

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

LIFE SCIENCES AND FACILITY MANAGEMENT

INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN IUNR

Erweiterung eines ADCP – Einbau von

Autopilotensystem und Trübungssonde



Projektarbeit PWRU1 von Yves Gubelmann

Master Umwelt und Natürliche Ressourcen

Forschungsgruppe Ökohydrologie

Abgabedatum: 6. Februar 2022

Fachkorrektoren:

Prof. Dr. Döring Michael

Forschungsgruppe Ökohydrologie, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Dr. Antonetti Manuel

Forschungsgruppe Ökohydrologie, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 1.1 | Ausgangslage | 3 |
| 1.2 | Hintergrund | 4 |
| 1.3 | Projektziele | 6 |
| 1.3.1 | Kopplung von ADCP und Trübungssonde | 6 |
| 1.3.2 | Einbau eines Autopilotystems..... | 6 |
| 2 | Einbau eines Autopilotystems | 7 |
| 2.1 | Hardware | 8 |
| 2.1.1 | Schematischer Aufbau | 10 |
| 2.1.2 | Verkabelung und Anordnung..... | 11 |
| 2.2 | Software..... | 11 |
| 3 | Inbetriebnahme..... | 12 |
| 3.1 | Firmwareupdate der Hardwarekomponenten | 12 |
| 3.2 | Einrichten eines Modells | 15 |
| 3.3 | Binden der Fernsteuerung..... | 16 |
| 3.4 | Konfiguration der Fernsteuerung..... | 17 |
| 3.5 | Konfiguration des Boots | 20 |
| 3.6 | Kalibration der Sensoren..... | 22 |
| 3.7 | Telemetrie..... | 22 |
| 3.8 | Manuelle Probefahrt..... | 23 |
| 3.9 | Tuning der Regelparameter | 24 |
| 3.10 | Fehleranalyse | 24 |
| 4 | Handlungsoptionen einer Reparatur..... | 25 |
| 5 | Ausblick | 26 |
| | Literaturverzeichnis | 27 |
| | Tabellenverzeichnis | 30 |
| | Abbildungsverzeichnis | 30 |
| | Anhang..... | 31 |

Alle Daten (Treiber, Konfiguration, Manuals und Datenblätter), welche für den Betrieb des Boots nötig sind, findet man im Git Repository https://github.com/gubely/ADCP_Autopilot.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Erfassung von Umweltparametern an und in Fließgewässer ist von zentraler Bedeutung. Die Erfassung, Auswertung und Modellierung von Geo-Informationen und -Prozessen bildet in der Ökohydrologie die Grundlage für Forschungsarbeiten am Gewässer. Unter dem Begriff *Remote Sensing* haben sich Erfassungsmethoden etabliert, welche räumliche Daten aus der Distanz aggregieren (Carboneau u. a. 2012).

Eine etablierte Technologie, welche für Untersuchungen an Fließgewässern benutzt wird, sind *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). Montiert auf einem ferngesteuerten Boot, können Parameter wie Fließgeschwindigkeit, Abfluss und Wassertiefe kontinuierlich erfasst werden. Dabei sendet ein Transmitter Ultraschallwellen (300 – 3000 kHz) in Richtung Gewässergrund, welche auf den Gewässergrund oder schwebenden Partikeln prallen und von den Körpern gestreut werden. Das rückgestreute Signal wird vom ADCP empfangen und mit der GPS-Position verknüpft. (Mueller und Wagner 2013)

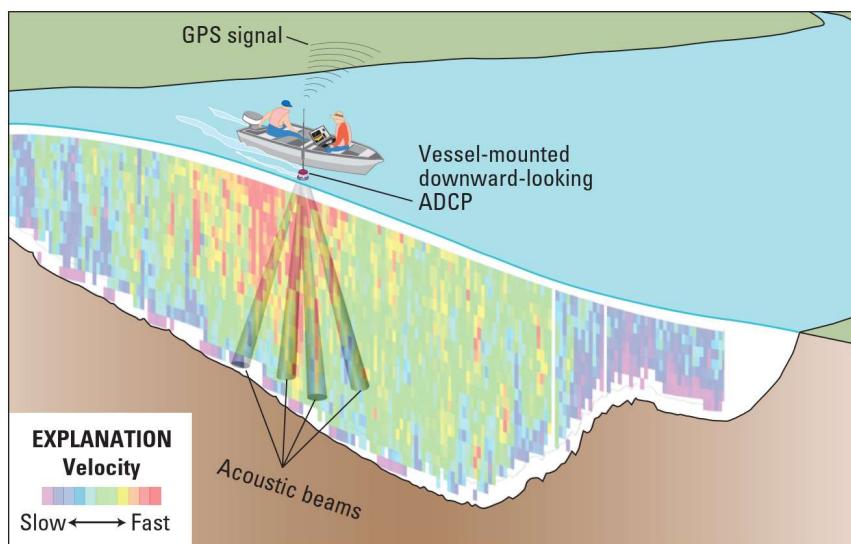


Abbildung 1. Funktionsweise eines ADCP, welcher auf einem Boot montiert ist (Mueller und Wagner 2013).

Mit einem ADCP werden unter anderem folgende Daten akquiriert:

1. Information über die Wassertiefe.
2. Trifft das Signal auf einen schwebenden Partikel wird aufgrund des Doppler Shifts ein Signal mit unterschiedlicher Frequenz zurückgegeben. Mit diesem Effekt kann die transportierte Schwebefracht mit einer Auflösung von circa 10 x 10 cm gemessen werden.
3. Die Intensität des empfangenen Signals. Die Intensität ist dabei abhängig von der transportierten Schwebefracht.

Abhängig von der Fragestellung werden diese Daten weiterverarbeitet, zum Beispiel für die Modellierung oder Validierung von hydro- und morphodynamischen Simulationen (Rivas-Casado u. a. 2015).

Die Forschungsgruppe Ökohydrologie besitzt ein ferngesteuertes Boot, welches mit einem ADCP ausgerüstet ist. Es handelt sich dabei um den *River Robot R2V2* von datapcs. Diese Plattform wird manuell bedient und wird unter anderem bei künstlichen Hochwasserereignissen eingesetzt (Jordan und Heller 2017). Aktuell wird die Plattform manuell bedient.



Abbildung 2. Der River Robot R2V2 im Einsatz, hier ausgerüstet mit dem ADCP M9 von Sontek (© ZHAW, Forschungsgruppe Ökohydrologie)

1.2 Hintergrund

Für die Simulation von Flussmorphologie und Sedimentprozessen benutzt die Forschungsgruppe Ökohydrologie die Programme BASEMENT sowie QGIS. Neben der Eingabe von Abluss- und Gitterdaten können weitere Parameter für die Simulation übergeben werden. Während der Simulation führt das Programm BASEMENT dabei eine vertikale Diskretisierung der simulierten Zellen durch (Abbildung 3). Die Zellen werden folgendermassen unterteilt (Vetsch u. a. 2020):

- > Schwebefracht (Suspended sediment)
- > Geröllfracht (bed load transport)
- > Sediment und Sublayer
- > Fixes Bett (Bedrock)

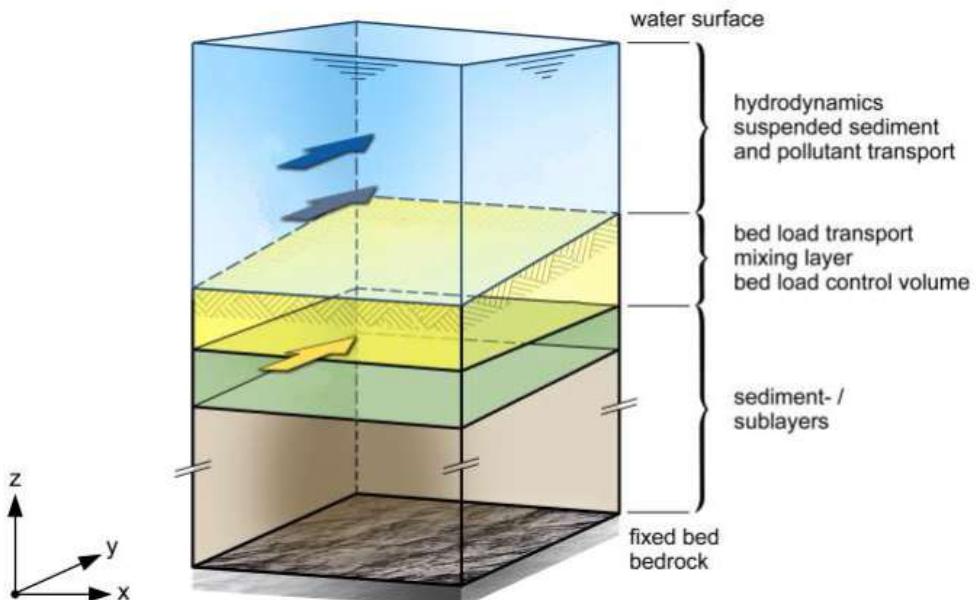


Abbildung 3. Vertikale Diskretisierung der simulierten Zellen, geändert nach Vetsch u. a. (2020)

Die exakte Angabe der Dicke der einzelnen Klassen ist eine Herausforderung und selten möglich. Die Geröllfracht kann aktuell mit keiner Messmethode direkt gemessen werden. Als Ansatz für die Messung der Geröllfracht sind Geophone (WSL 2021) oder Seismografen (Roth u. a. 2016) denkbar. Diese Methoden benötigen eine Kalibrierung, wofür die Daten aber meist fehlen.

Für die Einschätzung der transportierte Schwebefracht gibt es zwei gängige Methoden. Beide setzen voraus, dass die charakteristischen Eigenschaften der Schwebefracht (wie Zusammensetzung, Grösse, Form und Konzentration) bekannt sind. Folgende Ansätze sind gängig (Latosinski u. a. 2014):

- > Sind die akustischen Eigenschaften der Schwebefracht bekannt, kann diese durch die Intensität des empfangenen Signals geschätzt werden (Guerrero, Rüther, und Szupiany 2012).
- > Mit einem optischen Instrument wird die Trübung erfasst und mit der Intensität des empfangenen Signals gekoppelt (Gartner 2004). Dies setzt voraus, dass die vorhandenen Schwebstoffe vorgängig ausgemessen werden, um die Abhängigkeit Trübung versus Schwebefracht zu ermitteln (Holliday, Rasmussen, und Miller 2003).

Die Abschätzung der Schwebefracht mittels ADCP erfolgt indirekt und ist mit Unsicherheiten behaftet. Daher ist eine Kopplung zwischen ADCP und einem Trübungsmessgerät vorzuziehen. Dieser Ansatz bringt folgenden Vorteil: Mit den erfassten Trübungsdaten können die vom ADCP erfassten Daten validiert werden, was eine Verbesserung des hydraulischen Modells bewirkt.

1.3 Projektziele

Dieses Projekt setzt zwei technische Modifikationen an der bestehenden Plattform R2V2 um. Beide Modifikationen verbessern Elemente zur Datenerfassung ökohydrologischer Forschungsthemen, welche sich positiv auf die Modellierung oder Validierung von hydro- und morphodynamischen Simulationen auswirken. Folgende Modifikationen werden vorgeschlagen:

1.3.1 Kopplung von ADCP und Trübungssonde

Die ferngesteuerte Plattform R2V2 mit dem ADCP soll um ein Messgerät erweitert werden, sodass die mobile Erfassung von Trübungsdaten möglich wird. Durch die zeitgleiche Erfassung der Daten lässt sich die Trübung mit den ADCP-Daten koppeln und eine Abschätzung der Schwebefracht wird möglich (vgl. Kapitel 1.2).

1.3.2 Einbau eines Autopilotensystems

Die Forschungsgruppe Ökohydrologie wünscht, dass die Plattform mit einem Autopiloten erweitert wird. Mit einer solchen Erweiterung werden Feldarbeiten planbar: Routen und Passpunkte werden vorgängig festgelegt, eine Missionsplanung wird möglich. Diese Planbarkeit würde die Bedienung des Boots während Feldarbeiten massiv vereinfachen.

Innerhalb des ersten PWRU-Moduls wurden Autopilotensysteme evaluiert und ein geeignetes vorgeschlagen. Das vorgeschlagene System (Pixhawk 4) wird in diesem Modul eingebaut in Betrieb genommen.

Dies beinhaltet folgende Arbeiten:

- > Erweiterung der Verkabelung
- > Anpassung der Fernsteuerung
- > Konfiguration der Firmware
- > Aufsetzen der Missionsplanung

Nach dem der Autopilot integriert wurde erfolgt die Verifikation des Systems auf einem Binnengewässer.

Weiter werden folgende Dokumente verlangt:

- > Gantt Chart
- > Abrechnung der Kosten

2 Einbau eines Autopilotensystems

Der Einbau eines Autopilotensystems bedingt grosse Eingriffe auf den Ebenen Hard- sowie Software. Schematisch orientiert das Autopilotensystem an Multi-Rotor-Systeme, welche wie folgt aufgebaut sind (vgl. Abbildung 4):

- > Der *Flight Controller* bildet das zentrale Element auf der mobilen Plattform. Es empfängt Steuersignale vom *Telemetry Transceiver* und *RC Receiver*. Weiter verarbeitet der Flight Controller das GPS-Signal und leitet es an den PC der *Ground Control Station* weiter. Auch wird die Regelung des *Propulsion System* (Aktuatoren) berechnet und angesteuert.
- > Die *Ground Control Station* stellt das virtuelle Cockpit dar. Neben der Anzeige von Echtzeitdaten kann die Drohne auch manipuliert werden (hier nicht behandelt).
- > Mit dem *RC Transmitter* (Fernsteuerung) hat der Pilot die Möglichkeit manuell ins Geschehen einzutreten und das Steuersignal von der *Ground Control* zu übersteuern.
- > Das *Power System* (auch Powermanagement System) regelt die Stromversorgung aller Komponenten auf der mobilen Plattform.

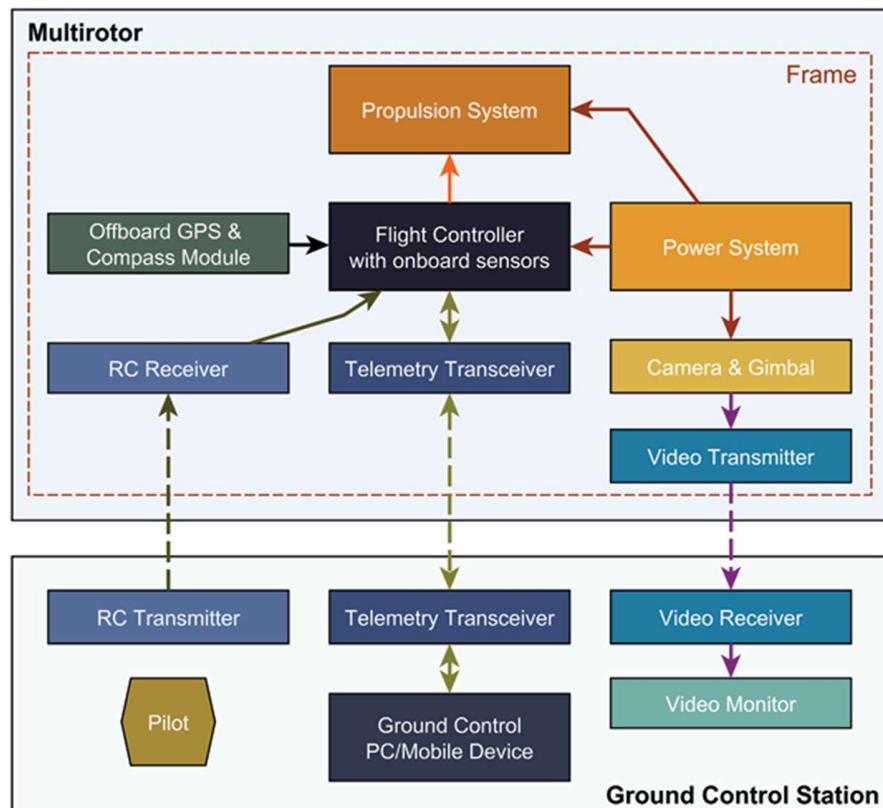


Abbildung 4 Blockschaltbild einer multi-rotor Drohne für Remote Sensing (**Torrico 2020**)

2.1 Hardware

Folgende Komponenten werden verwendet:

- > **Flight Controller:** Pixhawk 4 (oben links in Abbildung 5)
- > **Telemetry Transceiver:** Radio V3, 433 MHz (Holybro 2021b)
- > **GNSS and Compass Module:** Pixhawk 4 GPS Module (oben mittig in Abbildung 5)
- > **RC Receiver:** FrySky XM SBUS Empfänger, ohne Telemetrie (FrSky 2021b)
- > **RC Transmitter:** FrSky Taranis Q X7 (FrSky 2021a)
- > **Power System:** Power Management Board PM07 (oben rechts in Abbildung 5).
- > **Propulsion System:** Bestehende Motoren und Regler (offroad-CULT 2010)

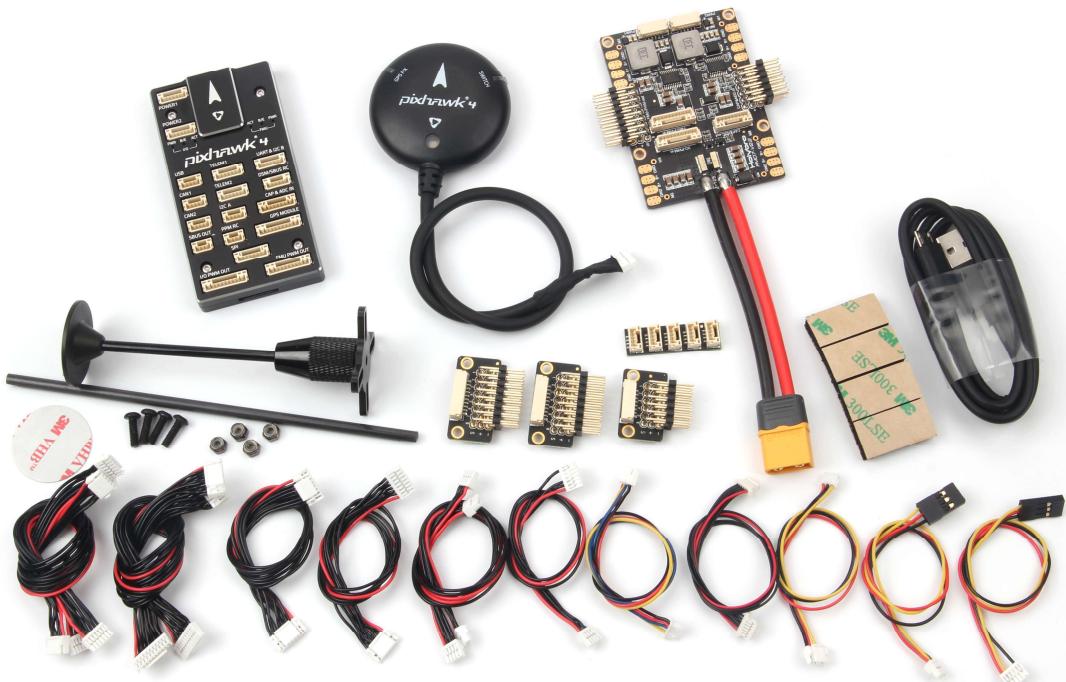


Abbildung 5 Foto des Autopiloten Pixhawk 4 und das passende Zubehör (**Holybro 2021a**)

Die Bedienung eines Autopilotensystems stellt erhöhte Anforderungen an die Fernsteuerung. Die Handhabung eines Autopilots erfordert das Umschalten zwischen verschiedener Funktionen, so genannte *Auxiliary Functions* wie (ArduPilot 2021b):

- > Manuell und Autopilot
- > Armed und Disarmed: Ein- und Ausschalten der Motoren.

Dafür werden zusätzliche Kanäle benötigt, welche die bestehende Fernsteuerung von HiTec nicht bietet. Zwar unterstützt der Autopilot das Kommunikationsprotokoll der bestehenden

Fernsteuerung, jedoch wäre das Mischen der Kanäle aufwendig. Aus diesen Gründen wurde die Fernsteuerung Taranis Q X7 als Alternative gewählt. Das kompatible Kommunikationsprotokoll (ACCST mit SBUS), die hohe Anzahl Kanäle und einfache Bedienung machen es zum geeigneten Produkt.



Abbildung 6 Fernsteuerung Taranis Q X7 (ACCST und SBUS) mit 16 Kanälen (**FrSky 2021a**).

Bei einem Neuerwerb dieser Fernsteuerung sind für die Kompatibilität folgende Punkte zentral:

- > Protokoll: 2.4 GHz, ACCST (nicht ACCESS)
- > Hardware Konfiguration: LBT oder EU (nicht FCC oder Non-EU)
- > Firmware: openTX, Version 2.3.9, 200617 (build 2020-08-11, vgl. Kapitel 3.1)
- > Kompatibler Empfänger: FrSky RX4R, RX6R, G-RX6, R-XSR, XMR oder XM
- > Modifikationen: keine

2.1.1 Schematischer Aufbau

Der schematische Aufbau gestaltet sich wie folgt:

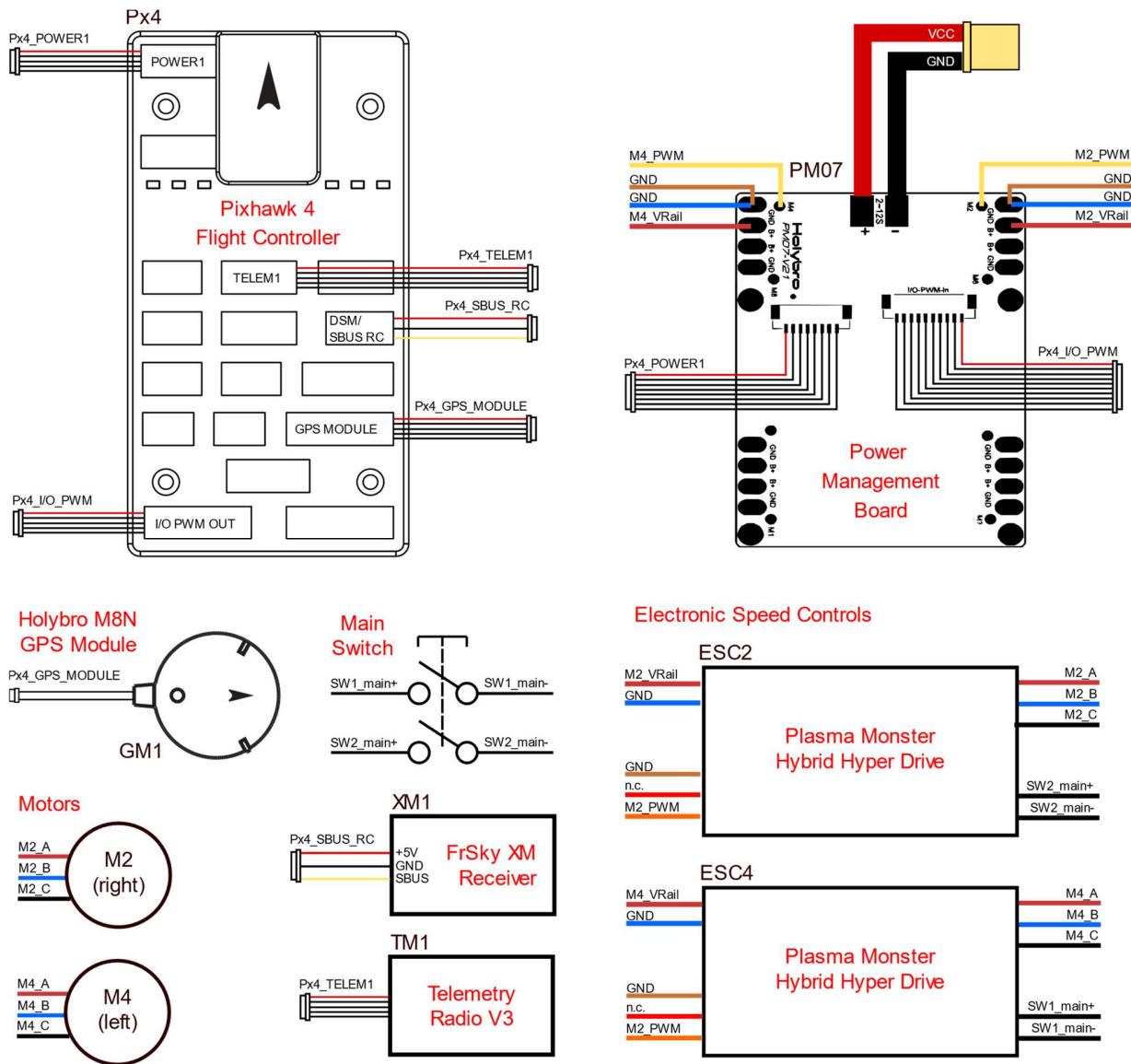


Abbildung 7 Schematischer Aufbau der Elektronik

2.1.2 Verkabelung und Anordnung

Für einen funktionierenden Autopiloten ist es zentral, dass der Flight Controller Px4 im Flächenschwerpunkt des Fahrzeugs (bzw. Boot) angebracht ist.

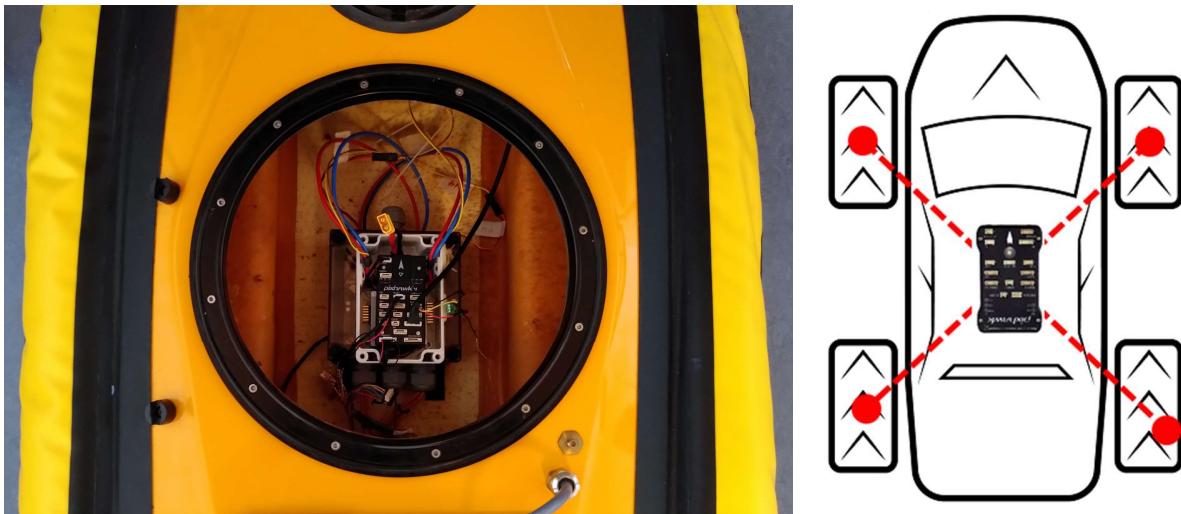


Abbildung 8 Anordnung des Flight Controllers im Flächenschwerpunkt analog zu einem Fahrzeug (**ArduPilot 2021g**).

Die Verkabelung wurde so umgesetzt, dass alle Einheiten (Motoren, Motorregler, Flight Controller und Power Board) einfach ausgesteckt werden können. Weiter sind die Gehäuse mit Klettböndern angebracht, sodass eine Demontage oder Deplatzierung unkompliziert möglich ist.

2.2 Software

Für die Inbetriebnahme, Konfiguration und Missionsplanung wird *Mission Planner* verwendet. Dieses Programm erlaubt direkten und unkomplizierten Zugriff auf alle Parameter, was die Konfiguration des Boots erheblich vereinfacht. Sobald der Flight Controller mit Computer (via USB oder Telemetrie) verbunden ist, kann unter dem Menu „Config | Full Parameter List“ auf jeden Parameter zugegriffen werden.

Die wichtigsten Funktionen der Benutzeroberfläche sind:

- > Parameter speichern: Speichert die Liste im lokalen Mission Planner
- > Parameter aktualisieren: Schreibt die lokale Parameterliste auf den Flight Controller
- > Datei speichern: Speichert das lokale Parametersatz in einer Datei ab.
- > Datei laden: ein Parametersatz wird in die Benutzeroberfläche geladen.

Veränderte Parameter erscheinen grün, sobald sie vom Ursprungswert abweichen. Zudem wird in einer separaten Spalte für jeden Parameter eine Hilfe angezeigt.

3 Inbetriebnahme

In im Kapitel Inbetriebnahme werden alle notwendigen Schritte beschrieben, welche einmalig ausgeführt werden müssen, um den Autopiloten in Betrieb zu nehmen.

3.1 Firmwareupdate der Hardwarekomponenten

Alle Hardwarekomponenten des Herstellers FrSky benötigen die korrekte Firmware, sodass diese untereinander kompatibel sind und zuverlässig kommunizieren. Für das vorliegende System wurde folgende Firmware verwendet:

Tabelle 1. Übersicht der verwendeten Firmware aller Hardwarekomponenten von FrSky.

| Beschreibung | Firmware Version | Build Datum | Protokoll | Link | Dateiname Binary |
|----------------------------|------------------|-------------|----------------|----------------------|-------------------------------|
| Fernsteuerung Taranis Q X7 | 2.3.9, 200617 | 2020-08-11 | ACCST D16, LBT | Link | firmware_x7_lbt_en_200617.bin |
| Internes Sendemodul XJT | 2.1.0 | 2020-03-24 | ACCST D16, LBT | Link | XJT_ACCST_2.1.0_LBT.frk |
| Empfänger XM | 2.1.2 | 2020-10-28 | ACCST D16, LBT | Link | XM_ACCST_2.1.2_LBT.frk |

Firmwareupdate vorbereiten

Die entsprechenden Dateien müssen auf die interne SD-Karte geladen werden, um das Update von der Fernsteuerung auszuführen. Dafür sind muss die Fernsteuerung in den Bootloader Modus gebracht werden:

1. Beide horizontale Trimmknöpfe gedrückt halten.
2. Hauptschalter der Fernsteuerung drücken, bis diese startet (vgl. Abbildung 9).
3. Es erscheint auf das Menu „Taranis Bootloader“.
4. USB-Mini Kabel mit der Fernsteuerung verbinden. Die Meldung „USB Connected“ erscheint.
5. Das USB-Kabel mit dem PC verbinden. Die SD-Karte sollte nun im Explorer erscheinen.
6. Die erwähnten Firmware Dateien in den Ordner „FIRMWARES“ kopieren (vgl. Tabelle 1).
7. USB-Kabel entfernen und Fernsteuerung ausschalten.

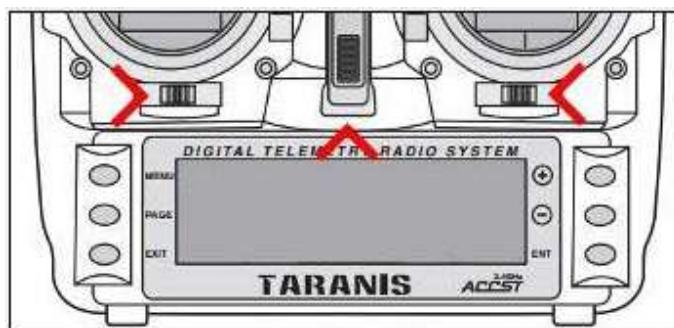


Abbildung 9 Trimmknöpfe und Hauptschalter gedrückt halten, um das Bootloader Menu zu starten (**Seidel 2015**).

Firmwareupdate Fernsteuerung

Um das Firmwareupdate für die Fernsteuerung Taranis Q X7 durchzuführen, sind folgende Schritte zu nötig:

1. Beide horizontale Trimmknöpfe gedrückt halten.
2. Hauptschalter der Fernsteuerung drücken, bis diese startet (vgl. Abbildung 9).
3. Es erscheint auf das Menu „Taranis Bootloader“.
4. Wähle mit [ENTER] (rechter Drehknopf) „Write Firmware“.
5. Navigiere mit dem Drehknopf bis zur Firmwaredatei „firmware_x7_lbt_en_200617.bin“.
6. Drücke ENTER.
7. Es erscheint „Hold [ENT] to start“. Halte [ENTER] gedrückt, um das Update zu starten.
8. Das Firmwareupdate wird durchgeführt. Starte anschliessend die Fernsteuerung neu.

Firmwareupdate Internes Sendemodul

Um das Firmwareupdate für das interne Sendemodul XJT durchzuführen, sind folgende Schritte zu nötig:

1. Starte die Fernsteuerung normal.
2. Halte den Knopf [MENU] 2 Sekunden gedrückt, bis das Menu „Radio Setup“ erscheint.
3. Navigiere mit dem Knopf [Page] bis zur Seite 2.
4. Navigiere mit dem Drehknopf in den Ordner „[FIRMWARE]“.
5. Wähle die Firmwaredatei „XJT_ACCST_2.1.0_LBT.frk“.
6. Halte [ENTER] solange gedrückt, bis ein Menu erscheint.
7. Wähle „Flash int. module“.
8. Der Vorgang „Writing“ flasht die Firmware.
9. Starte nach dem Vorgang die Fernsteuerung neu.



Abbildung 10 Menu der Taranis Q X7 bevor das interne Sendemodul geflasht wird (**Seidel 2015**).

Firmwareupdate Empfänger

Um das Firmwareupdate für die unterstützten Empfänger durchzuführen, sind folgende Schritte zu nötig:

1. Löte dem Empfänger gemäss Bedienungsanleitung drei Kabel an (FrSky 2021b). Hier wurden folgende Farben verwendet (vgl. Abbildung 13):
 - a. Grün: +5V
 - b. Blau: Ground
 - c. Gelb: Signal (SBUS)
2. Verbinde die Kabel mit der Rückseite der Fernsteuerung (vgl. Abbildung 11).
3. Starte die Fernsteuerung normal.
4. Halte den Knopf [MENU] 2 Sekunden gedrückt, bis das Menu „Radio Setup“ erscheint.
5. Navigiere mit dem Knopf [Page] bis zur Seite 2.
6. Navigiere mit dem Drehknopf in den Ordner „[FIRMWARE]“.
7. Wähle die Firmwaredatei „XM_ACCST_2.1.2_LBT.frk“.
8. Halte [ENTER] solange gedrückt, bis ein Menu erscheint.
9. Wähle „Flash ext. device“.
10. Der Vorgang „Writing“ flasht die Firmware.
11. Starte nach dem Vorgang die Fernsteuerung neu.



Abbildung 11 Rückseite der Fernsteuerung mit Verkabelung zum Empfänger für das Firmwareupdate (**Yanev 2019**).

Firmwareupdate Flight Controller

Der Flight Controller von PixHawk 4 wird vom Hersteller mit der Firmware PX4 (v1.9.0) ausgeliefert. Daher muss die Firmware von ArduPilot einmalig auf den Flight Controller geflasht werden. Hierfür müssen folgende Schritte befolgt werden (ArduPilot 2021e):

1. Verbinde den Flight Controller mit dem Computer (USB-Micro).
2. Starte Mission Planner auf dem Computer.
3. Wähle im Mission Planner (oben rechts) den entsprechenden COMport aus und setze die Baudrate auf 115200 (vgl. Abbildung 12). Wichtig: Drücke nicht „Connect“.
4. Wähle den Reiter „SETUP“ und das Untermenü „Install Firmware“.
5. Wähle den Rahmen „Rover 4.1.1 OFFICIAL“ (da Boote unter Fahrzeuge eingeteilt sind).
6. Bestätige den Dialog „Are you sure?“ und befolge mögliche weitere Anweisungen.
7. Starte den Flight Controller neu.

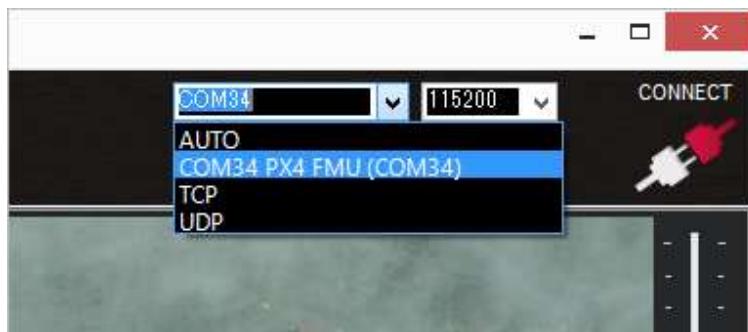


Abbildung 12 Auswahl von COMport und Baudrate im Mission Planner bevor die Firmware geflasht wird (ArduPilot 2021e).

3.2 Einrichten eines Modells

Der Hersteller der Funkkomponenten (FrSky) ermöglicht auf der Fernsteuerung mehrere Modelle zu speichern. Dies erlaubt eine individuelle Konfiguration je Modell sowie der schnelle Wechsel zwischen unterschiedlichen Modellen. Für das Boot muss dies einmalig eingerichtet werden:

1. Schalte die Fernsteuerung ein.
2. Bestätige alle Warnungen mit [ENTER].
3. Klicke [MENU]. Die Modellübersicht erscheint (MODELSEL).
4. Scrolle zu einem freien Slot und betätige [ENTER] bis ein Menü erscheint.
5. Wähle „Create model“.
6. Wähle „Multi“.
7. Klicke viermal [PAGE] ohne Änderungen vorzunehmen bis die Seite „Ready to go“ erscheint. Halte [ENTER] gedrückt, bis das Model gespeichert wurde.
8. Gib deinem Modell einen Namen und konfiguriere es nach Wunsch.

Innerhalb dieser Projektarbeit wurde das Modell «ADCP» verwendet.

3.3 Binden der Fernsteuerung

Das Koppeln von Sender und Empfänger, das sogenannte Binden, wird nach dem Einrichten des Modells einmalig vorgenommen. Das Vorgehen gestaltet sich wie folgt (Chen 2020):

1. Schalte die Fernsteuerung ein.
2. Bestätige alle Warnungen mit [ENTER].
3. Klicke [MENU]. Die Modellübersicht erscheint (MODELSEL).
4. Klicke [PAGE]. Das Setup erscheint.
5. Scrolle im Gegenuhrzeigersinn zum Menupunkt „Mode“. Kontrolliere, dass folgende Einstellungen korrekt eingerichtet sind:
 - a. Mode = XJT, D16
 - b. Ch.Range = CH1 – 16
 - c. Receiver = 00 (nicht relevant)
6. Halte den Bind-Knopf des Empfängers gedrückt (vgl. Abbildung 13). Schalte nun den Empfänger ein. Die rote sowie grüne LED sollte nun dauerhaft leuchten.
7. Wähle nun bei der Fernsteuerung [Bnd] und „Ch1-8 Telem OFF“.
8. Die Fernsteuerung sendet einen lauten Ton aus. Der Empfänger wird gesucht.
9. Bei erfolgreicher Kopplung erlischt das rote LED beim Empfänger. Klicke nun [ENTER] an der Fernsteuerung und anschliessend [EXIT].
10. Starte nun Sender sowie Fernsteuerung neu.
11. Solange die Fernsteuerung eingeschaltet ist, muss die LED vom Empfänger grün leuchten. Bei fehlendem Signal blinkt der Empfänger rot.

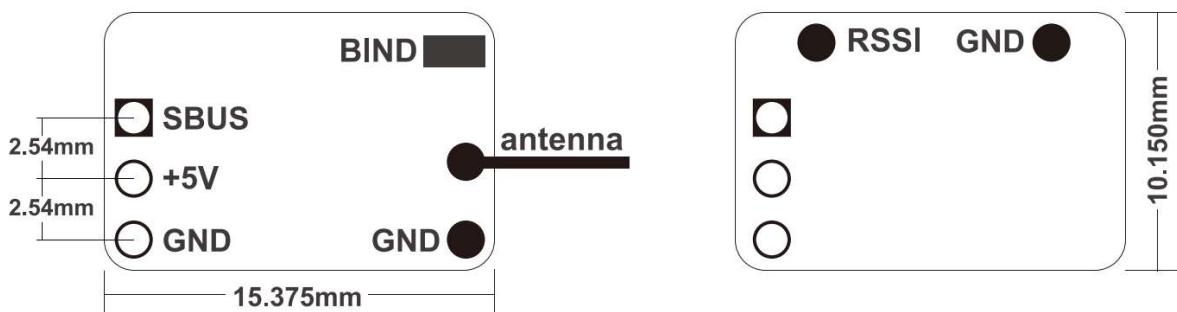


Abbildung 13 Pinbelegung des Empfängers FrSky XM. Rechts oben befindet sich der Bind-Knopf (FrSky 2019)

3.4 Konfiguration der Fernsteuerung

Bei Inbetriebnahme der Fernsteuerung müssen die Joysticks einmalig kalibriert werden. Hierfür sind folgende Schritte zu befolgen:

1. Schalte die Fernsteuerung ein.
2. Bestätige alle Warnungen mit [ENTER].
3. Wähle das Modell ADCP. Halte anschliessend [MENU] lange gedrückt. Das Menu „Tools“ erscheint.
4. Navigiere mit [PAGE] zur Seite „RADIO SETUP“ und stelle folgendes ein:
 - a. GPS Coords = DMS
 - b. Country code = EU
 - c. Units = Metric
 - d. Mode = 2
5. Navigiere mit [PAGE] weiter zu „HARDWARE“.
6. Stelle sicher, dass alle Trimmer in neutraler Stellung sind. Wähle [Calibration] und [ENTER] um die Kalibration zu starten.
7. Bewege nun alle Sticks in die äusseren Anschläge.
8. Beende die Kalibration mit [ENTER].

Im Setup des Modells wird die Belegung sowie alle Mischverhältnisse der Kanäle festgelegt. Im gewöhnlichen Modellbau werden diese Mischer auf der Fernsteuerung eingestellt. Da es sich im vorliegenden Fall ein übergeordnetes System auf dieselben Aktoren zugreift (Autopilot), wird die Mischfunktionalität vom Flight Controller übernommen. Auf der Fernsteuerung werden lediglich die Kanäle zugewiesen (ArduPilot 2021i). Zentral ist dabei, dass diese gemäss Herstellerangaben konfiguriert sind (vgl. Tabelle 2). Weiter ist bei Booten empfohlen, dass für die Belegung der Joysticks „Mode 2“ verwendet wird (vgl. Abbildung 14, ArduPilot 2021d).

Tabelle 2. Übersicht der verwendeten Kanäle und der zugewiesenen Funktion.

| Kanal | Interne Bezeichnung | Input | Zugewiesene Funktion |
|-------|---------------------|-------|--|
| CH1 | Roll | Thr | Links/Rechts steuern (Motor 1 und Motor 2 entgegengesetzt ansteuern) |
| CH2 | Pitch | Ail | Nicht verwendet |
| CH3 | Throttle | Ele | Gas (Motor 1 und Motor 2 simultan ansteuern) |
| CH4 | Yaw | Rud | Nicht verwendet |
| CH7 | arm | SF | Aktoren des Autopilotensystems scharf schalten. |
| CH8 | mode | SD | Wechsel zwischen den Modi „Manual“, „Auto“ und „Acro“ |
| CH9 | learn | SA | Lernfunktion für Autopilot, um Cruise Geschwindigkeit zu lernen. |

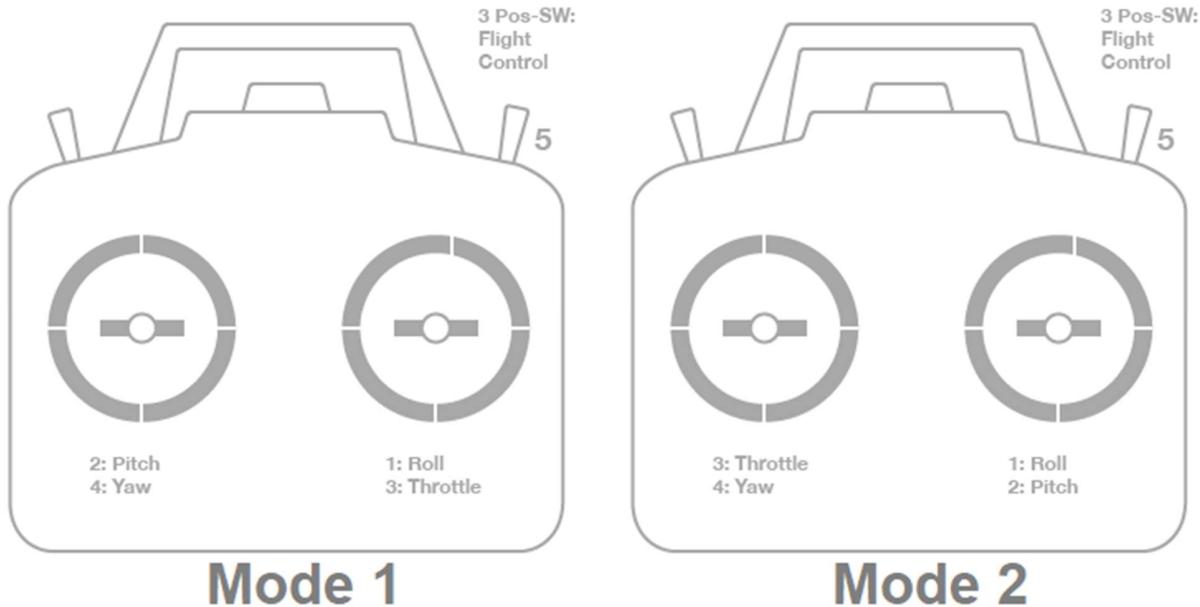


Abbildung 14 Gegenüberstellung zweier gängigen Konfigurationen bei Fernsteuerungen (ArduPilot 2021i)

Nachdem die Kanäle zugewiesen sind, muss die Kalibration auf dem Flight Controller vorgenommen werden. So werden die Endanschläge festgelegt die Stufen einzelner Schalter abgefragt. Hierfür ist folgende Prozedur vorgesehen:

1. Schliesse das USB-Kabel zwischen PC und Flight Controller an.
2. Starte Mission Planner und verbinde dich mit dem Flight Controller.
3. Navigiere zum Menu “INITIAL SETUP | Mandatory Hardware | Radio Calibration”.
4. Wähle “Calibrate Radio” und befolge die Anweisungen.
5. Die PWM-Signale der einzelnen Kanäle sollten sich analog zum Ausschlag des Joysticks bewegen (vgl. Abbildung 15).
6. Wichtig: Beim letzten Schritt (Neutralstellung aller Sticks) muss Throttle nicht nach unten, sondern mittig positioniert werden. Dies ist zentral, dass die Motoren auch rückwärts betrieben werden können.



Abbildung 15 Kalibration der Joysticks. Rot abgebildet sind die erfassten Endanschläge (ArduPilot 2021i).

Nach der erfolgreichen Konfiguration müssen die einzelnen Kanäle ihrer Funktion zugewiesen werden. Eine zentrale Funktion übernimmt Kanal 8. Mit diesem dreistufigen Schalter kann zwischen den einzelnen Flight Modes gewechselt werden. Dies ermöglicht beispielsweise den Autopiloten zu übersteuern und manuell zu betreiben. Hierfür muss im Menu „Initial Setup | Mandatory Hardware | Flight Modes“ folgende Modi zugewiesen werden (ArduPilot 2021j):

- > Flight Mode 1 = *Manual* (Der Pilot übernimmt die Kontrolle)
- > Flight Mode 4 = *Auto* (Der Autopilot steuert das Boot)
- > Flight Mode 6 = *Acro*

Eine wichtige Funktion übernimmt Kanal 7. Mit der Funktion *arm/disarm* werden die Aktoren scharf geschaltet. Dieser Schalter muss also eingeschaltet sein, sodass die Motoren Steuersignale erhält. Hierfür muss der Parameter *RC7_OPTION* = 41 gesetzt werden (ArduPilot 2021b).

Eine weitere *auxiliary Function* übernimmt Kanal 9. Dieser Schalter dient dazu, um den *Cruise Speed* für den Autopiloten zu setzen. Der gesetzte Cruise Speed wird während der autonomen Fahrt vom Autopilotensystem angestrebt. Hierfür muss der Parameter *RC9_OPTION* = 50 gesetzt werden (ArduPilot 2021b).

3.5 Konfiguration des Boots

Dieses Unterkapitel befasst sich detailliert mit der individuellen Konfiguration des Boots. Für das bessere Verständnis der einzelnen Parameter sind Kenntnisse über den Aufbau der Firmware zentral. Die wichtigsten Funktionen sind (vgl. Abbildung 16, (ArduPilot 2021k).

- > **Eingänge (RCMAP_x & RCx_FUNCTION):** Eingaben können durch die Fernsteuerung oder via MAVLink Kommunikation (PC) erfolgen. Die Eingaben der Joysticks (Roll, Pitch, Yaw und Throttle) werden durch Parameter mit dem Präfix *RCMAP_x* gesteuert, Schalter durch den Präfix *RCx_FUNCTION* (ArduPilot 2021k).
- > **Interne Spezialfunktionen (RCx_Option):** Modellabhängige Spezialfunktionen werden mit dem Präfix *RCx_OPTION* zugewiesen. Im vorliegenden Fall sind dies die Funktionen „arm/disarm“, „flight mode“ und „Learn Cruise“.
- > **Ausgänge (SERVOx_FUNCTION):** Ausgänge werden über Parameter mit dem Präfix *SERVOx_FUNCTION* gehandhabt. Mögliche Ausgänge sind Motoren, Servos oder Relais, im vorliegenden Fall werden nur Motoren benutzt.

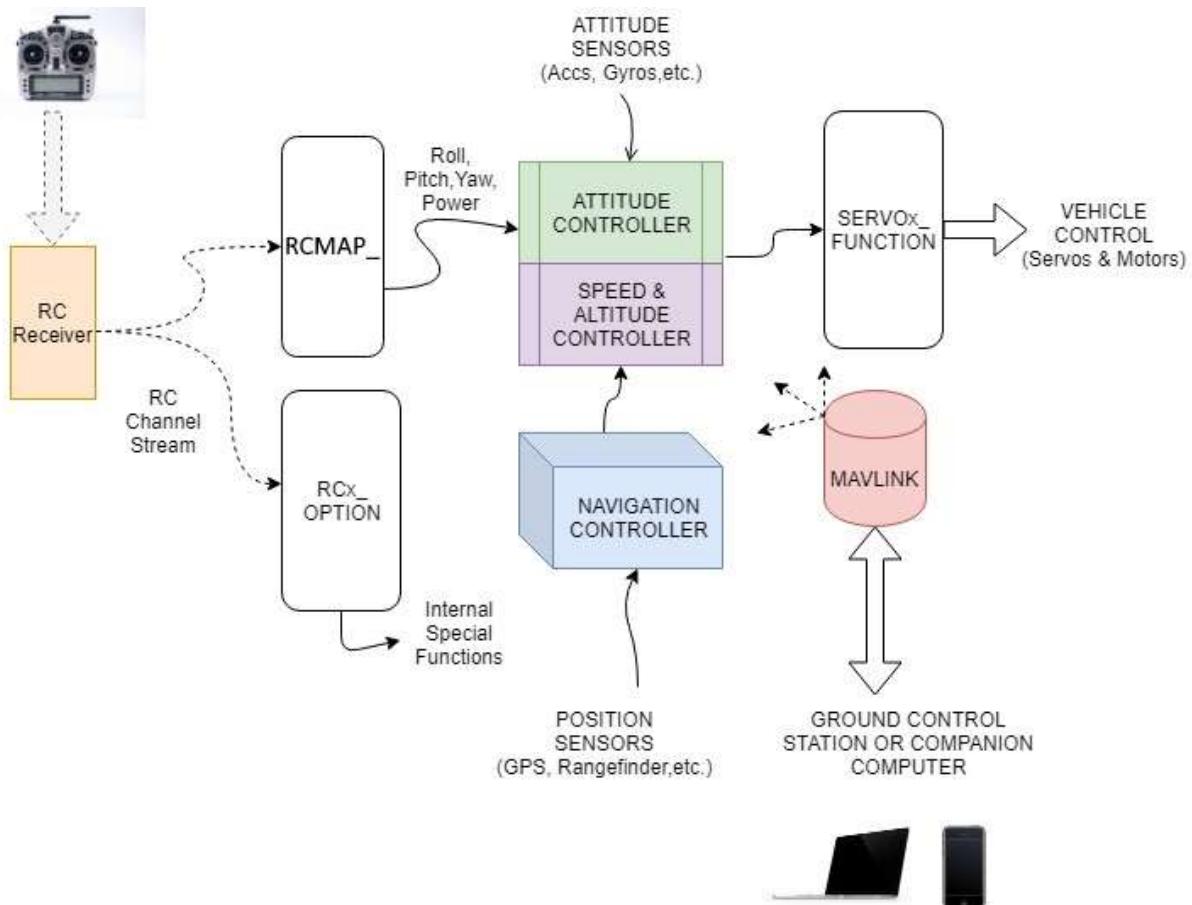


Abbildung 16 Vereinfachte Übersicht der Firmware und deren zentralen Funktionen (ArduPilot 2021k).

Rahmentyp und Fahrverhalten

Ein zentraler Vorteil von ArduPilot ist die breite Unterstützung von Drohnentypen wie beispielsweise Helikopter, Flugzeuge, Fahrzeuge, Boote (und unzählige weitere). Die Festlegung des Typs, aller Aktoren, deren Ausrichtung und Interaktionsmöglichkeiten wird mit folgenden Parameter festgelegt (ArduPilot 2021d):

- > **Rahmentyp (FRAME_TYPE & FRAME_CLASS):** Mit `FRAME_CLASS = 2` und `FRAME_TYPE = 0` wird das System als Boot definiert.
- > **Fahrverhalten (SERVO2_FUNCTION und SERVO4_FUNCTION):** `SERVO2_FUNCTION = 73` (Throttle Left) definiert den Ausgang 1 als linker Strahl, `SERVO4_FUNCTION = 74` (Throttle Right) als rechter Strahl des Boots. Die Throttle-Funktionen definieren den Rahmen als zweistrahliges Boot ohne Ruder, was terrestrisch einem Raupenfahrzeug gleicht.

Pre-Arm Checks

Bevor die Aktoren mit Kanal 7 (CH7, vgl. Tabelle 2) scharf geschalten werden, führt die Firmware sogenannte *Pre-Arm Checks* durch, um mögliche Fehlfunktionen zu vermeiden. Diese Pre-Arm Checks prüfen das System umfassend und sind per Default konservativ eingestellt. Führt ein Pre-Arm Check zu einem Fehler, wird die Firmware das Scharfschalten der Aktoren verhindern. Die einzelnen Checks können deaktiviert werden, jedoch mit dem Risiko wahre Fehler zu ignorieren. (ArduPilot 2021h)

Die Inbetriebnahme zeigte, dass die Pre-Arm Checks *Airspeed* und *RC Channels* zu konservativ eingestellt waren das Scharfschalten konsequent verhinderten. Mit `ARMING_CHECK = 1047998` wurden diese Checks deaktiviert (Bit-maskierter Parameter).

Weitere Parameter

Folgende Parameter wurden zusätzlich eingestellt:

- > **MOT_PWM_TYPE:** Es werden Motoren verwendet, welche keine spezielle Konfiguration benötigen. Daher ist `MOT_PWM_TYPE = 0`.
- > **MOT_THR_MIN:** Für eine ideale Ansteuerung der Motoren muss ermittelt werden, ab welchem Level die Motoren zu drehen beginnen. Mit einer vorgegebenen Prozedur wird die sog. tote Zone der Motoren ermittelt (ArduPilot 2021f). Hierfür wurde `MOT_THR_MIN = 12` ermittelt.
- > **BRD_SAFETYENABLE:** Weder Boot noch Fernsteuerung sind mit einem weiteren Not-Aus Schalter versehen. Daher wird dieser mit `BRD_SAFETYENABLE = 0` ausgeschaltet.

Für alle verbleibenden Parameter wurden die Defaultwerte verwendet. Die funktionierende Parameterliste findet man im Repository unter `src/Parameter_list`.

3.6 Kalibration der Sensoren

Die verwendete Hardware (GNSS Modul und Flight Controller) verfügen über folgende Sensoren:

- > Interne Beschleunigungssensoren ICM-20689 und BMI055 (Pixhawk 2021)
- > Externer Beschleunigungssensor Ublox Neo-M8N
- > Interner sowie externer Kompass IST8310

Wobei das GNSS Modul eine horizontale Genauigkeit von 2.5m aufweist (ublox 2021). Diese Sensoren müssen einmalig und anhand einer definierten Prozedur kalibriert werden (ArduPilot 2021c, 2021a). Da die Qualität der Kalibration von der Anzahl verfügbaren Satelliten abhängt, wurde diese im Freien durchgeführt (Abbildung 17).



Abbildung 17 Kalibration von Beschleunigungssensoren und Kompass.

3.7 Telemetrie

Mit Telemetrie wird während der Operation eine Verbindung zwischen dem Ground Control PC und dem Boot hergestellt (vgl. Abbildung 4). Über zwei Telemetriemodule werden Daten wie Position, Geschwindigkeit und Operationsstatus übertragen. Für einen autonomen Betrieb ist die Verbindung nicht zwingend nötig. Im vorliegenden Projekt wurden die Telemetriemodule *Telemetry Radio V3* verwendet, da diese vom Flightcontroller unterstützt werden (Holybro 2021b). Für

den bestmöglichen Empfang wurde die Antenne ausserhalb der Bootshülle angebracht (vgl. Abbildung 17). Die Inbetriebnahme zeigte, dass die Verbindung mit dem Computer nicht automatisch etabliert wird. Hierfür wird ein zusätzlicher Treiber benötigt, welcher im Repository unter `src\telemetry_radio_v3_win_driver` abgelegt ist. Weiter hilft die Statusanzeige der LEDs bei der Inbetriebnahme erheblich (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3. LED-Statusanzeige des Telemetriemoduls (**Holybro 2018**).

| LED Farbe | Intervall | Zugewiesene Funktion |
|-----------|-----------|--|
| Grün | blinkt | Sucht anderes Telemetriemodul |
| Grün | dauerhaft | Verbindung mit anderem Telemetriemodul ist etabliert |
| Rot | blinkt | Daten werden transferiert |
| Rot | dauerhaft | Firmwareupdate wird durchgeführt |

3.8 Manuelle Probefahrt

Nachdem alle vorbereitenden Schritte der Inbetriebnahme unternommen wurden, konnte das System am 27.11.2021 auf dem Sarnersee getestet werden. Alle Funktionen für einen manuellen Betrieb konnten dabei erfolgreich getestet werden. Es war erfreulich zu sehen, dass das Fahrverhalten mit einer komplett neuen Elektronik richtig konfiguriert war und sich intuitiv steuern liess.



Abbildung 18 Erfolgreiche Probefahrt auf dem Sarnersee mit glücklichem Operator.

3.9 Tuning der Regelparameter

Nach der erfolgreichen Prüfung aller manuellen Funktionen kann der Autopilotmodus in Betrieb genommen werden. Da es sich dabei um ein komplexes Regelungssystem handelt, befasst sich dieser Teil vorwiegend mit der Parametrisierung der Regelparameter (auch Tuning genannt). Folgende Regelparameter müssen in weiteren Fahrten eingestellt werden (ArduPilot 2021I):

- > **Initiales Gas und Zielgeschwindigkeit:** Die Parameter *CRUISE_SPEED* und *CRUISE_THROTTLE* definieren das Zielverhalten während einer Fahrt im Autopilotmodus. *CRUISE_SPEED* definiert die angestrebte Zielgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde, *CRUISE_THROTTLE* gibt das initiale Gas-Level an, wenn in den Autopilotmodus gewechselt wird.
- > Für eine funktionierende Steuerung im Autopilotmodus muss der **Turn Rate Controller** konfiguriert werden. Hierfür wird zuerst die Wendegeschwindigkeit (*ACRO_TURN_RATE*) in Grad pro Sekunde ermittelt. Dieser Parameter wird anschliessend im Modus Acro kontrolliert und allenfalls angepasst. Weiter kann das Wendeverhalten mit dem Parameter *ATC_STR_RAT_MAX* optimiert werden.
- > Für zweistrahlige Boote können Wendemanöver an Ort und Stelle konfiguriert werden, sogenannte **Pivot Turns**. *WP_PIVOT_ANGLE* definiert die Abweichung in Grad, welche ein Pivot Turn triggert. *WP_PIVOT_RATE* gibt an wie schnell sich das Boot an Ort und Stelle wendet. Mit *ATC_STR_ANG_P* kann der Proportionalanteil des Reglers eingestellt werden.

Während der Konfiguration der genannten Parameter wurde eine Fehlfunktion des Bootes festgestellt. Das Boot konnte unter erschwerten Steuerbedingungen gelandet werden. Die anschliessende Untersuchung der Elektronik zeigte, dass einer der Motoren ausgefallen ist. Dieser Ausfall ist ohne Einwirkung äusserer Faktoren aufgetreten. Weiter weist der Motor keine erkennbaren mechanischen Schäden auf, sodass der Ausfall entweder altersbedingt oder durch Wassereintritt verursacht wurde.

3.10 Fehleranalyse

Eine eingehende Untersuchung des Fehlers zeigte, dass der Ausfall durch Wassereintritt verursacht wurde. Am demontierten Gehäuse ist die Eintrittsstelle gut erkennbar (vgl. Abbildung 19). Dabei muss einer der eingebauten Dichtringe die dichtende Funktion verloren haben.



Abbildung 19 Fehleranalyse des defekten Motors. An Gehäuse und Motor sind die Spuren des Wassereintritts gut erkennbar. Ein undichter Dichtring wird den Wassereintritt verursacht haben.

4 Handlungsoptionen einer Reparatur

Um das Boot in einen funktionierenden Zustand zu bringen ergeben sich folgende Optionen:

- > **Option A – Ersatz des Motors durch den Hersteller:** Das Boot wird an den Hersteller (datapcs) oder einen Wiederverkäufer gesendet. Dieser ersetzt den Motor fachgerecht.
- > **Option B – Ersatz des Motors mit einem baugleichen Substitut:** Der defekte Motor wird durch ein baugleiches Substitut eigenhändig ersetzt. Hierfür muss ein Motor mit den identischen Dimensionen gefunden werden, sodass das bestehende Gehäuse passt und die Wasserdichtheit gewährleistet ist.
- > **Option C – Verwendung eines alternativen Motors:** Es wird ein alternativer Motor evaluiert und verwendet. Als Folge davon muss auch das Gehäuse neu gezeichnet und gefertigt werden.
- > **Option D – Neugestaltung der Antriebe:** Anstatt die Motoren dem Wasser direkt auszusetzen (aktuelle Situation) wird das Antriebskonzept neu gedacht.

Die Optionen sind nach Aufwand aufgelistet. Leider wurde die einfachste Option (A) früh verworfen, da weder Hersteller noch Wiederverkäufer auf Reparaturanfragen antworten. Weiter zeige eine viertiefste Internetrecherche, dass ein Substitut in den Dimensionen 45 x 77 mm (Durchmesser x Länge) nicht in nützlicher Frist erhältlich ist. Dies deckt sich auch mit der Feststellung, dass am defekten Motor keine näheren Herstellerangaben vorhanden sind. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser Motor eine Eigenentwicklung des Herstellers ist und somit nicht den gängigen Formfaktoren eines Brushless Motors entspricht.

Für eine technisch fundierte Empfehlung wurden Experten aus dem Bereich Modellbau kontaktiert. Alle angefragten Experten empfehlen eine Neugestaltung der Antriebe (Option D), da mit dem bestehenden Antriebskonzept (Optionen A bis C) keine nachhaltige Wasserdichtheit gewährleistet ist. Motoren direkt im Wasser zu platzieren und mit zwei Dichtringen vor Wassereintritt zu schützen entspricht nicht den etablierten Techniken des Modellbaus. Aus diesen Gründen wird Option D für die Reparatur empfohlen.

5 Ausblick

Eine Neugestaltung des Antriebskonzepts kann mit den bestehenden mechanischen Anschlüssen bewerkstelligt werden. Zudem kann die bestehende Elektronik ohne Anpassung weiterverwendet werden. Für ein neues Antriebskonzept bedarf es folgende Schritte:

1. Technische Spezifikation der bestehenden Motoren
2. Evaluation neuer Motoren
3. Auswahl gängiger Modellbaukomponenten
4. Entwurf und Konzeption eines Adapters für eine flexible Welle.
5. Fertigung des Adapters
6. Montage und Testing

Dabei werden die Kosten auf rund 1000 bis 1500 CHF geschätzt. Da die Umsetzung der Neugestaltung der Zeitrahmen des PWRU2 sprengt, wird diese Arbeit von externen Fachpersonen umgesetzt. Hierfür hat sich das Ausbildungszentrum Oberland bereit erklärt dies im Rahmen einer Auftragsarbeit umzusetzen. Das Ausbildungszentrum Oberland ist eine Ausbildungsstätte für technische Berufe und bietet ihren Lernenden die Möglichkeit sich im Rahmen dieser Arbeiten weiterzuentwickeln. (azo Ausbildungszentrum Oberland 2022)

Dieses Angebot stellt eine vernünftige Perspektive für die vorliegende Situation dar. Der Reparaturfall des brauchbaren (und fertig umgebauten) Boots kann ausserhalb der Projektarbeit weitergeführt werden. Zudem profitiert die ZHAW von einer preiswerten Reparatur und ein Lernender des Ausbildungszentrum Oberland von einem spannenden Projekt.

Literaturverzeichnis

ArduPilot. 2021a. „Accelerometer Calibration — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-accelerometer-calibration.html>).

ArduPilot. 2021b. „Auxiliary Functions — Rover documentation“. Abgerufen 26. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-auxiliary-functions.html#common-auxiliary-functions>).

ArduPilot. 2021c. „Compass Calibration — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-compass-calibration-in-mission-planner.html>).

ArduPilot. 2021d. „Complete Parameter List — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/parameters-Rover-stable-V4.0.0.html?>).

ArduPilot. 2021e. „Loading Firmware — Rover documentation“. Abgerufen 26. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-loading-firmware-onto-pixhawk.html>).

ArduPilot. 2021f. „Motor and Servo Configuration — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/rover-motor-and-servo-configuration.html>).

ArduPilot. 2021g. „Mounting the Autopilot — Rover documentation“. Abgerufen 26. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-mounting-the-flight-controller.html>).

ArduPilot. 2021h. „Pre-Arm Safety Checks — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-prearm-safety-checks.html>).

ArduPilot. 2021i. „Radio Control Calibration — Rover documentation“. Abgerufen 29. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-radio-control-calibration.html>).

ArduPilot. 2021j. „RC Transmitter Flight Mode Configuration — Rover documentation“. Abgerufen 29. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-rc-transmitter-flight-mode-configuration.html>).

ArduPilot. 2021k. „Simple Overview of ArduPilot Operation — Rover documentation“. Abgerufen 29. November 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-basic-operation.html>).

ArduPilot. 2021l. „Tuning Process Instructions — Rover documentation“. Abgerufen 20. Dezember 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/rover-tuning-process.html>).

az Ausbildungszentrum Oberland. 2022. „Auftragsarbeiten“. *Auftragsarbeiten*. Abgerufen 15. Januar 2022 (<https://www.azw.info/verein/fuer-firmen/auftragsarbeiten>).

Carboneau, Patrice, Hervé Piégay, Lejot Jérôme, Robert Dunford, und Kristell Michel. 2012. „Fluvial Remote Sensing for Science and Management“. S. 163–91 in.

Chen, Tina. 2020. „FRSKY XM PLUS BINDING.“ Abgerufen 29. November 2021 (<https://www.horusrc.com/en/blog/frsky-xm-plus-binding/>).

FrSky. 2019. *Instruction Manual for FrSky XM. Version 190628*.

FrSky. 2021a. „Taranis Q X7 - FrSky - Lets you set the limits“. Abgerufen 25. November 2021 (<https://www.frsky-rc.com/product/taranis-q-x7-2/>).

FrSky. 2021b. „XM“. *FrSky - Lets You Set the Limits*. Abgerufen 25. November 2021 (<https://www.frsky-rc.com/product/xm-1g-sbus-non-telemetry/>).

Gartner, Jeffrey. 2004. „Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California“. *Marine Geology* 211:169–87. doi: 10.1016/j.margeo.2004.07.001.

Guerrero, Massimo, Nils Rüther, und Ricardo Szupiany. 2012. „Laboratory validation of acoustic Doppler current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations“. *Flow Measurement and Instrumentation* 23:40–48. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2011.10.003.

Holliday, C., Todd Rasmussen, und William Miller. 2003. „Establishing the relationship between turbidity and total suspended sediment concentration“.

Holybro. 2018. „Transceiver Telemetry Radio V3. Quick Start Guide.“ Abgerufen 15. Juni 2021.

Holybro. 2021a. „Pixhawk 4“. Abgerufen 14. Juni 2021 (https://shop.holybro.com/pixhawk-4_p1089.html?).

Holybro. 2021b. „Transceiver Telemetry Radio V3“. Abgerufen 15. Juni 2021 (https://shop.holybro.com/transceiver-telemetry-radio-v3_p1103.html).

Jordan, Frédéric, und Philippe Heller. 2017. *Crue artificielle petite Sarine. 14-15 Septembre 2016. Synthèse*. Mont-sur-Lausanne: Hydrique Ingénieurs s.à.r.l.

- Latosinski, Francisco, Ricardo Szupiany, Carlos García, Massimo Guerrero, und M. Amsler. 2014. „Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology“. *Journal of Hydraulic Engineering* 140.
- Mueller, David, und C. R. Wagner. 2013. „Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat“. *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from A Moving Boat*.
- offroad-CULT. 2010. „- Quark Plasma Monster Hybrid 180A Regler / Details,.... - offroad-CULT“. Abgerufen 26. November 2021 (<http://www.offroad-cult.org/Board/quark-plasma-monster-hybrid-180a-regler-details-t20608.html>).
- Pixhawk. 2021. „Holybro Pixhawk 4 · PX4 v1.9.0 User Guide“. Abgerufen 8. Juni 2021 (https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html).
- Rivas-Casado, M., Rocio Ballesteros, Thomas Kriechbaumer, und Amanda Veal. 2015. „Automated Identification of River Hydromorphological Features Using UAV High Resolution Aerial Imagery“. *Sensors* 15:27969–89. doi: 10.3390/s151127969.
- Roth, Danica, Emily Brodsky, Noah Finnegan, Dieter Rickenmann, Jens Turowski, und Alexandre Badoux. 2016. „Bedload sediment transport inferred from seismic signals near a river“. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121:n/a-n/a. doi: 10.1002/2015JF003782.
- Seidel, Philipp. 2015. „FrSKY Taranis X9/QX7/S - internes XJT Modul flashen“. *Phils FPV Blog*. Abgerufen 26. November 2021 (<https://blog.seidel-philipp.de/frsky-taranis-x9d-plus-internes-xjt-modul-flashen/>).
- Torrico, Raul Alvarez. 2020. „Intro to Ardupilot and PX4 (Part 1)“. Abgerufen 15. Juni 2021 (<https://circuitcellar.com/cc-blog/intro-to-ardupilot-and-px4-part-1/>).
- ublox. 2021. *NEO-M8. u-blox M8 concurrent GNSS modules. Data sheet*. UBX-15031086.
- Vetsch, D., Siviglia A., Bürgler M., Caponi F., Ehrbar D., Facchini M., Faeh R., Farshi D., Gerber M., Gerke E., Kammerer S., Koch A., Mueller R., Peter S., Rousselot P., Vanzo D., Veprek R., Volz C., Vonwiller L., und Weberndorfer M. 2020. *System Manuals of BASEMENT, Version 2.8.1 Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW)*. Zürich: ETH Zurich.

WSL, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 2021. „Surrogate bedload transport measurements with the Swiss plate geophone system - Projekte - WSL“. *Surrogate bedload transport measurements with the Swiss plate geophone system*. Abgerufen 24. Mai 2021 (<https://www.wsl.ch/de/projekte/the-swiss-plate-geophone-system.html>).

Yanev, Georgi. 2019. „How to Flash XM+ and Setup RSSI | Georgi Yanev“. Abgerufen 26. November 2021 (<https://blog.georgi-yanev.com/fpv/flash-xm-plus-and-setup-rssi/>).

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1. Übersicht der verwendeten Firmware aller Hardwarekomponenten von FrSky | 12 |
| Tabelle 2. Übersicht der verwendeten Kanäle und der zugewiesenen Funktion. | 17 |
| Tabelle 3. LED-Statusanzeige des Telemetriemoduls (Holybro 2018). | 23 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1. Funktionsweise eines ADCP, welcher auf einem Boot montiert ist (Mueller und Wagner 2013). | 3 |
| Abbildung 2. Der River Robot R2V2 im Einsatz, hier ausgerüstet mit dem ADCP M9 von Sontek (© ZHAW, Forschungsgruppe Ökohydrologie) | 4 |
| Abbildung 3. Vertikale Diskretisierung der simulierten Zellen, geändert nach Vetsch u. a. (2020)5 | |
| Abbildung 4 Blockschaltbild einer multi-rotor Drohne für Remote Sensing (Torrico 2020) | 7 |
| Abbildung 5 Foto des Autopiloten Pixhawk 4 und das passende Zubehör (Holybro 2021a)..... | 8 |
| Abbildung 6 Fernsteuerung Taranis Q X7 (ACCST und SBUS) mit 16 Kanälen (FrSky 2021a)...9 | |
| Abbildung 7 Schematischer Aufbau der Elektronik | 10 |
| Abbildung 8 Anordnung des Flight Controllers im Flächenschwerpunkt analog zu einem Fahrzeug (ArduPilot 2021g). | 11 |
| Abbildung 9 Trimmknöpfe und Hauptschalter gedrückt halten, um das Bootloader Menu zu starten (Seidel 2015). | 12 |
| Abbildung 10 Menu der Taranis Q X7 bevor das interne Sendemodul geflasht wird (Seidel 2015). | 13 |
| Abbildung 11 Rückseite der Fernsteuerung mit Verkabelung zum Empfänger für das Firmwareupdate (Yanev 2019). | 14 |
| Abbildung 12 Auswahl von COMport und Baudrate im Mission Planner bevor die Firmware geflasht wird (ArduPilot 2021e)..... | 15 |
| Abbildung 13 Pinbelegung des Empfängers FrSky XM. Rechts oben befindet sich der Bind-Knopf (FrSky 2019) | 16 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 14 Gegenüberstellung zweier gängigen Konfigurationen bei Fernsteuerungen (ArduPilot 2021i)..... | 18 |
| Abbildung 15 Kalibration der Joysticks. Rot abgebildet sind die erfassten Endanschläge (ArduPilot 2021i)..... | 19 |
| Abbildung 16 Vereinfachte Übersicht der Firmware und deren zentralen Funktionen (ArduPilot 2021k)..... | 20 |
| Abbildung 17 Kalibration von Beschleunigungssensoren und Kompass. | 22 |
| Abbildung 18 Erfolgreiche Probefahrt auf dem Sarnersee mit glücklichem Operator. | 23 |
| Abbildung 19 Fehleranalyse des defekten Motors. An Gehäuse und Motor sind die Spuren des Wassereintritts gut erkennbar. Ein undichter Dichtring wird den Wassereintritt verursacht haben. | |
| | 25 |

Anhang