise angepasst. Dazu gehören insbesondere die Schrittweite bei der Geschwindigkeitsänderung (STEP\_PCT), der Zusammenhang zwischen Prozentwert und PWM-Pulsbreite für den ESC sowie die Begrenzung der maximal zulässigen Drehzahl. Die Feinabstimmung erfolgte empirisch, indem wir das Verhalten auf dem Seil beobachteten und die Parameter so gewählt haben, dass das System einerseits stabilisierende Effekte zeigt, andererseits aber noch sicher und kontrollierbar bleibt.

In einer zukünftigen Iteration könnten zusätzlich Sensordaten in eine geschlossene Regelung einbezogen und entsprechende Filterparameter eingeführt werden; in der aktuellen Version steht jedoch die manuelle Vorgabe der Drehzahl über Bluetooth im Vordergrund.

## Kräfte und Geschwindigkeiten

Für den sicheren Betrieb des Schwungrads ist es erforderlich, die im Betrieb auftretenden Drehzahlen sowie die daraus resultierenden mechanischen Belastungen abzuschätzen. Da im Rahmen des Projekts keine direkte Messung der Drehzahl durchgeführt wurde, basiert die Betrachtung auf einer konservativen Worst-Case-Annahme. Als obere Grenze wurde die maximale Leerlaufdrehzahl des eingesetzten Motors von 14’500 min⁻¹ herangezogen. In der realen Anwendung ist davon auszugehen, dass die tatsächlich erreichte Drehzahl aufgrund von Lastmomenten, Reibung und der Massenträgheit des Schwungrads geringer ausfällt.

Die Zusatzmassen am Umfang des Schwungrads bestehen aus M8-Schrauben mit Muttern. Deren Masse von 26,3g wurde im Labor bestimmt und in der Berechnung als Punktmasse am jeweiligen Schraubenradius angesetzt. Ausgehend von der angenommenen Maximaldrehzahl ergeben sich Fliehkräfte in der Grössenordnung von ≈ 3,8 kN pro Schraube, die radial nach aussen auf den äusseren Ring wirken.

Die Schrauben wirken als lokal konzentrierte Punktmassen, deren Fliehkräfte nicht kontinuierlich, sondern an einzelnen Positionen in den Ring eingeleitet werden. Massgebend ist hierbei die entstehende Umfangszugbelastung (Ringzug) im äusseren Ring, die zwischen jeweils zwei benachbarten Schrauben wirkt. Massgebend ist die Zugbelastung im äusseren Ring und nicht die lokale Beanspruchung einzelner Bohrungen.

Zur Aufnahme dieser Umfangszugkräfte wurde der gedruckte PLA-Grundkörper zusätzlich mit einem umlaufenden Basaltfaser-Band verstärkt. Aufgrund der im Vergleich zum PLA deutlich höheren Steifigkeit der Basaltfaser übernimmt das Band den überwiegenden Anteil der Umfangszugkräfte, während der PLA-Körper primär als Trägerstruktur, Formgeber und zur Kraftübertragung dient. Die berechnete Ringzugspannung liegt bei einer konservativen Betrachtung im Bereich von ≈ 24 MPa und befindet sich damit in einem mechanisch vertretbaren Bereich.

Neben den statischen Belastungen sind auch dynamische Effekte zu berücksichtigen. Geringe Unwuchten, Fertigungstoleranzen oder Massenabweichungen der Schrauben können zu Schwingungen und zusätzlichen Belastungen führen. Aus diesem Grund wurde auf eine symmetrische Anordnung der Zusatzmassen geachtet. Der Schwungradbetrieb erfolgte schrittweise. Die Drehzahl wurde in mehreren Stufen erhöht, bis der stabilisierende Effekt für das Balancieren ausreichend war. Eine weitere Erhöhung bis zur theoretisch maximal möglichen Drehzahl wurde bewusst nicht vorgenommen.

Insgesamt zeigen die Abschätzungen, dass die auftretenden Kräfte und Spannungen selbst unter konservativen Annahmen innerhalb eines beherrschbaren Bereichs liegen und der Einsatz des Schwungrads im vorgesehenen Betriebsbereich als mechanisch sicher bewertet werden kann.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Zahl, Schrift enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Ein Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Design enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Zahl enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.Die folgenden Abbildungen zeigen die wesentlichen Berechnungsschritte zur Abschätzung der im Betrieb auftretenden Kräfte und Spannungen des Schwungrads.

Abbildung : Abschätzung der Flächenpressung im Bereich der Schraubenbohrung

Abbildung : Spannungsabschätzung im äusseren Ring des Schwungrads

Abbildung : Fliehkraftberechnung der Schrauben am Schwungrad

# Reflexion

In der Reflexion betrachten wir die technischen Ergebnisse sowie den Entwicklungsprozess als Team. Ziel war es, die erreichte Funktion mit den ursprünglichen Erwartungen zu vergleichen, Schwächen im System zu erkennen und mögliche Verbesserungen für die Weiterentwicklung aufzuzeigen.

## Funktionsbewertung

Die Funktion des Prototyps bewerten wir als erfüllt, auch wenn es nicht die optimalste und effizienteste Entwicklung eines Schwungrades ist. Dem System ist es ermöglicht, bei der eingestellten Drehzahl, sich stabil auf dem Seil auszubalancieren und sich über eine längere Zeit sich dort zu halten. Die Funktionalität des Systems ist jedoch stark abhängig von der Drehzahl des Schwungrades und dessen Trägheitsmoments. Diese Parameter konnten wir erfolgreich einstellen, doch mit einer genaueren Analyse kann in diesem Punkt, eine sehr viel effizientere und effektivere Parametrisierung der aktuellen Konfiguration gefunden werden.

Für einen Prototypen, erfüllt das System die Funktionalität der geforderten Aufgabe.

## Verbesserungspotenzial am Prototyp

Der entwickelte Prototyp weist noch einiges an Verbesserungspotential auf. Hier werden wir auf einige Punkte kurz eingehen welche Optimierungspotential hätten, wenn es genauer analysiert und ausgearbeitet wird.

* **Gewichtsreduktion des Gesamtsystems**  
  Da eine Modifikation am Seil selbst vorgenommen werden musste, kann das System Gewichtstechnisch optimiert werden mit anderen Materialien oder leichteren und kleineren Komponenten, ohne die Sicherheitsaspekte einzubüssen
* **Präzise Lagerung des Schwungrades**  
  Aktuell ist der Übergang des Schwungrades auf beide Seiten nicht komplett straff verankert, sodass kein spiel in die die vertikale und horizontale Achse entsteht. Dadurch kann sicherlich die Schwingeffekte reduziert werden und einen ruhigeren Lauf des Schwungrades gewährleisten.
* **Robustere und geführte Kabel**  
  Aktuell hängen die Kabel in der Luft umher und sind nicht geschützt. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit verringert das sich Kabel lösen oder anderweitige Probleme entstehen.
* **Integration einer Neigungserkennung**  
  Durch die Erfassung der Systemneigung kann die Drehzahl des Schwungrads situationsabhängig erhöht oder angepasst werden.
* **Reduktion von Unwuchten**

Fertigungsbedingte Unwuchten sollen durch präzise Herstellung oder nachträgliches Auswuchten minimiert werden, um Vibrationen und Lagerbelastungen zu reduzieren.

* **Erhöhung der Sicherheit der Schwungradkammer**Die Kammer, welche zur Sicherheit des Schwungrades konstruiert wurde, soll robuster ausgelegt werden und gegebenenfalls noch zusätzliche Schutzmassnahmen ergänzt werden.

## Optimierung des Entwicklungsprozesses

Der Entwicklungsprozess innerhalb des Teams war grundsätzlich gut strukturiert und konnte weitgehend reibungslos durchgeführt werden. Optimierungspunkte für einen ausgereiften Entwicklungsprozess sind jedoch schwierig zu definieren. Natürlich gab es innerhalb des Teams strukturelle und organisatorische Hürden, die bei jedem Team unterschiedlich ausfallen. Der iterative Ansatz des Entwicklungsprozesses passte sehr gut zu unserer Teamzusammenstellung, jedoch war insbesondere der Anfang recht unübersichtlich. Ein möglicher Optimierungspunkt liegt hier in der Analyse- und Ideengenerierungsphase, da diese einen sehr guten Start in den Prozess darstellt. Durch einen zu weichen Übergang in die nächste Phase konnte jedoch keine eindeutige Entscheidung getroffen werden, wodurch nicht alle Mitglieder die gleiche Vorstellung vom aktuellen Entwicklungsstand hatten.

## Video

Zur Veranschaulichung wurde ein kurzes Video erstellt, das den Prototyp auf dem Seil zeigt. Im Video sind der Hochlauf des Reaktionsrades, die Reaktion auf kleine Stösse und typische Fehlersituationen dokumentiert. Der Link zum Video wird im digitalen Bericht und im GitHub-Repository bereitgestellt.

## Pro- Contra-Analyse

**Pro:**

* Funktionsfähiger Prototyp
* Einfache technische Umsetzung
* Parametrischer und modularer Aufbau
* Flexible CAD-Basis für weitere Iterationen
* Einfache Anpassung von Masse und Drehzahl
* Ersichtlicher Vergleich zu einem Alltagsgegenstand (Kreisel)

**Contra:**

* Relativ hohes Gesamtgewicht
* Passive Regelung
* Hohe Abhängigkeit von manueller Einstellung
* Empfindlich gegenüber Unwuchten
* Hohe Sicherheitsmassnahmen notwendig
* Stabilität stark drehzahlabhängig

## Fazit

Schlussendlich zusammengefasst konnten aus dem Projekt einige organisatorische und technische Lernerfahrungen genommen werden. Trotz der anfänglichen Herausforderung, als neu zusammengestelltes Team zusammenzuarbeiten, konnten wir eine funktionierende Organisation aufstellen, um die Anforderungen umzusetzen. Durch die flexible Herangehensweise im Entwicklungsprozess sowie der bewusst modulare und parametrisch aufgebaute Prototyp vereinfachte den Projektablauf und ermöglichte einen schnellen Richtungswechsel zu fast jedem Zeitpunkt.

Der entwickelte Prototyp erreicht die Projektziele und zeigt erfolgreich, wie die kreiselbasierte Stabilisierung funktioniert, einschliesslich des Balancierens auf einem Seil. Die modulare und parametrisierte Bauweise sowie der iterative Entwicklungsprozess erwiesen sich als entscheidende Faktoren, da sie schnelle Anpassungen, Fehlversuche und Richtungswechsel direkt in weitere Iterationen einfliessen liessen. Der aktuelle Prototyp zeigt gut, wie theoretische Ideen praktisch umgesetzt, überprüft und Schritt für Schritt weiterentwickelt werden können und stellt gleichzeitig eine solide Grundlage für künftige Verbesserungen dar.

# Quellenverzeichnis

|  |  |
| --- | --- |
| Quelle 1 | wiki.dfrobot.com/FireBeetle\_Board\_ESP32\_E\_SKU\_DFR0654 |
| Quelle 2 |  |
| Quelle 3 | Link |

# Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Challangeaufbau 1](#_Toc219139049)

[Abbildung 2: Erste Modell Versuche 2](#_Toc219139050)

[Abbildung 3: Erste Skizzen 2](#_Toc219139051)

[Abbildung 4: Grundidee Skizze 3](#_Toc219139052)

[Abbildung 5: Lösungsansatz 1 Versuchsaufbau 4](#_Toc219139053)

[Abbildung 6: Lösungsansatz 2 Versuchsaufbau 4](#_Toc219139054)

[Abbildung 7: Aufbau erster Iteration seitlich 5](#_Toc219139055)

[Abbildung 8: Aufbau erster Iteration oben 5](#_Toc219139056)

[Abbildung 9: Aufbau zweiter Iteration 7](#_Toc219139057)

[Abbildung 10: Elektronikkomponenten-Halterung 9](#_Toc219139058)

[Abbildung 11: Servo- und Zwischenhalterung 9](#_Toc219139059)

[Abbildung 12: Schwungradkammer und Auflagekegel 10](#_Toc219139060)

[Abbildung 13: Schwungrad 11](#_Toc219139061)

[Abbildung 14: Materialeigenschaften 12](#_Toc219139062)

[Abbildung 15: Erste finale Umsetzung 14](#_Toc219139063)

[Abbildung 16:Schwungrad verstärkt mit Basaltfaser 15](#_Toc219139064)

[Abbildung 17: Versuchsaufbau mit Stützen 16](#_Toc219139065)

[Abbildung 18: Software-Ablaufdiagramme 21](#_Toc219139066)

[Abbildung 19: Abschätzung der Flächenpressung im Bereich der Schraubenbohrung 23](#_Toc219139067)

[Abbildung 20: Spannungsabschätzung im äusseren Ring des Schwungrads 23](#_Toc219139068)

[Abbildung 21: Fliehkraftberechnung der Schrauben am Schwungrad 23](#_Toc219139069)