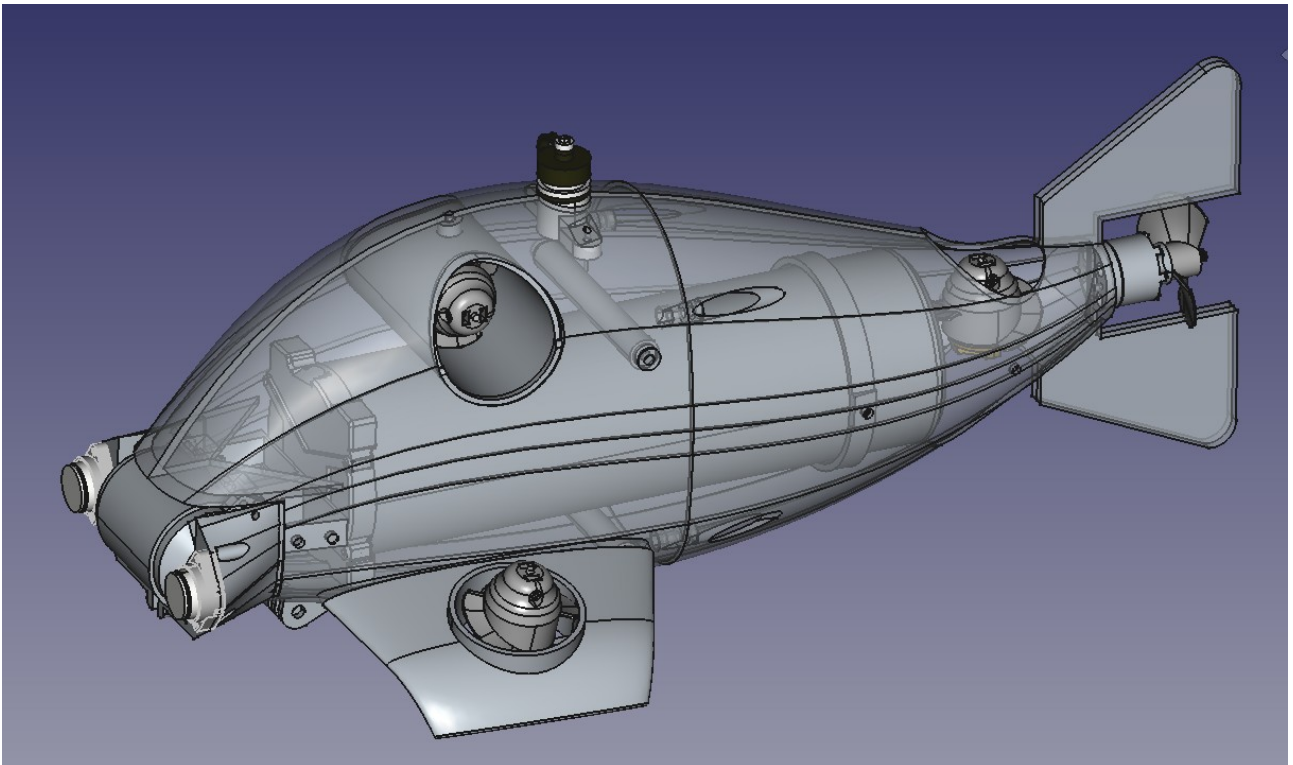


Entwicklung einer DIY-Unterwasserdrohne



Von

Maximilian Bietz

Betreuungslehrer: Herr Nebe

Städt. St. Michael Gymnasium, Bad Münstereifel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1. Einleitung.....	3
1.1 Projektidee und Zielsetzung.....	3
1.2 Projektfeatures – was soll unsere Unterwasserdrohne können?.....	4
1.3 Zerlegung in Entwicklungsmodule und Problemstellungen.....	4
Modul 1: Steuerung und Navigation.....	4
Modul 2: Visuelle Erfassung und Live-Übertragung.....	5
Modul 3: Design der Drohne.....	5
2. Umsetzung.....	6
2.1 Umsetzung Modul 1: Steuerung und Navigation.....	6
2.1.1 Steuerungskonzept: Pixhawk und ArduSub.....	6
2.1.2 Der Companion Computer: Raspberry Pi 4 und BlueOS.....	6
2.1.3 Zusammenspiel und Signalweg.....	7
2.1.4 Energieversorgung – 3s2p-Akkupack.....	7
2.1.5 Kompaktes Design eines Stacks aller Elektronikkomponenten....	8
2.1.6 Reprogrammierung der ESCs zum Betrieb mit ArduSub / Q GroundControl.....	9
2.2 Umsetzung Modul 2: Visuelle Erfassung und Live-Übertragung.....	10
2.2.1 Hardware-Integration der Kamera.....	10
2.2.2 Signalverarbeitung und Streaming via BlueOS.....	10
2.3 Umsetzung Modul 3: Design der Drohne.....	10
2.3.1 Biomimetisches Design und Rahmenkonstruktion.....	11
3. Materialliste und Komponentenspezifikation.....	13
3.1 Elektronische Kernkomponenten.....	13
3.2 Antrieb und Energie.....	13
3.3 Mechanik und Gehäusebau.....	13
3.4 Konnektivität und Beleuchtung.....	14
4. Aktueller Stand des Projektes und Ausblick.....	14
4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	14
4.2 Zukünftige Entwicklungsziele (Roadmap).....	15

1. Einleitung

1.1 Projektidee und Zielsetzung

Ziel unseres Projektes ist die Entwicklung und der Bau einer Unterwasserdrohne zur Untersuchung und zum Monitoring aquatischer Ökosysteme im do-it-yourself Ansatz.

Untersuchungen unterhalb der Wasseroberfläche sind üblicherweise nur mit größerem Aufwand möglich - für ein biologisches Monitoring aber unabdingbar. Kommerziell verfügbare Lösungen sind aber derart teuer (mehrere tausend Euro), dass sie für viele Einrichtungen und Anwender mit limitierten Budgets unerschwinglich sind.

Wir möchten daher eine kostengünstige und praxistaugliche Unterwasserdrohne entwickeln, die diese Lücke schließen.

Eine besondere Herausforderung wird hierbei die Realisierung einer stabilen und nutzerfreundlichen Kommunikation zwischen Drohne und User an Land sein, da eine klassische Funkverbindung, wie sie bei luftgestützten Drohnen zum Einsatz kommt, hier aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Mediums Wasser ausgeschlossen ist.

Auch muss das Problem gelöst werden, die gesamte Elektronik wasserdicht versiegelt zu bekommen.

Die Unterwasserdrohne wird dann anschließend im Rahmen des schulischen Biologieunterrichtes eingesetzt werden, um weitere Praxiserfahrungen zu sammeln und den ersten Prototypen weiter zu optimieren. Das finale Produkt – eine praxiserprobte und technisch ausgereifte Unterwasserdrohne – soll dann zukünftig einen Beitrag leisten, das biologische Monitoring aquatischer Ökosysteme zu verbessern, indem es aufgrund der Kosteneffizienz unserer Lösung einfach viel öfter zum Einsatz kommt.

Damit dieser breite Einsatz stattfinden kann und um den wissenschaftlichen Gemeinschaftsgedanken zu fördern, werden alle Baupläne und Software-Konfigurationen unter einer Open-Source-Lizenz auf GitHub veröffentlicht.

1.2 Projektfeatures – was soll unsere Unterwasserdrohne können?

Für einen erfolgreichen Einsatz im Monitoring wurden folgende Kernanforderungen definiert:

- **Optisches Monitoring:** Übertragung eines Live-Videostreams in Echtzeit an die Oberfläche.
- **Intuitive Steuerung:** Manövrierfähigkeit über einen handelsüblichen Controller.
- **Wartungsfreundlichkeit:** Die Akkus müssen geladen werden können, ohne das wasserdichte Gehäuse jedes Mal öffnen zu müssen.
- **Nachhaltigkeit und Reproduzierbarkeit:** Verwendung von marktverfügbaren Bauteilen und einem 3D-gedruckten Rahmen.
- **Zukunftsfähigkeit:** Die Hardware soll perspektivisch autonome Missionen ermöglichen.

1.3 Zerlegung in Entwicklungsmodule und Problemstellungen

Um die Entwicklung der Unterwasserdrohne trotz der hohen technischen Komplexität zielführend zu gestalten, wurde das Gesamtprojekt in drei funktionale Entwicklungsmodule unterteilt. Dieser modulare Ansatz erlaubt es, spezifische Problemstellungen isoliert zu betrachten und Lösungen zu entwickeln, die im späteren Verlauf zu einem Gesamtsystem integriert werden.

Modul 1: Steuerung und Navigation

Die primäre Herausforderung dieses Moduls besteht darin, eine präzise und intuitive Manövrierfähigkeit im dreidimensionalen Raum (3D) sicherzustellen. Im Gegensatz zu Luftdrohnen muss ein ROV (Remotely Operated Vehicle) gegen Strömungen ankämpfen und eine stabile Wasserlage ohne visuellen Horizont beibehalten.

- **Technische Umsetzung:** Als zentrale Steuereinheit dient der PixHawk 2.4.8 Flightcontroller, der aufgrund seiner fortschrittlichen Stabilisierungsfähigkeiten und des internen Gyroskops gewählt wurde.
- **Antriebslogik:** Die Steuerung koordiniert fünf bürstenlose Motoren, die über eine Kombination aus einem 4-fach ESC und einem zusätzlichen Einzel-ESC angesteuert werden. Dies ermöglicht Bewegungen in alle Richtungen (Heben/Senken, Vorwärts/Rückwärts, Gieren und Rollen).
- **Software-Framework:** Durch das Flashen der ArduSub-Firmware wird eine professionelle Grundlage für die Unterwassernavigation geschaffen, die

zudem die zukünftige Implementation autonomer Missionen über das MavLink-Protokoll ermöglicht.

Modul 2: Visuelle Erfassung und Live-Übertragung

Ein biologisches Monitoring ist ohne visuelle Rückkopplung nicht möglich. Das Ziel dieses Moduls ist die Bereitstellung eines hochauflösenden Live-Videostreams.

- **Problemstellung der Signalübertragung:** Da elektromagnetische Wellen (Funk) im Medium Wasser stark absorbiert werden, ist eine klassische Fernsteuerung ausgeschlossen.
- **Lösung durch Tethering:** Die Videoübertragung erfolgt kabelgebunden über ein Ethernetkabel. Ein Raspberry Pi 4 fungiert hierbei als „Companion Computer“, der den Videofeed einer USB-Kamera verarbeitet und via BlueOS an die Bodenstation streamt.

Modul 3: Design der Drohne

Dieses Modul befasst sich mit dem physischen Aufbau der Drohne und dem Schutz der sensiblen Elektronik vor den extremen Bedingungen unter Wasser.

- **Das Dichtigkeitsproblem:** Die Elektronik muss absolut wasserdicht geschützt sein, gleichzeitig aber kompakt genug bleiben, um in ein strömungsoptimiertes Gehäuse zu passen. Die Lösung ist ein modularer Aufbau, bei dem die Elektronik in einem versiegelten Acrylzylinder untergebracht ist, während der restliche Rahmen als „Wetframe“ (wassergefüllter Rahmen) konzipiert wurde.
- **Biomimetisches Design:** Bei der Gestaltung des Rahmens wurde eine Orientierung an der Natur gewählt. Die Form eines Karpfens dient als Vorbild, da diese evolutiv für maximale Strömungsdynamik optimiert ist und eine geringere Schreckwirkung auf aquatische Organismen ausübt als rein technische Strukturen.
- **Energie-Management:** Ein zentrales Problem ist die Wartungsfreundlichkeit. Um die Drohne für den täglichen Einsatz im Biologieunterricht praktikabel zu machen, wurde ein System entwickelt, das das Laden der internen Akkus ermöglicht, ohne das wasserdichte Gehäuse demontieren zu müssen.

2. Umsetzung

2.1 Umsetzung Modul 1: Steuerung und Navigation

2.1.1 Steuerungskonzept: Pixhawk und ArduSub

Das Herzstück der Navigation unserer Unterwasserdrohne bildet der **Pixhawk 2.4.8 Flightcontroller**. Die Wahl fiel auf diesen Controller, da er eine leistungsstarke und bewährte Hardwareplattform für die Open-Source-Firmware **ArduSub** darstellt.

Die Rolle des Pixhawk: Der Pixhawk übernimmt die Aufgabe der Echtzeit-Stabilisierung und Motoransteuerung. Er ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, darunter ein 3-Achsen-Gyroskop, ein Beschleunigungsmesser und ein Barometer (welches in unserem Fall für die Tiefenmessung genutzt werden kann).

- **ArduSub Firmware:** ArduSub ist eine spezialisierte Version der ArduPilot-Software, die exakt auf die Anforderungen von ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen (ROVs) zugeschnitten ist. Sie ermöglicht die Koordination der fünf bürstenlosen Motoren, um komplexe Bewegungen wie das präzise Abtauchen, Drehen auf der Stelle oder das Halten einer stabilen Wasserlage zu realisieren.
- **Motoransteuerung:** Der Pixhawk gibt Signale an ein 4-in-1 ESC (Electronic Speed Controller) sowie ein zusätzliches Einzel-ESC weiter. Diese Regler übersetzen die Steuersignale des Pixhawk in die nötigen Drehzahlen für die Motoren, um die gewünschte Manövrierfähigkeit im dreidimensionalen Raum zu gewährleisten.

2.1.2 Der Companion Computer: Raspberry Pi 4 und BlueOS

Da der Pixhawk allein keine Videodaten verarbeiten oder eine komplexe Netzwerkkommunikation über lange Distanzen (Tether) direkt handhaben kann, wird ein sogenannter **Companion Computer** benötigt. Hierfür setzen wir einen **Raspberry Pi 4B** mit 4GB RAM ein.

Die Rolle des Raspberry Pi: Der Raspberry Pi fungiert als Kommunikationsbrücke zwischen der Hardware in der Drohne und der Bodenstation an Land. Er ist über eine USB-Schnittstelle direkt mit dem Pixhawk verbunden und tauscht über das **MAVLink-Protokoll** Telemetrie- und Steuerdaten aus.

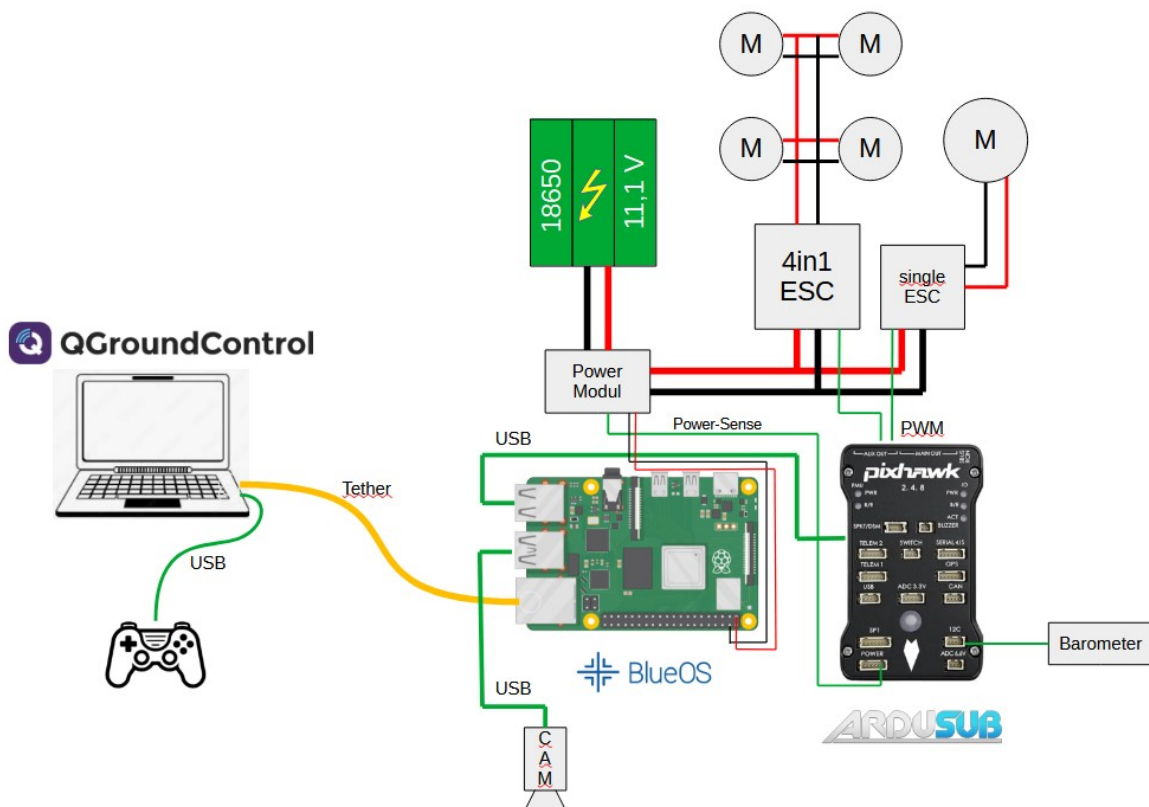
- **Das Betriebssystem BlueOS:** Auf dem Raspberry Pi ist **BlueOS** installiert. Dabei handelt es sich um ein modernes, Web-basiertes Betriebssystem von Blue Robotics, das speziell für Unterwasseranwendungen entwickelt wurde.
- **Videomanagement:** BlueOS erkennt die angeschlossene IMX323 USB-Kamera automatisch und komprimiert den Videostream für eine latenzarme Übertragung über das 30 Meter lange Ethernet-Kabel (Tether) zur Bodenstation.

2.1.3 Zusammenspiel und Signalweg

Der Signalweg gestaltet sich wie folgt: Der Nutzer steuert die Drohne an Land über einen **PS4-Controller-Klon**, der an einen Laptop (Bodenstation) angeschlossen ist. Die Steuerbefehle werden über die Software (z. B. QGroundControl) verarbeitet und via Ethernet an den Raspberry Pi in der Drohne gesendet. Dort nimmt **BlueOS** die Befehle entgegen, leitet sie per USB an den **Pixhawk** weiter, welcher wiederum die **ESCs** und somit die **fünf Motoren** ansteuert. Gleichzeitig wird das Bild der Frontkamera den entgegengesetzten Weg zurück zum Monitor des Nutzers geschickt, was eine präzise visuelle Navigation ermöglicht

2.1.4 Energieversorgung – 3s2p-Akkupack

Die Energieversorgung des gesamten Systems übernimmt ein Akkupack aus 18650 LiPo 3,7V Batterien in 3s2p Konfiguration, der somit eine Nennspannung von 11,1V liefert. Die Stromsteuerung übernimmt ein Powermodul, das vom PixHawk überwacht wird und die Motoren und die Computer mit der Spannung des Akkupacks versorgt.

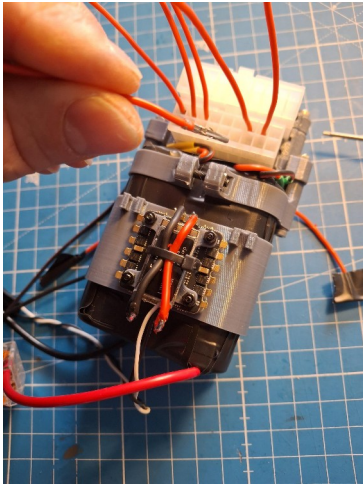


Schematisches Konzept zur Steuerung der Unterwasserdrohne

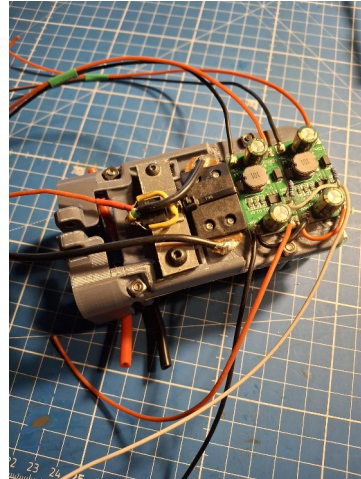
Die Schaltung der Batteriestromversorgung wird mittlerweile über einen MOSFET-Schalter (IRF 1404PBF N-MOSFET) realisiert, der den GND der Batterie durchschaltet, sobald der Tether außen an die Drohne angeschlossen wird, womit ein logisches High an den MOSFET gesendet wird.

2.1.5 Kompaktes Design eines Stacks aller Elektronikkomponenten

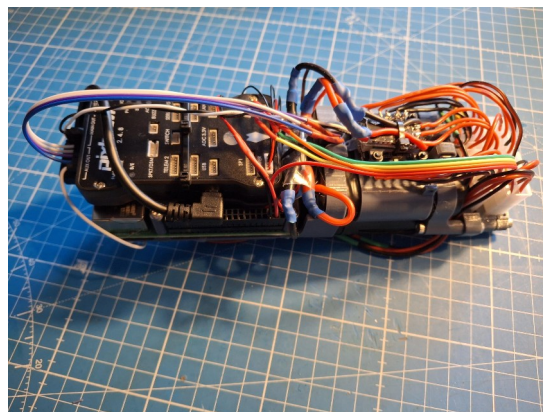
Um die gesamte Elektronik innerhalb eines möglichst kleinen Acrylrohres unterbringen zu können, wurden alle Komponenten maximal komprimiert auf einem 3d-gedruckten Halter untergebracht. Um die wasserdichte Kabeldurchführung in Epoxydharz zu ermöglichen, wurden diese zunächst physisch getrennt und anschließend wieder über Molex-Stecker verbunden, so dass der „Kabelsalat“ einigermaßen übersichtlich zusammengeführt wird.



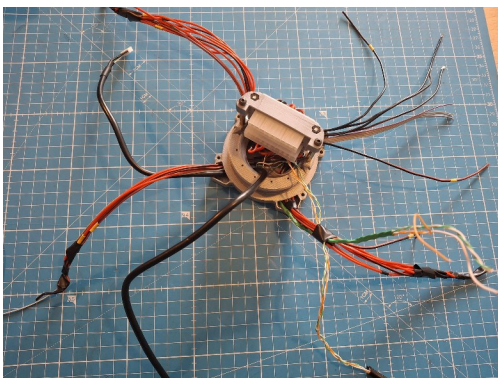
Modul mit 3s2p-Akku + ESC-Stack



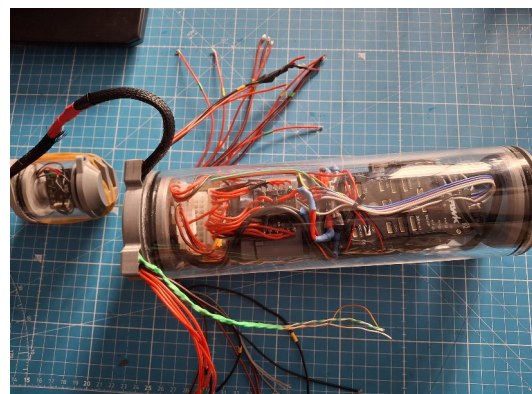
Modul mit MOSFET-Schalter, 60A Sicherung und LED-Treibern
(auf der Rückseite ist der Halter für Raspberry und PixHawk darüber)



zusammengesetzte Module mit Pixhawk und Raspberry Pi 4B



Kappe mit epoxydversiegelten Kabeldurchführungen

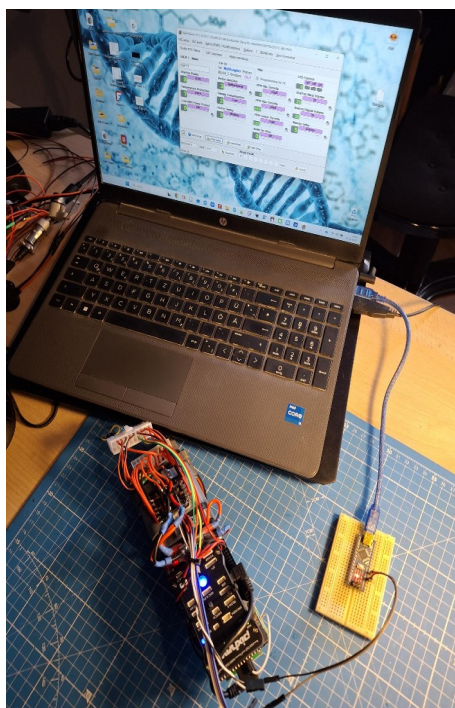


komplette Elektronik im Acrylrohr inklusive USB-Kamera

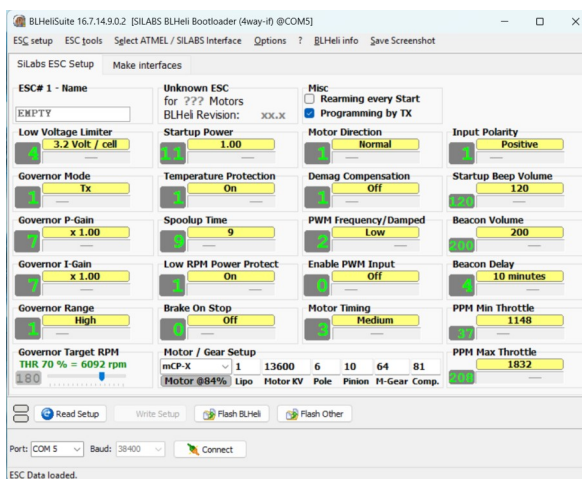
2.1.6 Reprogrammierung der ESCs zum Betrieb mit ArduSub / Q GroundControl

Damit die eigentlich zur Kontrolle von Quadcopter-Motoren vorgesehenen ESCs für die Motoren der Unterwasserdrohne verwendet werden können, müssen diese zwingend neu konfiguriert werden, um die Motoren bidirektional ansprechen zu können. Standardmäßig drehen diese die Motoren nur in eine Richtung, was für eine Flugdrohne auch sinnvoll ist, da den „Schub nach unten“ die Schwerkraft erledigt. Daher müssen die ESCs reprogrammiert werden, was mit der freien Software **BLHeliSuite** erfolgte. Mit dieser Software kann ein Arduino Nano Mikrocontroller geflashed werden, der dann wiederum über das Software-Interface von BLHeliSuite in der Lage ist, mit den Chips der ESCs zu kommunizieren und diese zu reprogrammieren.

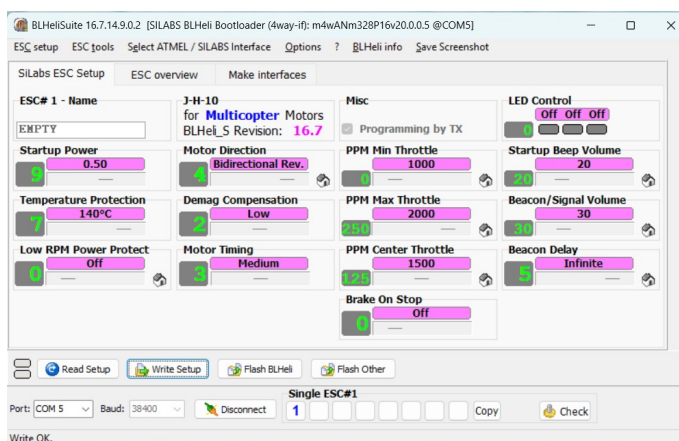
Hierbei wird als zentrale Modifikation die Interpretation des Steuerimpulses verändert: Die Signalsteuerung funktioniert im RC-Bereich in der Regel mit Impulsen, die eine Länge zwischen 1000 und 2000µs haben. Hierbei soll nun aber nicht 1000 als „AUS“ und 2000 als „maximaler Schub in eine Richtung“ interpretiert werden, sondern die ESCs sollen den Wert 1500 als „AUS“ setzen und dann entsprechend vorwärts (>1500µs bis 2000µs Vollschub vorwärts) oder rückwärts (<1500µs bis 1000µs Vollschub rückwärts) interpretieren.



Reprogrammierung der ESCs mit Hilfe eines Arduino Nano Mikrocontrollers



ESC-Setup GUI von BLHeliSuite



Neue Parameter für die Reprogrammierung der ESC-Chips

2.2 Umsetzung Modul 2: Visuelle Erfassung und Live-Übertragung

Die visuelle Komponente ist für den geplanten Einsatz im biologischen Monitoring von zentraler Bedeutung, da sie die unmittelbare Beobachtung aquatischer Lebensräume in Echtzeit ermöglicht. Da die klassische Funkübertragung aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Wassers – insbesondere der hohen Absorption elektromagnetischer Wellen im Megahertz- und Gigahertz-Bereich – ausgeschlossen ist, wurde ein kabelgebundenes System (Tethering) entwickelt.

2.2.1 Hardware-Integration der Kamera

Für die optische Erfassung kommt ein **IMX323 Low Illumination USB-Kameramodul** zum Einsatz.

- **Lichtempfindlichkeit:** Dieses Modul wurde gezielt gewählt, da es auch in tieferen oder trüberen Gewässern bei geringem Restlicht hochwertige Aufnahmen in 1080p-Auflösung liefert.
- **Positionierung:** Die Kamera befindet sich im Bug der Drohne, um dem Piloten eine natürliche Perspektive in Fahrtrichtung zu ermöglichen.
- **Zusatzbeleuchtung:** Um die Sichtweite in dunklen Bereichen zu erhöhen, wird die Kamera von zwei hochleistungsfähigen **5W LED-Modulen** flankiert, die mit speziellen wasserdichten Linsen ausgestattet sind.

2.2.2 Signalverarbeitung und Streaming via BlueOS

Der Raspberry Pi 4 fungiert als zentraler Medien-Server innerhalb der Drohne.

- **Encoding:** Das USB-Signal der Kamera wird vom Raspberry Pi abgegriffen und unter dem Betriebssystem **BlueOS** verarbeitet.
- **Latenzoptimierung:** BlueOS nutzt spezialisierte Streaming-Protokolle, um das Videosignal zu komprimieren und mit minimaler Verzögerung (Latenz) über das Ethernet-Kabel an die Oberfläche zu senden. Eine geringe Latenz ist essenziell, um auf Hindernisse in Echtzeit reagieren zu können.
- **Bodenstation:** Am Ende des 30 Meter langen Tethers wird das Signal an einen Laptop übergeben, wo der Live-Feed in einer Steuerungssoftware wie **QGroundControl** angezeigt wird.

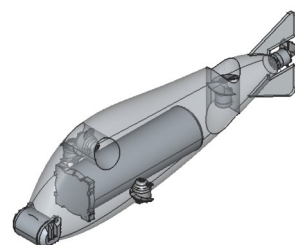
2.3 Umsetzung Modul 3: Design der Drohne

Das dritte Modul umfasst die physische Konstruktion der Drohne. Hier mussten Lösungen gefunden werden, die sowohl hydrodynamische Effizienz als auch den sicheren Schutz der Elektronik vor dem Umgebungsdruck und der Feuchtigkeit gewährleisten.

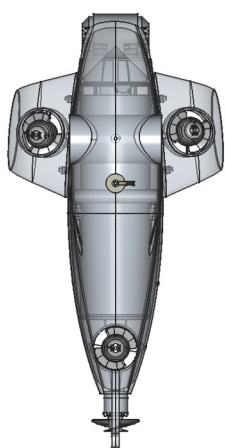
2.3.1 Biomimetisches Design und Rahmenkonstruktion

Beim Design der Unterwasserdrohne stand primär die Funktionalität im Vordergrund. Ziel war die Entwicklung einer möglichst unauffälligen und kompakten Drohne, die sich für Forschungs- und Erkundungsaufgaben eignet, ohne dabei die umliegende Tierwelt unnötig zu stören. Aus diesem Grund wurde die äußere Form des Fahrzeugs an die Silhouette eines Fisches angelehnt. Ergänzend wurde ein biomimetischer Ansatz verfolgt, wobei sich die Formgebung am Körperbau eines Karpfens orientiert, da dieser eine strömungsgünstige und evolutiv optimierte Geometrie aufweist. Die gesamte Konstruktion wurde in der Open-Source-Software FreeCAD (Version 1.0) modelliert. Die CAD-Entwicklung bildete die Grundlage für mehrere iterative Designschritte und Versionen.

Im Inneren der Drohne befindet sich der Kern des Fahrzeuges. Dabei handelt es sich um ein Acrylrohr mit einer Länge von etwa 250 mm und einem Innendurchmesser von 70 mm, in dem alle funktionskritischen elektronischen Komponenten untergebracht sind. Um den begrenzten Bauraum effizient zu nutzen, wurde ein spezieller, 3D-gedruckter Halter entwickelt, der die Elektronik – darunter Pixhawk, Raspberry Pi und Akku – sicher fixiert und als kompakter Einschub in das Rohr eingesetzt werden kann. An der Vorderseite des Hauptrohres ist ein weiteres, kleineres Acrylrohr angebracht, das die Kamera aufnimmt. Um diese beiden Rohre herum mussten die Motoren so angeordnet werden, dass eine möglichst gute Manövrierbarkeit bei gleichzeitig kompakter Bauweise erreicht wird. Die erste Entwicklungsaufgabe bestand daher in der Ermittlung einer optimalen Anordnung der Elektronik und Antriebseinheiten. Das Ergebnis dieser Phase ist im ersten FreeCAD-Modell (Version 1) dargestellt.



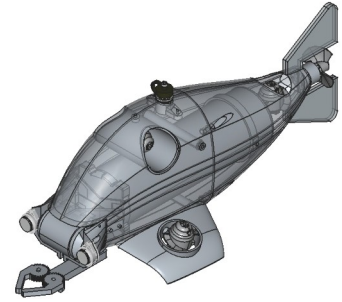
Version 1 (Anordnung der Komponente)



Version 3 (obere Ansicht)

Die finale Anordnung sieht vor, dass sich das Haupt-Acrylrohr zentral im Fahrzeug befindet, um möglichst kurze Verbindungen zu allen elektronischen Komponenten zu gewährleisten. Am vorderen Ende des Rohres ist die Kamera in Fahrtrichtung ausgerichtet. Am Heck befindet sich ein großer, nach hinten gerichteter (X2212 980kV) Motor, der für den hauptsächlich Vortrieb verantwortlich ist. Zwischen diesem Motor und dem Acrylrohr ist einer von fünf Manövrirantrieben (A2212 930kV) positioniert, der nach oben ausgerichtet ist. Zusammen mit den beiden Motoren in den Flossen bildet dieser eine dreieckige Anordnung, mit der das Sink- und Steigverhalten der Drohne kontrolliert werden kann. Zusätzlich können die Flossenmotoren so angesteuert werden, dass Rollbewegungen sowie ein gezieltes Neigen nach oben oder unten möglich sind. Der letzte Motor befindet sich im vorderen Drittel oberhalb des Acrylrohres und ist seitlich ausgerichtet (Bugstrahlruder). Dieser erlaubt eine Drehung um die Hochachse und dient in Kombination mit dem hinteren Hauptmotor der Lenkung.

Der Rahmen der Drohne wurde nach dem sogenannten Wetframe-Prinzip konzipiert. Das bedeutet, dass die 3D-gedruckten Strukturteile bewusst vom Wasser durchströmt werden, während lediglich die empfindliche Elektronik in versiegelten Behältern untergebracht ist. Dieser Ansatz reduziert den konstruktiven Aufwand für großflächige Abdichtungen und unterstützt eine kompakte Bauweise.

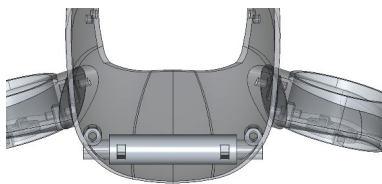


Version 4 (Finale Version)

Nach Abschluss der ersten Anordnungsphase wurde das ursprüngliche Modell weiter optimiert. Durch konstruktive Verdichtung und gezielte Verfeinerung entstand Version 2. Dabei konnte die Gesamtlänge der Drohne von ursprünglich etwa 600 mm auf rund 400 mm reduziert werden, ohne die Funktionalität einzuschränken.

Ein zentrales Problem ergab sich aus dem Ziel, die gesamte Außenhülle im FDM-3D-Druckverfahren herzustellen. Da an der Schule keine 3D-Drucker mit ausreichend großem Bauraum zur Verfügung standen, musste das Modell in mehrere Einzelteile zerlegt werden. In Version 3 wurde die zuvor massive Struktur daher in insgesamt elf separate Bauteile unterteilt. Die äußere Hülle besteht aus vier Hauptkomponenten: Bug und Heck sowie linker und rechter Seite. Bug und Heck werden über vier Schrauben miteinander verbunden, die von außen durch entsprechende Bohrungen geführt werden.

Die Halterungen für den seitlich steuernden Motor sowie für den hinteren Motor, der das Ab- und Auftauchen unterstützt, wurden ebenfalls als separate Bauteile ausgeführt und verschraubt. Im Inneren der Drohne befinden sich zwei Querbalken, die das linke und rechte Vorderteil miteinander verbinden und so zur strukturellen Stabilität beitragen.



Verschraubungen, innen

Um eine hohe Haltbarkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten, wird bei allen Verschraubungen mit Muttern gearbeitet. An mehreren Stellen sind dafür passgenaue Vertiefungen vorgesehen. Ein Beispiel sind die Flossen, die über eine formschlüssige Aufnahme für eine Mutter verfügen. Dadurch können die Flossen mit dem Bug verschraubt werden, ohne dass Schraube oder Mutter von außen sichtbar sind. Lediglich eine kleine Tasche an der Unterseite der Flosse bleibt erkennbar.

Dasselbe Prinzip wird bei der Verbindung von Bug und Heck angewendet, wo eine hexagonale Vertiefung verhindert, dass sich die Mutter beim Festziehen mitdreht.

Eine besondere technische Herausforderung stellte die wasserdichte Durchführung der Motorkabel dar. Um das Eindringen von Wasser durch die Kapillarwirkung der Kabelisolierung zu verhindern, wurden die Kabel an den Durchführungsstellen der Verschlusskappen aufgetrennt, neu verlötet und die Verbindungsstellen vollständig in Epoxidharz eingegossen. Dadurch konnte eine dauerhaft wasserdichte und mechanisch stabile Kabeldurchführung realisiert werden.

3. Materialliste und Komponentenspezifikation

Für den Nachbau der Unterwasserdrohne wurde gezielt auf marktverfügbare Komponenten gesetzt, um die Kosten gering zu halten und eine einfache Beschaffung zu gewährleisten. Die folgende Aufstellung detailliert die wichtigsten Bauteile und deren spezifische Funktion im System.

3.1 Elektronische Kernkomponenten

- **Pixhawk 2.4.8 Flight Controller:** Fungiert als primäre Recheneinheit für die Stabilisierung und Motorsteuerung unter ArduSub.
- **Raspberry Pi 4B (4GB RAM):** Dient als Companion Computer zur Verarbeitung des Videostreams und als Schnittstelle zur Bodenstation via BlueOS.
- **1080P IMX323 USB Kamera:** Ein lichtempfindliches Kameramodul, das speziell für die schwierigen Lichtverhältnisse unter Wasser (Low Illumination) gewählt wurde.
- **4in1 ESC (25A) & Einzel-ESC (20A):** Diese elektronischen Drehzahlregler wandeln die Steuersignale des Pixhawk in Leistung für die bürstenlosen Motoren um.

3.2 Antrieb und Energie

- **1x X2212 980kV Motor:** Leistungsstarker Motor für den Hauptantrieb im Heck.
- **4x A2212 930kV Motoren:** Kompaktere Motoren für die präzisen Manövrierbewegungen im Bug, Heck und an den Seiten.
- **3s2p 18650 Batteriepack:** Eine Lithium-Ionen-Stromquelle, die eine hohe Energiedichte bei kompakter Bauform bietet, um in das Acrylrohr zu passen.

3.3 Mechanik und Gehäusebau

- **Acrylrohr (80/70mm, 250mm Länge):** Das Hauptdruckgehäuse, welches die zentrale Elektronik und die Batterie wasserdicht umschließt.
- **Acrylrohr (50/40mm, 50mm Länge):** Separates Schutzgehäuse für die USB-Kamera im Bug.
- **O-Ringe (60x5 & 38x3):** Präzisionsdichtungen für die Verschlusskappen der beiden Acrylrohre.
- **2kg PLA Filament:** Material für den im FDM-Verfahren hergestellten, biomimetischen Rahmen.

3.4 Konnektivität und Beleuchtung

- **30m Ethernetkabel & Weipu 10-Pin Stecker:** Bildet den „Tether“ zur stabilen Datenübertragung und dient gleichzeitig als Ladeanschluss.
- **2x 5W LED Module & wasserdichte Linsen:** Sorgen für die notwendige Ausleuchtung des Sichtfeldes bei biologischen Monitoring-Einsätzen.
- **Kabelsätze (26AWG, 20AWG, 15AWG):** Verschiedene Querschnitte für Signalleitungen und die Hochstrom-Stromversorgung der Motoren.

4. Aktueller Stand des Projektes und Ausblick

Das Projekt der DIY-Unterwasserdrohne hat zum jetzigen Zeitpunkt einen wesentlichen Meilenstein erreicht: die Transformation von einer rein theoretischen Konzeption hin zu einem weitestgehend funktionsfähigen, physischen Prototypen. Was zum jetzigen Zeitpunkt noch Probleme bereitet ist die spezielle Optimierung der Steuerungskonfiguration der Unterwasserdrohne und das entsprechende Feintuning der Motoren in der Software zu implementieren. Die ArduSub-Distribution enthält zwar einige exemplarische Motorkonfigurationen und Beispielparameter von Unterwasserfahrzeugen, jedoch keine für diese Drohne nutzbaren, da hier günstige Flugdrohnenmotoren verwendet werden. Insofern müssen die spezifischen Quellcodedateien innerhalb des Firmware-Repository's identifiziert und entsprechend editiert werden, so dass alle Motoren auch korrekt angesprochen werden. Daran wird derzeit gearbeitet.

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Drohne konnte bereits erfolgreich in Testumgebungen manövriert werden. Durch die Nutzung von BlueOS auf dem Raspberry Pi ist eine intuitive Steuerung via PS4-Controller durch den Nutzer möglich, während der Live-Videofeed eine detaillierte Unterwasserbeobachtung in Echtzeit erlaubt. Besonders hervorzuheben ist die mechanische Zuverlässigkeit des Druckgehäuses und des innovativen Ladekonzepts, welches den praktischen Einsatz im Feld deutlich vereinfacht. Die Verwendung von 3D-gedruckten Komponenten nach dem „Wetframe“-Prinzip und massenproduzierten, marktverfügbaren Bauteilen sowie kostenloser, frei editierbarer Open Source Software für die gesamte Steuerung der Drohne hat sich als kostengünstige und zugleich robuste Lösung erwiesen.

4.2 Zukünftige Entwicklungsziele (Roadmap)

Obwohl die Drohne bereits grundsätzlich einsatzfähig ist, sollte die Ansteuerung der Motoren noch verbessert werden. Überdies bietet die aktuelle Architektur vielfältige Möglichkeiten zur Weiterentwicklung, die über die reine Fernsteuerung hinausgehen:

1. **Implementierung autonomer Missionen:** Der nächste große Schritt ist die Nutzung des **MavLink-Protokolls**, um die Drohne zur autonomen Navigation zu befähigen. Mit Hilfe von Softwarelösungen wie **Mission Planner** oder **QGroundControl** sollen zukünftig vordefinierte Wegpunkte abgefahren werden können. Dies würde ein systematisches, automatisiertes Scannen von Gewässerabschnitten ermöglichen, was die wissenschaftliche Datenqualität signifikant erhöhen würde.
2. **Sensorische Erweiterungen:** Um über die rein optische Beobachtung hinaus wertvolle Umweltdaten zu sammeln, ist die Integration weiterer Sensoren geplant. Denkbar sind Module zur Messung von pH-Wert, Trübung, Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur, die ihre Daten direkt in den Telemetrie-Stream des PixHawk einspeisen.
3. **Künstliche Intelligenz (KI) zur Objekterkennung:** Da der Raspberry Pi 4 über ausreichende Rechenkapazität verfügt, könnte perspektivisch eine KI-gestützte Bildverarbeitung implementiert werden. Diese könnte automatisch invasive Arten erkennen oder Fischpopulationen zählen, während die Drohne ihren Kurs abfährt.
4. **Open Source Veröffentlichung:** Getreu dem Projektziel wird die gesamte Dokumentation, inklusive der FreeCAD-Dateien und Konfigurationsskripte, auf **GitHub** veröffentlicht werden. Dies soll es anderen Schülern und Forschern ermöglichen, das System nachzubauen und gemeinschaftlich zu verbessern.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Projekt zeigt, wie moderne Fertigungsverfahren wie der 3D-Druck, die Verwendung von preiswerten, marktverfügbaren Bauteilen und die Nutzung und Modifizierung leistungsfähiger Open Source Software die Barrieren für den Zugang zu hochspezialisierter Forschungstechnik einreißen können und deren breite Anwendung zum Wohle der Umwelt ermöglichen kann.