

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
LIFE SCIENCES AND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN IUNR

Kopplung eines Acoustic Doppler current profiler mit einer Trübungssonde



Projektarbeit PWRU1 von Yves Gubelmann

Master Umwelt und Natürliche Ressourcen

Forschungsgruppe Ökohydrologie

Abgabedatum: 4. Juli 2021

Fachkorrektoren:

Prof. Dr. Döring Michael

Forschungsgruppe Ökohydrologie, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Dr. Antonetti Manuel

Forschungsgruppe Ökohydrologie, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

1	Einleitung	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Hintergrund	4
1.3	Projektantrag.....	6
1.4	Projektziele.....	6
2	Kopplung von ADCP und Trübungssonde	7
2.1	Trübungssonde.....	7
2.2	Probenahme-Design	8
2.3	Speisung.....	12
2.4	Datenerfassung.....	14
3	GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung.....	15
3.1	Technische Einordnung des Systems.....	16
3.2	Geeignete Autopilotsysteme.....	18
3.3	Nutzwertanalyse ausgewählter Systeme.....	19
3.4	Auswahl der Elektronikkomponenten	21
3.5	Software.....	22
4	Fazit	23
	Literaturverzeichnis	24
	Tabellenverzeichnis	27
	Abbildungsverzeichnis	28
	Anhang.....	29

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Erfassung von Umweltparametern an und in Fließgewässern 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 (Carbonneau 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)

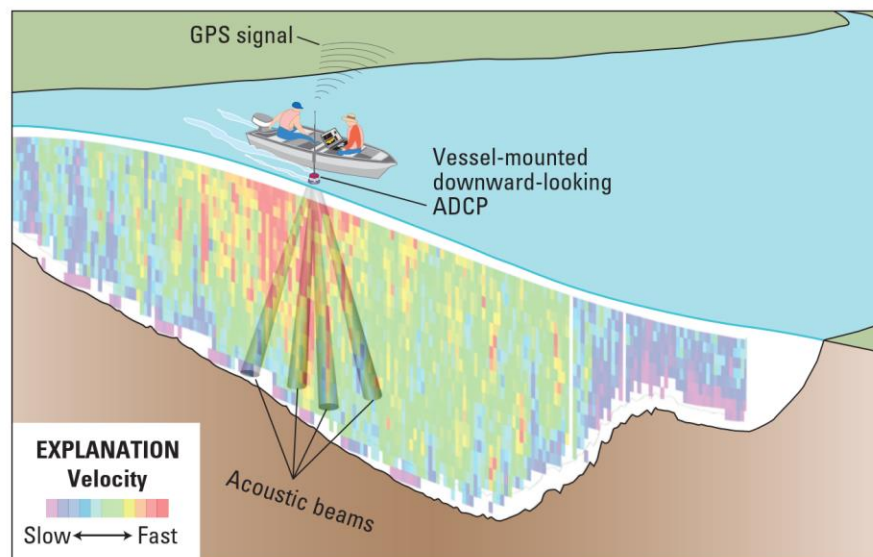


Abbildung 1. Funktionsweise eines ADCP, welcher auf einem Boot montiert ist (Mueller und Wagner 2013).

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 Abfluss- 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)

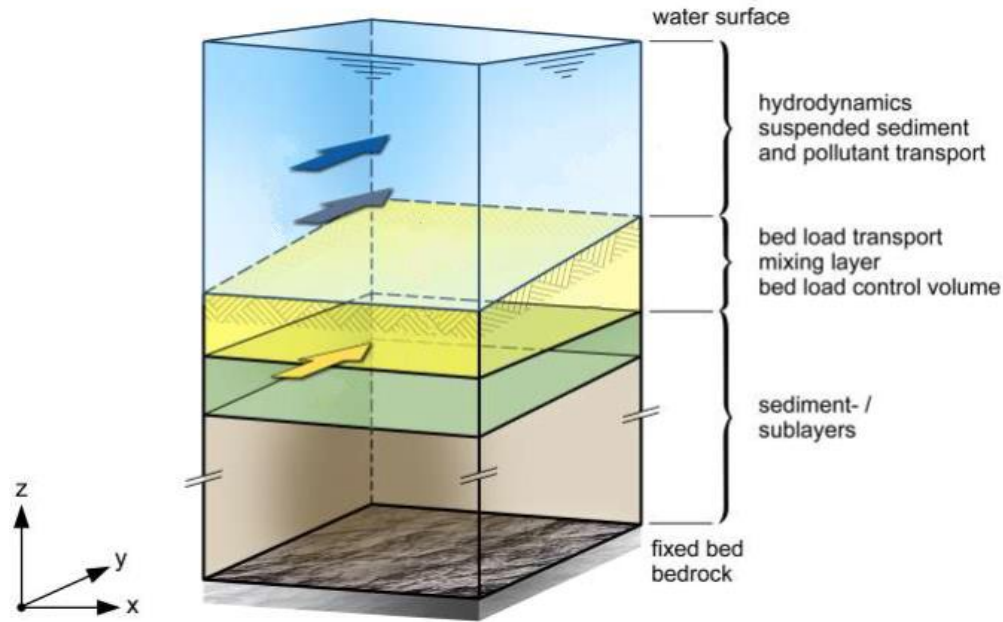


Abbildung 3. Vertikale Diskretisierung der simulierten Zellen, **geändert nach Vetsch u. a. (2020)**

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 Projektantrag

Dieses Projekt beantragt zwei technische Modifikationen an der bestehenden Plattform R2V2. 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 GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung

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.

Eine grosse Herausforderung stellen die Bedingungen am Einsatzort dar. Gerade bei künstlichen Hochwasserereignissen muss mit grösseren schwimmenden Hindernissen gerechnet werden (Schwemmholz). Weitere erschwerende Faktoren sind erhöhte Abflussraten sowie der begrenzt befahrbare Raum in Fliessgewässer. Ein manueller Betrieb muss jederzeit gewährleistet sein.

1.4 Projektziele

Innerhalb des Moduls Project Research Work Unit 1 (PWRU1) werden zwei Lösungskonzepte entwickelt. Die Umsetzung der entwickelten Vorschläge erfolgt im Folgemodul (PWRU2).

1.4.1 Kopplung von ADCP und Trübungssonde

Folgende Punkte werden im Lösungskonzept bearbeitet:

- > Vorschlag einer geeigneten Trübungssonde
- > Entwicklung des Probenahme-Designs auf der Plattform R2V2
- > Ausarbeitung einer mobilen Speisung der Trübungssonde
- > Vorschlag für die Ansteuerung und Datenerfassung

1.4.2 GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung

Folgende Punkte werden im Lösungskonzept bearbeitet:

- > Recherche geeigneter Autopiloten
- > Nutzwertanalyse ausgewählter Autopiloten
- > Auswahl der Elektronikkomponenten (Regelung, Ansteuerung, Akku)
- > Auswahl der Software (Missionsplanung, Embedded Software)

Weiter werden folgende Dokumente verlangt:

- > Gantt Chart für das Folgemodul PWRU 2
- > Kostenvoranschlag für die Umsetzung

2 Kopplung von ADCP und Trübungssonde

Die Kopplung von ADCP und Trübungssonde auf einer mobilen Plattform stellt zahlreiche Anforderungen an die Messtechnik. Die Trübungssonde muss zum Beispiel mobil einsetzbar sein. Weiter darf die Sonde nicht zu viel Volumen einnehmen, da das Platzangebot auf dem Boot beschränkt ist. Zudem zeigen Untersuchungen, dass während künstlichen Hochwasser an der Oberfläche Fließgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s auftreten (Jordan und Heller 2017). Dieses Kapitel befasst sich mit diesen Herausforderungen und beschreibt zwei Lösungsansätze.

2.1 Trübungssonde

Als Trübungssonde wird ein AquaScat S von Sigrist-Photometer AG vorgeschlagen. Aufgrund positiv fundierter Erfahrung mit diesem Photometer wird auf eine Konkurrenzanalyse verzichtet. Dieses Prozess-Photometer eignet sich besonders aufgrund folgender Eigenschaften (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021a):

- > **Inline Messverfahren:** Die Sonde kann direkt im Wasserstrom platziert werden.
- > **Messbereich:** Mit einem Bereich von 0 bis 4000 FNU sind auch hohe Trübungen messbar.
- > **Auflösung:** Mit 0.001FNU bietet eine Sonde eine hohe Auflösung.
- > **Fließgeschwindigkeit:** Das AquaScat S kann Fließgeschwindigkeiten bis 3 m/s handhaben.
- > **Geringe Leistungsaufnahme:** Mit maximal 2 W Leistungsaufnahme kann die Sonde mit einem Akku betrieben werden.
- > **kompaktes Volumen:** Die Sonde ist handlich und kompakt gebaut.

- > **Schutzart:** Mit der Schutzart IP68 ist die Sonde gut geschützt für den Einsatz am Gewässer.
- > **Schnittstellen:** Für die Datenerfassung bieten sich eine Vielzahl von Möglichkeiten (Modbus RTU, 4...20mA, WLAN)



Abbildung 4. Das Trübungsmessgerät AquaScat S (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021a).

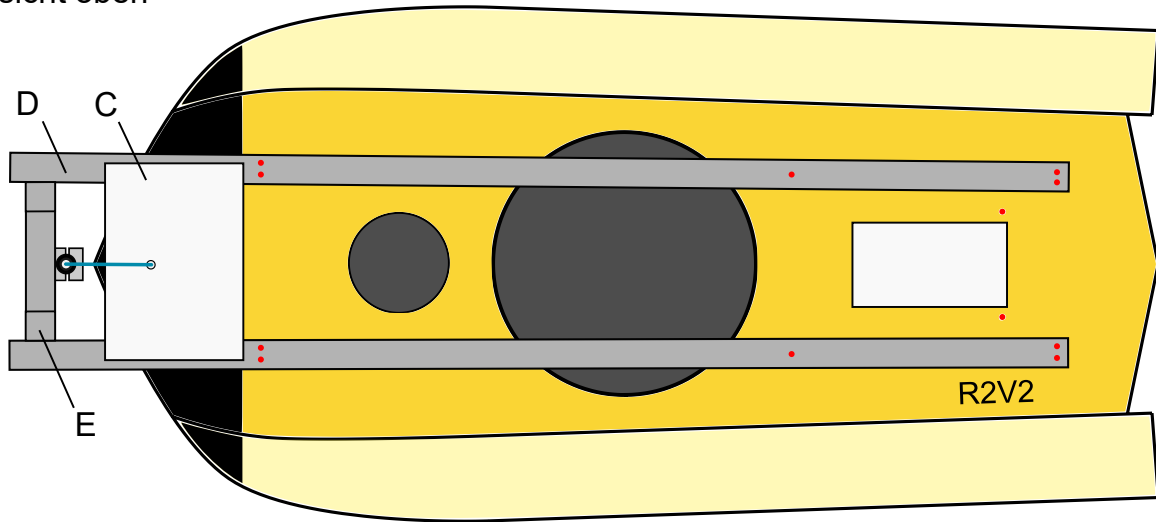
2.2 Probenahme-Design

An das Probenahme-Design werden hohe Ansprüche gestellt. Der wichtigste Anspruch ist, dass die Trübungssonde kontinuierliche und zuverlässige Messwerte liefert. Direkt beeinflusst wird dies durch die Art der Probenahme und deren Robustheit. Ein weiterer einschränkender Anspruch ist der verfügbare Platz auf der Plattform R2V2. Mit einem pragmatischen Probenahme-Design wird Komplikationen vorgebeugt und sichert eine zuverlässige Erfassung der Daten. In diesem Kapitel werden zwei mögliche Lösungen vorgestellt.

2.2.1 Variante in-situ

Die Variante in-situ sieht vor, dass das Trübungsmessgerät mit einem Tauchrohr (B in Abbildung 5) im Gewässer platziert wird. Montiert wird das AquaScat S (A) mittels einer Halterung aus Aluprofil (40 x 40 mm, D), welches an bestehenden Gewinden verschraubt wird (rote Punkte in Abbildung 5). Die Speisung ist in einer wasserdichten Box platziert (C). Die Messung erfolgt direkt im Medium (in-situ). Dabei wird das AquaScat S an der Spitze der Plattform platziert. Dies gewährleistet, dass ein Minimum an Luftblasen in die Messzelle gelangen und die Messung verfälschen.

Ansicht oben



Ansicht Seite

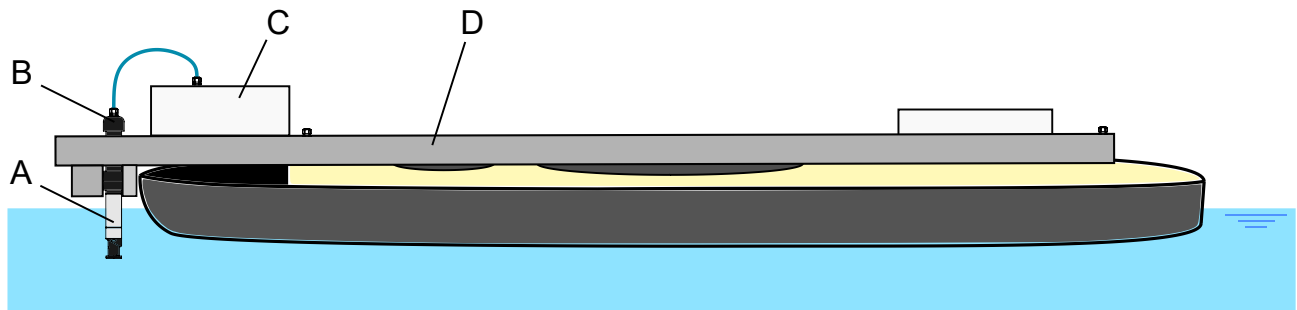


Abbildung 5. Schematische Darstellung der Variante In-situ.

Die Variante in-situ kostet CHF 406.14 und wiegt zusätzliche 5.24 kg (vgl. Tabelle 1).

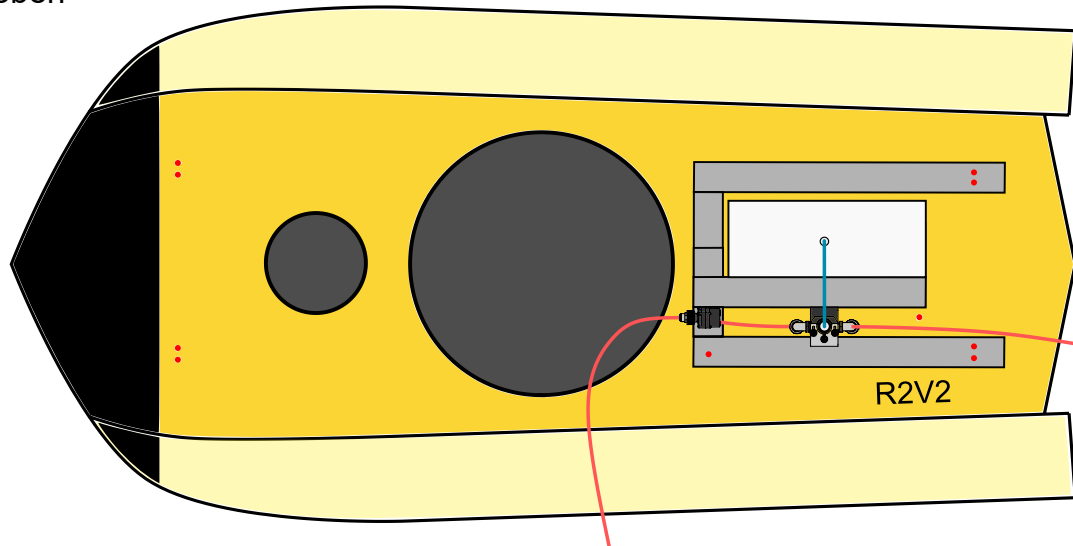
Tabelle 1. Liste aller Komponenten für die Variante in-situ. Das Photometer ist nicht berücksichtigt.

Beschreibung	Anzahl	Index	Artikelnummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Bosch Rexroth Alu-Profil 40x40L, 2m	2	D	9945753	Galaxus.ch	4400	108.04
Bosch Rexroth Winkel 40x40mm, Nut 10mm	2	E	9945755	Galaxus.ch	152	24.80
Tauchrohr-Grundausrüstung, 1 m	1	B	120563	Sigrist-Photometer	540	222.00
Gehäuse 255 x 100 x 180 mm, Polycarbonat	1	C	150-62-955	Distrelec.ch	150	51.30
Total					5242	406.14

2.2.2 Variante extraktiv

Die Variante extraktiv ist so gestaltet, dass die Probe über einen Bypass gemessen wird. Das Wasser wird mit einer Pumpe (G in Abbildung 6) in die Messzelle (F) des AquaScat S (A) gefördert und dort gemessen. Dafür wird ein Schlauch mit Aussendurchmesser 10 mm (innen 6.5 mm) verwendet (H). Aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse wird der Aufbau im hinteren Teil der Plattform montiert.

Ansicht oben



Ansicht Seite

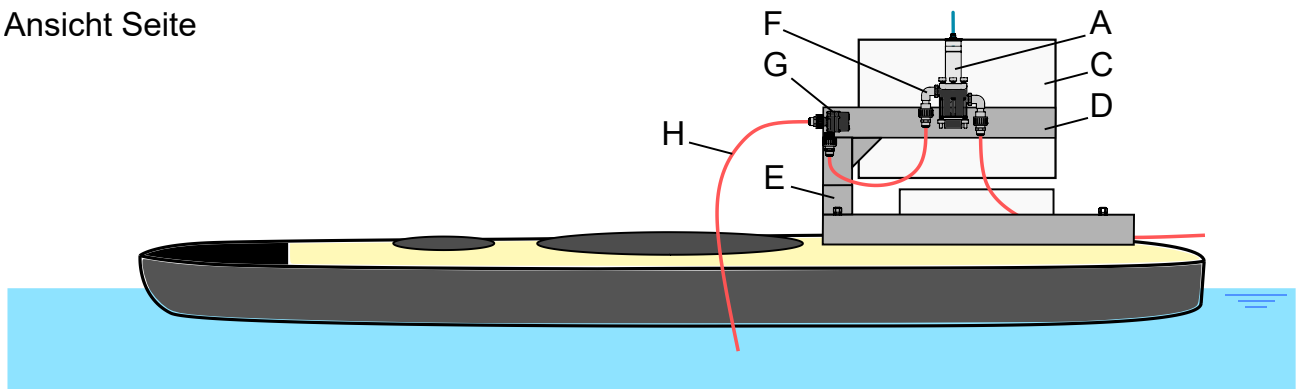


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Variante extraktiv.

Für die kontinuierliche Probenahme wird eine Zentrifugal-Pumpe (Abbildung 7) von Sigrist-Photometer AG vorgeschlagen (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021b). Diese eignet sich gut, weil:

- > Die Betriebsspannung auch 24 VDC beträgt (identisch zum Photometer).
- > Der geförderte Volumenstrom mittels PWM (Pulsweiten-Modulation) einstellbar ist.
- > Die Pumpe wartungsarm gestaltet ist.
- > Verschraubungen und Anschlüsse kompatibel zur Messzelle sind.



Abbildung 7 Zentrifugal-Pumpe für die kontinuierliche Probenahme, betrieben mit 24 VDC (**SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021b**).

Die Variante extraktiv kostet CHF 1334.19 und wiegt zusätzliche 2477 Gramm (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2. Liste aller Komponenten für die Variante extraktiv. Das Photometer ist nicht berücksichtigt.

Beschreibung	Anzahl	Index	Artikelnummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Bosch Rexroth Alu-Profil 40x40L 2m	1	D	9945753	Galaxus.ch	1200	54.02
Bosch Rexroth Winkel 40x40mm, Nut 10mm	3	E	9945755	Galaxus.ch	228	37.20
Messzelle für AquaScat S mit Wandhalterung	1	F	121090	Sigrist-Photometer	372	918.00
	1	G	121467	Sigrist-Photometer	473	235.00
Pumpe mit Verschraubung	1	C	150-62-955	Distrelec.ch	150	51.30
Gehäuse 255 x 100 x 180 mm, Polycarbonat	1	H	154-23-868	Distrelec.ch	54	38.67
Polyurethan Schlauch, 10mm, 20m					2477	1334.19
Total						

2.2.3 Vergleich der Varianten

Die beiden Varianten unterscheiden sich markant durch ihr Design und haben eigene Charakteristika. Eine Einordnung verschiedener Kriterien ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Die Variante in-situ bietet eine direkte Messung im Gewässer. Dadurch ist keine Zufuhr der Probe nötig, das passive Design ist schlank. Jedoch werden durch die Exposition im Gewässer fehlerhafte Messwerte (Luftblasen, Schwemmholz) wahrscheinlicher. Zudem misst die Sonde nur korrekt, wenn sie von vorne angeströmt wird. Erschwerend kommt dazu, dass die Sonde durch ihre Position einer erhöhten Verletzungsgefahr ausgesetzt ist.

Die Variante extraktiv zeigt klare Vorteile in der Robustheit. Aufgrund der separaten Messzelle und einer Zuführung via Pumpe sind fehlerhafte Messwerte unwahrscheinlicher. Durch diesen Bypass ist der korrekte Anströmwinkel stets gegeben. Weiter bringt der Bypass aber auch klare Nachteile: Die Messung wird einen Filtereffekt erfahren (Glättung). Zudem wird der Aufbau aufwändiger, schwerer und teurer.

Tabelle 3. Vergleich der Varianten in-situ und extraktiv, basierend auf verschiedenen Kriterien.

Kriterium	Variante in-situ	Variante extraktiv
Fehleranfälligkeit der Messung	erhöht, da exponiert	gering, da Bypass
Anströmungswinkel der Sonde	in Fahrtrichtung	nicht relevant
Filtereffekte	keine	vorhanden, da Bypass
Zufuhr der Probe	passiv	aktiv, durch Pumpe
Mechanische Belastung der Sonde	erhöht	gering
Zusätzlicher Strömungswiderstand	erhöht	vernachlässigbar
Verletzungsgefahr von der Sonde	gross, da exponiert	gering, da Bypass
Montage	versperrt Zugang zu Innenraum	kompakt
Maximale Leistungsaufnahme	2 W	2 + 36 W
Schwerpunkt	tief	erhöht
Preis (gerundet)	406 CHF	1334 CHF

2.3 Speisung

Die Speisung orientiert sich an den technischen Spezifikationen der Trübungssonde sowie der Pumpe (falls verwendet). Für die Dimensionierung einer Speisung sind folgende Kennwerte zentral:

Tabelle 4. Die zentralen Kennwerte Betriebsspannung und Betriebsstrom für die Dimensionierung einer Speisung.

	Betriebsspannung nominal	Betriebsstrom, maximal
Photometer	24 VDC, $\pm 10\%$	0.083 A
Pumpe	24 VDC	1.5 A
Total		1.583 A

In mobilen Anwendungen hat sich die Verwendung von Lithium-Polymer Akkus (sog. LiPo) etabliert. Diese bestehen aus seriell geschalteten Akkuzellen mit einer Zellspannung von jeweils 3.7 Volt. Daher werden nur Vielfache von 3.7 V als Nominalspannung angeboten. Für unsere Anwendung ist ein Lipo mit 7 Zellen geeignet ($7 \times 3.7 \text{ V} = 25.9 \text{ V}$). Solche Akkus sind ab einer Kapazität von 5000 mAh verfügbar (Digitec Galaxus AG 2021a).



Abbildung 8 Ein wiederaufladbarer Lithium-Polymer Akku mit einer Nominalspannung von 25.9 Volt (**Digitec Galaxus AG 2021a**)

Ist die maximale Stromaufnahme bekannt, kann die minimale Betriebsdauer mit der angegebenen Kapazität berechnet werden:

$$T_{min} = \frac{C_{Lipo}}{I_{max}} = \frac{5000 \text{ mAh}}{1583 \text{ mA}} = 3.15 \text{ h}$$

Da die Forschungsgruppe Ökohydrologie bisher keine Einsätze hatte, welche länger als eine Stunde dauerten, erscheint eine Betriebsdauer von circa 3 Stunden ausreichend. Der präsentierte Vorschlag wird für den Prototyp verwendet.

Akkus haben den Nachteil, dass die Betriebsspannung mit zunehmender Entladung sinkt. Dieser Vorgang kann mit DC/DC-Wandler stabilisiert werden. Die variierende Eingangsspannung des Akkus wird so auf 24 VDC geregelt. Aufgrund des verbreiteten Einsatzes von DC/DC-Wandler ist das Angebot sehr gross und muss durch eine genaue Spezifikation eingegrenzt werden. Für die vorliegende Anwendung wurden folgende Eingrenzung angewandt:

Tabelle 5. Die angewandten Spezifikationen für die Auswahl des DC/DC-Wandlers.

	nominal	minimal	maximal
Ausgangsspannung	24 VDC		
Eingangsspannung		9 VDC	36 VDC
Ausgangsstrom	1.25 A		
Wirkungsgrad		85 %	

Dabei wurde der nominale Ausgangsstrom bewusst unter der maximalen Stromaufnahme von 1.583 Ampere angesetzt. Ausschlaggebend sind zwei Gründe:

- > Ein DC/DC-Wandler erreicht den spezifizierten Wirkungsgrad erst ab einer Auslastung von circa 40%. Betriebspunkte unterhalb dieser Auslastung sind höchst ineffizient.
- > Die Stromaufnahme der Pumpe ist mittels PWM einstellbar und hängt von der geförderten Wassermenge ab. Eine Stromaufnahme von 1 Ampere wird angestrebt, was einer Auslastung von 60 % entspricht.

Basierend auf den genannten Spezifikationen (Tabelle 5) wird der DC/DC-Wandler RSD-30G-24 von Mean Well vorgeschlagen (Distrelec Schweiz AG 2021b). Dieser erfüllt die vorgegebenen Spezifikationen, hat einen Wirkungsgrad von 89 %, ist kompakt gebaut (113 x 60 x 25 mm) und preiswert.



Abbildung 9 Der vorgeschlagene DC/DC-Wandler RSD-30G-24 von Mean Well (**Distrelec Schweiz AG 2021b**)

Unabhängig von der gewählten Variante kostet die Speisung CHF 173.20 und wiegt zusätzliche 1055 Gramm (vgl Tabelle 6).

Tabelle 6. Kostenübersicht der benötigten Komponenten für die Speisung.

Beschreibung	Anzahl	Artikelnummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Gens LiPo-Akku 25.9V 5000mAh 45C 7S1P	1	12008575	Digitec.ch	805	135.00
RSD-30G-24, isolierter DC/DC-Wandler mit 1 Ausgang	1	301-56-967	Distrelec.ch	250	38.20
Total				1055	173.20

2.4 Datenerfassung

Für die Messwerterfassung bieten sich verschiedene Schnittstellen an (vgl. Kapitel 2.1):

- > Stromausgang 4 bis 20 mA
- > Modbus RTU
- > WLAN

In diesem Kapitel wird für die ersten beiden Schnittstellen eine passende Lösung vorgeschlagen. Die Schnittstelle WLAN wird nicht weiter betrachtet, da die Trübungssonde durch das zusätzliche WLAN-Modul die Wasserdichtheit verliert und sich für den geplanten Einsatz am Gewässer nicht mehr eignet.

2.4.1 Stromausgang 4 bis 20 mA

Der Messwert wird als kontinuierliches Signal zwischen 4 und 20 mA am Stecker bereitgestellt (abhängig vom eingestellten Messbereich). Dieses Signal kann mit einem Datenlogger abgegriffen werden. Besonders geeignet ist der Datenlogger EL-USB-4 von Lascar (Distrelec Schweiz AG 2021a). Er ist kompakt, batteriebetrieben und zeichnet das Signal in einem internen Speicher auf. Die Daten können nachträglich via USB-Stick entnommen werden.



Abbildung 10 Der kompakte Datenlogger EL-USB-4 von Lascar (Distrelec Schweiz AG 2021a)

2.4.2 Modbus RTU

Die Kommunikation vom AquaScat S basiert auf Modbus RTU (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021a). Da dieses Kommunikationsprotokoll ein etablierter Standard ist, kann die Integration der Trübungssonde anwendungsspezifisch gestaltet werden. Für die vorliegende Anwendung sind folgende Lösungen denkbar:

- > Mit dem passenden Bediengerät SICON (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021c)
- > Mit einem Microcontroller, zum Beispiel ein Arduino Nano (Arduino 2021)

2.4.3 Empfehlung

Die Messwerterfassung ist mit beiden vorgeschlagenen Lösungen umsetzbar. Da der initiale Aufwand für Modbus RTU höher ist, wird für die Testphase die Verwendung des Datenloggers EL-USB-4 vorgeschlagen. Falls sich die Trübungsmessung in der Anwendung bewährt, ist eine nachträgliche Aufrüstung mit einem Microcontroller empfohlen.

3 GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung

In diesem Kapitel wird ein Lösungsvorschlag für ein GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung ausgearbeitet (gemäß Kapitel 1.3.2). Dabei werden bei der Konzeption die vorgeschlagenen Lösungen von Kapitel 2 berücksichtigt, sodass eine Umsetzung beider Anliegen möglich ist. Insgesamt wurden 17 mögliche Autopilotsysteme untersucht.

Methodisch orientiert sich dieses Kapitel an der systematischen Produktentwicklung gemäss VDI-Richtlinie 2221 (Neafe 2009). In einer ersten Phase werden mögliche Autopilotsysteme gesucht, welche sich für die vorliegende Plattform R2V2 eignen. Für jedes System werden die relevanten Spezifikationen recherchiert und aufgelistet. Mittels Nutzwertanalyse wird objektive Bewertung der evaluierten Systeme durchgeführt (Pahl und Beitz 2003). Dafür werden vorgängig vier Kriterien definiert, welche funktionale sowie auch wirtschaftliche Anforderungen beinhalten. Für jedes Ziel wird eine Gewichtung vorgenommen, wobei die Funktionserfüllung und Dokumentation höher gewichtet wird als der Kostenaspekt. Jedes System wird analog zur VDI-Richtlinie 2225 mit einer Wertskala von 1 bis 10 (von unbefriedigend bis ideal) bewertet (VDI 1998). Wichtig ist dabei, dass die Beurteilung völlig objektiv erfolgt. Das Autopilotsystem mit der besten Bewertung wird als Lösung vorgeschlagen und in den darauffolgenden Kapitel näher behandelt.

3.1 Technische Einordnung des Systems

Flugfähige Drohnen mit Autopiloten haben im vergangenen Jahrzehnt an Popularität gewonnen. Erschwingliche Gesamtlösungen oder Bausätze machen eine eigene Drohne für alle zugänglich. Eine breite Auswahl an Komponenten ermöglichen individuelle Lösungen, dank einer weltweit vernetzten Community auch mit minimalem Vorwissen. Vorgängig muss eine zentrale Unterscheidung gemacht werden. An einem Beispiel von flugfähigen Drohnen werden drei Klassen erkennbar:

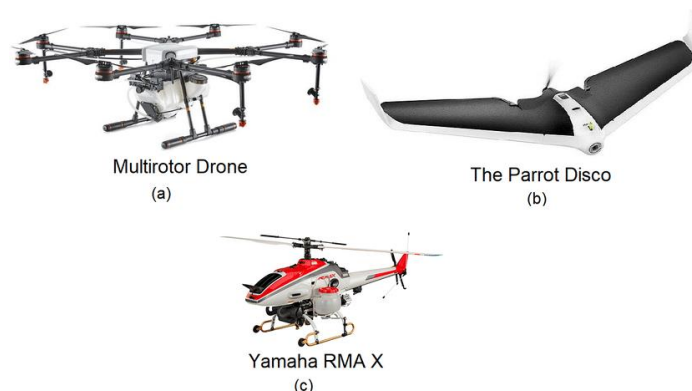


Abbildung 11 Klassierung flugfähiger Drohnen (UAVs): multi-rotor (a), fixed wing (b), and single-rotor (c) (Alhawi, Mustafa, und Cordeiro 2019)

- a) **multi-rotor:** Die Drohne verfügt über mehrere Rotoren. Die Beschleunigung sowie Richtungsänderungen geschehen mit der unterschiedlichen Ansteuerung einzelner Rotoren.
- b) **fixed wing:** Mit meist einem Motor und Flügel wird der Auftrieb generiert. Durch die Ruder am Flügel wird die Flugrichtung beeinflusst.
- c) **single-rotor:** Der Auftrieb wird durch einen zentralen Rotor erzeugt. Mit unterschiedliche Anstellungswinkel der Rotoren wird die Flugrichtung gesteuert.

Dieses Beispiel erfolgt mit fliegenden Systemen, da Autopilotsysteme vorwiegend dafür entwickelt wurden. Schwimmende Systeme nutzen die identischen Komponenten und können somit gleich unterteilt werden. Das vorliegende Boot ist in die Klasse a (multi-rotor) einzuordnen, weil die Steuerung mit zwei Rotoren umgesetzt ist, Ruder sind keine angebracht. Diese Differenzierung ist zentral, da nur Multi-Rotor-Systeme in der weiteren Evaluation berücksichtigt werden.

3.2 Schematischer Aufbau

Schematisch sind Multi-Rotor-Systeme wie folgt aufgebaut (vgl. Abbildung 12):

- > 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 einzugreifen und das Steuersignal von der *Ground Control* zu übersteuern.
- > Das *Power System* (auch Powermanagement System) regelt die Stromversorgung aller Komponenten auf der mobilen Plattform.

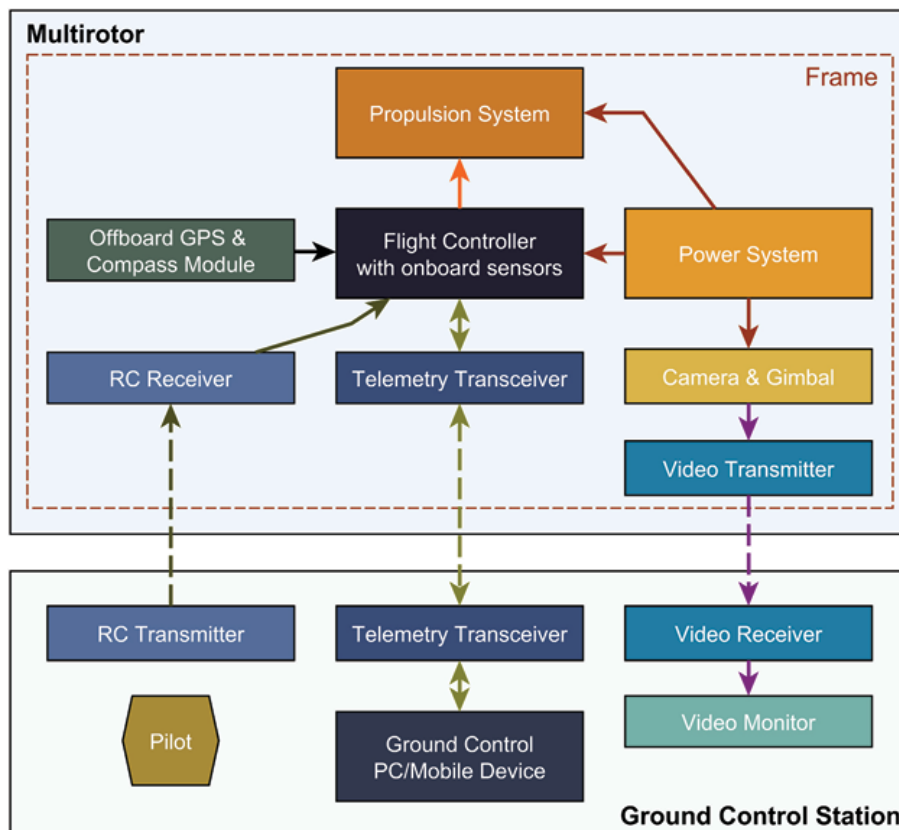


Abbildung 12 Blockschaftbild einer multi-rotor Drohne für Remote Sensing (Torricco 2020)

3.3 Geeignete Autopilotssysteme

In diesem Kapitel werden ausgewählte Autopilotssysteme beschrieben, welche sich für den River Robot eignen. Die vollständige Evaluation aller Systeme ist im Anhang zu entnehmen.

3.3.1 Ardupilot

Ardupilot entwickelt Autopilotssysteme für eine Vielzahl von Anwendungen. Ihr System wird für Helikopter, Flugzeuge, Boote und Rover eingesetzt und ständig erweitert. Rund 20 Enthusiasten bilden das Kernteam, welches den Source-code entwickelt und unterhält (Ardupilot 2021b). Weiter wird dieses open-source Projekt von einer breiten Gemeinschaft unterstützt, was dazu führt, dass Ardupilot mit Pixhawk (siehe folgendes Kapitel) den Markt anführt (Torrico 2020). Sieben der 17 untersuchten Systeme wurden von Ardupilot entwickelt.



Abbildung 13 Ardupilot entwickelt Autopilotssysteme für Helikopter, Flugzeuge, Boote und Rover (Ardupilot 2021b)

3.3.2 Pixhawk

Pixhawk ist ein unabhängiges open-hardware Projekt, welches preiswerte Autopilotssysteme anbietet. Die Plattform wurde 2009 von einem Studenten der ETH Zürich gegründet (Meier 2018) und ist etabliert, sodass 6 der 17 evaluierten Systeme von Pixhawk mitentwickelt wurden. So finden sich auch Anwendungen im Bereich von Remote Sensing: *Das Autonomous Systems Lab* (ASL) der ETH Zürich verwendet ein Pixhawk 4 Autopilot für landwirtschaftliche Inspektion (Leutenegger u. a. 2014).

Aufgrund des offenen Quellcodes hat sich um das Projekt eine breite Gemeinschaft von Entwickler versammelt. So entsteht in Zusammenarbeit mit der *Pixhawk Special Interest Group* und der *Dronecode Foundation* ein Industriestandart für Drohnensysteme (Meier 2021).



Abbildung 14 Der Pixhawk 4 ist der aktuellste Autopilot von Pixhawk (**Pixhawk 2021a**)

3.4 Nutzwertanalyse ausgewählter Systeme

Als Vorbereitung der Nutzwertanalyse wurden mögliche Autopilotssysteme recherchiert und gegenübergestellt. Dabei wurden nur technisch kompatible Systeme in den Vergleich miteinbezogen (vgl. Kapitel 3.1). Zentrale Spezifikationen wie Anzahl Aktuatoren, Schnittstellen, RC Protokolle wurden aufgelistet und bewertet. Für eine möglichst umfassende Nutzwertanalyse wurden vier Kriterien definiert und anschliessend gewichtet:

- > **Hardware Spezifikationen:** Werden die minimalen technischen Anforderungen erfüllt? Welche Schnittstellen werden unterstützt? Ist ein Akkubetrieb möglich?
- > **Dokumentation:** Wie gut ist das Produkt dokumentiert? Sind alle nötigen Dokumente vollständig und frei verfügbar? Werden sie aktuell gehalten? Gibt es eine breite Community?
- > **Preis:** Wieviel kostet der Autopilot ohne Zubehör?
- > **Verfügbarkeit:** Kann das Produkt zeitnah geliefert werden?

3.4.1 Gewichtung

Die beschriebenen Kriterien werden in der Bewertung unterschiedlich gewichtet (vgl. Tabelle 7). Aufgrund persönlicher Erfahrungen wird das Kriterium Dokumentation doppelt gewichtet. Eine zuverlässige und vollständige Dokumentation ist bei technisch anspruchsvoller Hardware von zentraler Bedeutung – nicht nur für den Bau, auch für die Bedienung und Reparatur. Weiter ist eine hochwertige Dokumentation ein Zeichen für qualitative Produkte.

Tabelle 7. Kriterien und deren Gewichtung der Nutzwertanalyse

Kriterium	Gewicht [%]	Kommentar
Hardware Spezifikationen	20	Anzahl Aktuatoren, Hardware Interfaces, RC Protokolle
Dokumentation	40	Verfügbare Dokumente, Detaillierungsgrad, Community
Preis	20	Nur Autopilot, ohne GPS
Verfügbarkeit	20	Lieferbar zum Zeitpunkt der Evaluation

3.4.2 Resultat

Die Nutzwertanalyse von 17 Autopilotsysteme ergab ein differenziertes Resultat. Nur zwei Produkte (Pixhawk 4 und Holybro Durandal) erreichten eine Bewertung über 7, vier Produkte über 6 (vgl. Tabelle 8). Mit einem Unterschied von jeweils 0.3 Punkten kann keine klare Differenzierung zwischen Rang 1 bis 4 gemacht werden, durchaus aber zu den nächsten Rängen.

Dennoch überzeugt das bestbewertete Produkt. Der *Pixhawk 4* zeichnet sich durch eine sehr detaillierte Dokumentation, eine gute Verfügbarkeit und ein gutes Preis-Leistung Verhältnis aus. Zudem bietet der Hersteller der Autopilot mit passendem Zubehör (GPS-Modul, Powermanagement) an, was die technische Komplexität für den Anwender reduziert (siehe Abbildung 15). Ein weiterer Vorteil ist, dass dieses Produkt kompatibel mit der Firmware von Ardupilot ist. Dies gibt eine zusätzliche Sicherheit, falls die Firmware von Pixhawk zu Komplikationen führt.

Tabelle 8. Bewertung von 17 Autopilotsystemen im Rahmen der Nutzwertanalyse.

Nutzwertanalyse	Preis	Verfügbarkeit	Hardware Spezifikationen	Dokumentation	Total	Rang
Gewicht [%]	20	20	20	40	100	
Pixhawk 4 mini	6.52	10	4.3	3	5.36	9
Pixhawk 4	5.66	10	5.15	8	7.36	1
Pixhawk 3 Pro	5.26	1	6.76	8	5.8	7
Pixhawk 2	5.4	10	3.68	3	5.02	11
Auterion Skynode	3	5	1.47	3	3.09	16
mRo PixRacer Pro	5.4	3	6.18	4	4.52	12
mRo Control Zero H7	5	1	5.88	4	3.98	13
mRo Control Zero H7 OEM	5.4	1	6.76	3	3.83	14
mRo x2.1 Rev. 2	6.68	3	3.38	8	5.81	6
mRo X2.1-777	6.5	1	3.38	8	5.38	8
mRo Pixracer R15	6.5	1	5.88	8	5.88	5
Zuppa uav	3	5	1.54	1	2.31	17
Paparazzi UAV / Lisa M	5.76	1	3.38	8	5.23	10
RevoMini	3	1	1.54	6	3.51	15
Holybro Durandal	5.7	10	7.65	6	7.07	2
Pix32 v5	6.44	10	5.15	6	6.72	3
Beagle Bone Blue	8.29	10	2.43	6	6.54	4

3.5 Auswahl der Elektronikkomponenten

Für einen funktionierenden Autopiloten benötigt es weitere Komponenten (vgl. Abbildung 12). Folgende Komponenten werden dafür ausgewählt (Holybro 2021a):

- > **Flight Controller:** Pixhawk 4 (oben links in Abbildung 15)
- > **Telemetry Transceiver:** Radio V3, 433 MHz (Holybro 2021b)
- > **GNSS and Compass Module:** Pixhawk 4 GPS Module (oben mittig in Abbildung 15)
- > **RC Receiver & Transmitter:** Bestehende Fernsteuerung von Hitec
- > **Power System:** Pixhawk 4 Power Management Board PM07 (oben rechts in Abbildung 15).

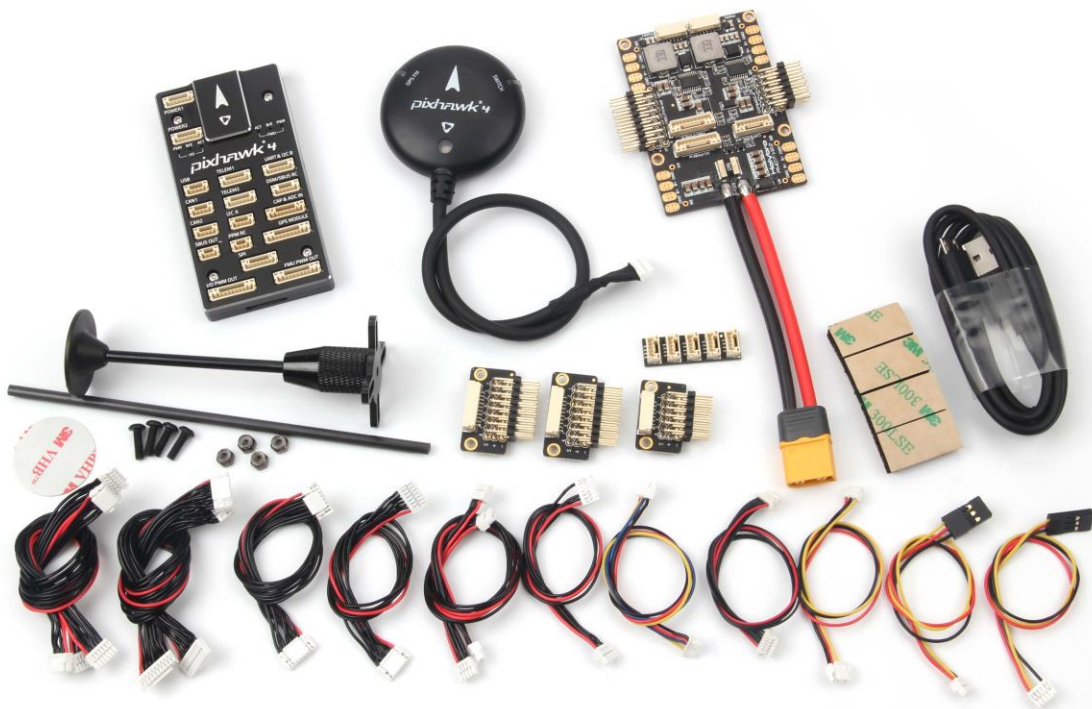


Abbildung 15 Foto des Autopiloten Pixhawk 4 und das passende Zubehör (Holybro 2021a)

Das GNSS Modul verfügt über eine horizontale Genauigkeit von 2.5m (ublox 2021). Optional ist der Ersatz des bestehenden Akkus eingeplant. Messungen am aktuellen Akku ergaben eine Kapazität von 5.9 Ah. Der vorgeschlagene Akku von Voltic besitzt eine Kapazität von 20 Ah, rund viermal mehr (Digitec Galaxus AG 2021b).

Das vorgeschlagene Autopilotsystem kostet CHF 682.7 und wiegt rund 3.8 kg. Das zusätzliche Gewicht wird hauptsächlich durch den Akku verursacht (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9. Kostenübersicht der benötigten Komponenten für das Autopilotensystem Pixhawk 4.

Beschreibung	Anzahl	Artikelnummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Gens Ace Gens LiPo-Akku 25.9V 5000mAh 45C 7S1P	1	12008575	Digitec.ch	805	135
RSD-30G-24, isolierter DC/DC-Wandler mit 1 Ausgang	1	301-56-967	Distrelec.ch	250	38.2
EL-USB-4 - Datenlogger	1	176-70-793	Distrelec.ch	18	85.5
Pixhawk 4 mit GPS und Powermanagement	1	SKU20034	holybro	213	190
Telemetry Empfänger für Ground Control Station	1	17012A	holybro	50	35
Voltic VLI20 LiFePO4 Lithium Versorgungsbatterie	1	14676792	Digitec.ch	2550	199
Total				3886	682.7

3.6 Software

Für die Missionsplanung gibt es mindestens zehn geeignete Ground Controls Stations (Ardupilot 2021a). Der Hersteller empfiehlt die Nutzung von *QGroundControl* (Pixhawk 2021a), die passende Softwarelösung von Pixhawk. Da QGroundcontrol auch kompatibel ist mit der Firmware Ardupilot, wird diese Ground Control Station gewählt (Ardupilot 2021a). QGroundControl läuft auf Windows, Android, MacOS und Linux.

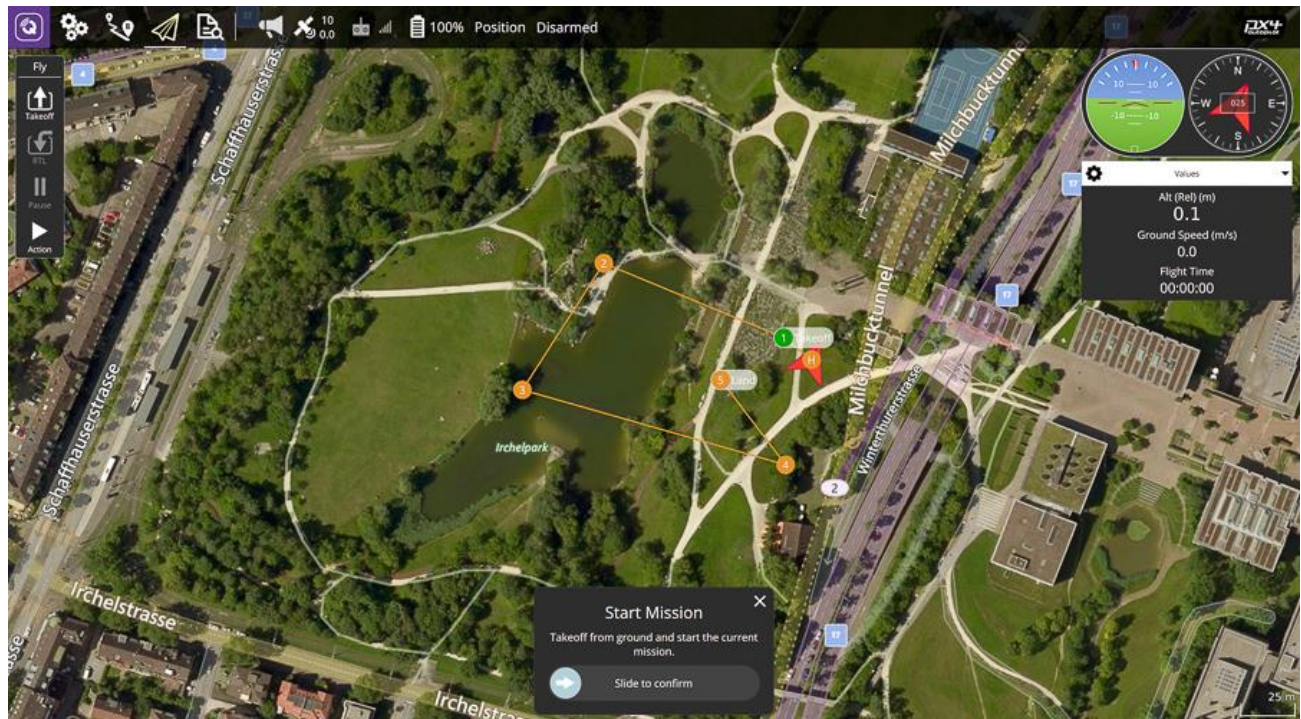


Abbildung 16 Screenshot der Missionsplanung von QGroundcontrol, hier mit einer flugfähigen Drohne (**Pixhawk 2021b**)

4 Fazit

Für die ausgearbeiteten Lösungsvorschläge ergeben sich zwei mögliche Kombinationen. Wenn beide Einheiten montiert werden ist mit einem zusätzlichen Gewicht von rund 7 bis 10 Kilogramm zu rechnen (vgl. Tabelle 10 und Tabelle 11). Rund 2.5 Kilogramm vom zusätzlichen Gewicht wird von der Versorgungsbatterie verursacht, welche die Gewichtszunahme durch andere Komponenten kompensieren soll (vgl. Kapitel 3.5). Ob dies gelingt muss in einem Feldversuch getestet werden.

Tabelle 10. Kostenübersicht für das Autopilotensystem Pixhawk 4 kombiniert mit der Probenahme Variante in-situ. Das AquaScat S ist im Preis nicht inbegriffen, dies wird für die Pilotphase ausgeliehen.

Autopilotensystem Pixhawk 4 mit Probenahme, Variante in-situ	Gewicht [g]	Preis [CHF]
AquaScat S, inklusive 10m Kabel	513	(3264)
Autopilotensystem Pixhawk 4	3886	682.7
Probenahme, Variante in-situ	5242	406.14
Total	9641	1088.84

Tabelle 11. Kostenübersicht für das Autopilotensystem Pixhawk 4 kombiniert mit der Probenahme Variante extraktiv. Das AquaScat S ist im Preis nicht inbegriffen, dies wird für die Pilotphase ausgeliehen.

GPS-gesteuertes Boot mit Variante extraktiv	Gewicht [g]	Preis [CHF]
AquaScat S, inklusive 10m Kabel	513	(3264)
Autopilotensystem Pixhawk 4	3886	682.7
Variante extraktiv	2477	1334.19
Total	6876	2016.89

Die vorliegenden Lösungsvorschläge wurden am 18.6.2021 der Forschungsgruppe vorgestellt. Die beiden Probenahme-Designs wurden ausführlich diskutiert und verglichen. Die Forschungsgruppe hat entschieden:

- > Aufgrund der verlässlicheren Probenahme sowie der geringeren Exponierung des Photo-meters wurde die Variante extraktiv für die Umsetzung ausgewählt. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Variante rund 2.5 kg weniger wiegt.
- > Beide Einheiten (Autopilot und Trübungssonde) sollen modular aufgebaut sein, sodass diese einzeln verwendet werden können.
- > Es soll eine definitive Offerte für die Trübungssonde erstellt werden.

Literaturverzeichnis

- Alhawi, Omar, Mustafa A. Mustafa, und Lucas Cordeiro. 2019. *Finding Security Vulnerabilities in Unmanned Aerial Vehicles Using Software Verification*.
- Arduino. 2021. „Arduino Nano | Arduino Official Store“. Abgerufen 8. Juni 2021 (<https://store.arduino.cc/arduino-nano>).
- Ardupilot. 2021a. „Choosing a Ground Station — Rover documentation“. Abgerufen 15. Juni 2021 (<https://ardupilot.org/rover/docs/common-choosing-a-ground-station.html#common-choosing-a-ground-station>).
- Ardupilot. 2021b. „Team Members“. Abgerufen 15. Juni 2021 (<https://ardupilot.org/index.php/about/team>).
- Carbonneau, Patrice, Hervé Piégay, Lejot Jérôme, Robert Dunford, und Kristell Michel. 2012. „Fluvial Remote Sensing for Science and Management“. S. 163–91 in.
- Digitec Galaxus AG. 2021a. „Gens LiPo-Akku 25.9V 5000mAh 45C 7S1P (25.90V, 5000mAh)“. Abgerufen 7. Juni 2021 (<https://www.digitec.ch/de/s1/product/gens-ace-gens-lipo-akku-259v-5000mah-45c-7s1p-2590v-5000mah-rc-akku-12008575>).
- Digitec Galaxus AG. 2021b. „VLI20 LiFePO4 Lithium Versorgungsbatterie (20Ah)“. Abgerufen 15. Juni 2021 (<https://www.digitec.ch/de/s1/product/voltic-vli20-lifepo4-lithium-versorgungsbatterie-20ah-fahrzeugbatterie-14676792>).
- Distrelec Schweiz AG. 2021a. „EL-USB-4 | Lascar Datenlogger, Current, 1 Kanäle, USB, 32510 Messungen“. *Distrelec Schweiz*. Abgerufen 8. Juni 2021 (<https://www.distrelec.ch/de/datenlogger-current-kanale-usb-32510-messungen-lascar-el-usb/p/17670793>).
- Distrelec Schweiz AG. 2021b. „RSD-30G-24 | MEAN WELL Isolierter DC/DC-Wandler mit 1 Ausgang, Chassismontage, Bahn, 30W, 24V, 1.25A“. *Distrelec Schweiz*. Abgerufen 7. Juni 2021 (<https://www.distrelec.ch/de/isolierter-dc-dc-wandler-mit-ausgang-chassismontage-bahn-30w-24v-25a-mean-well-rsd-30g-24/p/30156967>).
- 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. 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.
- Leutenegger, Stefan, Amir Melzer, Kostas Alexis, und Roland Siegwart. 2014. „Robust state estimation for small unmanned airplanes“. *2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2014* 1003–10. doi: 10.1109/CCA.2014.6981466.
- Meier, Lorenz. 2018. *Pixhawk trademark guidelines - Version 1.0 (June 26. 2018)*.
- Meier, Lorenz. 2021. „pixhawk/Pixhawk-Standards“. Abgerufen 8. Juni 2021 (<https://github.com/pixhawk/Pixhawk-Standards>).
- 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*.
- Neafe, Paul. 2009. *Einführung in das Methodische Konstruieren*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Pahl, Gerhard, und Wolfgang Beitz. 2003. *Konstruktionslehre*. München: Springer.
- Pixhawk. 2021a. „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).

- Pixhawk. 2021b. „Overview · QGroundControl User Guide“. Abgerufen 18. Juni 2021 (<https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/>).
- 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.
- SIGRIST-PHOTOMETER AG. 2021a. „AquaScat S – Trübungsmessgeräte (Flüssigkeiten) | SIGRIST-PHOTOMETER - Swiss Made“. *AquaScat S - Technische Daten*. Abgerufen 25. Mai 2021 (<https://www.photometer.com/de/Trubungsmessgeräte-Flüssigkeiten/Aqua-Scat-S/Technische-Daten>).
- SIGRIST-PHOTOMETER AG. 2021b. „DC Pumpe mit Verschraubung ScrubberGuard | SIGRIST-PHOTOMETER - Swiss Made“. *DC Pumpe mit Verschraubung ScrubberGuard*. Abgerufen 3. Juni 2021 (<https://www.photometer.com/de/Artikel/?partid=121467>).
- SIGRIST-PHOTOMETER AG. 2021c. „SICON – Bedienungsgeräte | SIGRIST-PHOTOMETER - Swiss Made“. Abgerufen 8. Juni 2021 (<https://www.photometer.com/de/Bedienungsgeräte/SICON/>).
- 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.
- VDI. 1998. *VDI 2225 Blatt 3 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- 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 Zürich.

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>).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Liste aller Komponenten für die Variante in-situ. Das Photometer ist nicht berücksichtigt.	9
Tabelle 2. Liste aller Komponenten für die Variante extraktiv. Das Photometer ist nicht berücksichtigt.	11
Tabelle 3. Vergleich der Varianten in-situ und extraktiv, basierend auf verschiedenen Kriterien.	12
Tabelle 4. Die zentralen Kennwerte Betriebsspannung und Betriebsstrom für die Dimensionierung einer Speisung.	12
Tabelle 5. Die angewandten Spezifikationen für die Auswahl des DC/DC-Wandlers.	13
Tabelle 6. Kostenübersicht der benötigten Komponenten für die Speisung.	14
Tabelle 7. Kriterien und deren Gewichtung der Nutzwertanalyse.	20
Tabelle 8. Bewertung von 17 Autopilotsystemen im Rahmen der Nutzwertanalyse.	20
Tabelle 9. Kostenübersicht der benötigten Komponenten für das Autopilotsystem Pixhawk 4.	22
Tabelle 10. Kostenübersicht für das Autopilotsystem Pixhawk 4 kombiniert mit der Probenahme Variante in-situ. Das AquaScat S ist im Preis nicht inbegriffen, dies wird für die Pilotphase ausgeliehen.	23
Tabelle 11. Kostenübersicht für das Autopilotsystem Pixhawk 4 kombiniert mit der Probenahme Variante extraktiv. Das AquaScat S ist im Preis nicht inbegriffen, dies wird für die Pilotphase ausgeliehen.	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. Das Trübungsmessgerät AquaScat S (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021a).....	8
Abbildung 5. Schematische Darstellung der Variante In-situ.	9
Abbildung 6. Schematische Darstellung der Variante extraktiv.	10
Abbildung 7 Zentrifugal-Pumpe für die kontinuierliche Probenahme, betrieben mit 24 VDC (SIGRIST-PHOTOMETER AG 2021b).	11
Abbildung 8 Ein wiederaufladbarer Lithium-Polymer Akku mit einer Nominalspannung von 25.9 Volt (Digitec Galaxus AG 2021a).....	13
Abbildung 9 Der vorgeschlagene DC/DC-Wandler RSD-30G-24 von Mean Well (Distrelec Schweiz AG 2021b).....	14
Abbildung 10 Der kompakte Datenlogger EL-USB-4 von Lascar (Distrelec Schweiz AG 2021a)	15
Abbildung 11 Klassierung flugfähiger Drohnen (UAVs): multi-rotor (a), fixed wing (b), and single-rotor (c) (Alhawi, Mustafa, und Cordeiro 2019)	16
Abbildung 12 Blockschaltbild einer multi-rotor Drohne für Remote Sensing (Torrico 2020)	17
Abbildung 13 Ardupilot entwickelt Autopilotssysteme für Helikopter, Flugzeuge, Boote und Rover (Ardupilot 2021b).....	18
Abbildung 14 Der Pixhawk 4 ist der aktuellste Autopilot von Pixhawk (Pixhawk 2021a)	19
Abbildung 15 Foto des Autopiloten Pixhawk 4 und das passende Zubehör (Holybro 2021a).....	21
Abbildung 16 Screenshot der Missionsplanung von QGroundcontrol, hier mit einer flugfähigen Drohne (Pixhawk 2021b).....	22

Anhang

Bill of Materials BOM

GPS-gesteuertes Boot zur ökohydrologischen Forschung	Anzahl	Art.nummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
AquaScat S, inklusive 10m Kabel	1	120498	Sigrist-Photometer	513	3264*
Gens Ace Gens LiPo-Akku 25.9V 5000mAh 45C 7S1P	1	12008575	Digitec.ch	805	135
RSD-30G-24, isolierter DC/DC-Wandler mit 1 Ausgang	1	301-56-967	Distrelec.ch	250	38.2
EL-USB-4 - Datenlogger	1	176-70-793	Distrelec.ch	18	85.5
Pixhawk 4 mit GPS und Powermanagement	1	SKU20034	holymbro	213	190
Telemetry Empfänger für Ground Control Station	1	17012A	holymbro	50	35
Voltic VLI20 LiFePO4 Lithium Versorgungsbatterie	1	14676792	Digitec.ch	2550	199
Subtotal				3886	682.7

Kopplung von ADCP und Trübungssonde, Variante in-situ	Anzahl	Art.nummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Bosch Rexroth Alu-Profil 40x40L, 2m	2	9945753	Galaxus.ch	4400	108.04
Bosch Rexroth Winkel 40x40mm, Nut 10mm	2	9945755	Galaxus.ch	152	24.8
Tauchrohr-Grundausrüstung, 1 m	1	120563	Sigrist-Photometer	540	222
Gehäuse 255 x 100 x 180 mm, Polycarbonat, IP67	1	150-62-955	Distrelec.ch	150	51.3
Subtotal				5242	406.14

Kopplung von ADCP und Trübungssonde, Variante extraktiv	Anzahl	Art.nummer	Lieferant	Gewicht [g]	Preis [CHF]
Bosch Rexroth Alu-Profil 40x40L 2m	1	9945753	Galaxus.ch	1200	54.02
Bosch Rexroth Winkel 40x40mm, Nut 10mm	3	9945755	Galaxus.ch	228	37.2
Messzelle für AquaScat S mit Wandhalterung	1	121090	Sigrist-Photometer	372	918
Pumpe mit Verschraubung	1	121467	Sigrist-Photometer	473	235
Gehäuse 255 x 100 x 180 mm, Polycarbonat, IP67	1	150-62-955	Distrelec.ch	150	51.3
Polyurethan Schlauch, 10mm, 20m	1	154-23-868	Distrelec.ch	54	38.67
Subtotal				2477	1334.19

GPS-gesteuertes Boot mit Variante in-situ	Gewicht [g]	Preis [CHF]
AquaScat S, inklusive 10m Kabel	513	3264*
Autopilotensystem Pixhawk 4	3886	682.7
Variante in-situ	5242	406.14
Total	9641	1088.84

GPS-gesteuertes Boot mit Variante extraktiv	Gewicht [g]	Preis [CHF]
AquaScat S, inklusive 10m Kabel	513	3264*
Autopilotensystem Pixhawk 4	3886	682.7
Variante extraktiv	2477	1334.19
Total	6876	2016.89

*Leihgabe, nicht im Total berücksichtigt

Evaluation Autopilot für RiverRobot R2V2, Yves Gubelmann, Stand 7.6.2021

Nutzwertanalyse	Gewicht [%]	Pixhawk 4 mini	Pixhawk 4	Pixhawk 3 Pro	Pixhawk 2	Auterion Skynode	mRo PixRacer Pro	mRo Control Zero H7	mRo Control Zero H7 OEM	mRo x2.1 Rev. 2	mRo X2.1-777	mRo Pixracer R15	Zuppa uav	Paparazzi UAV / Lisa M	RevoMini	Holybro Durandal	Pix32 v5	Beagle Bone Blue
Preis	20	6.52	5.66	5.26	5.4	3	5.4	5	5.4	6.68	6.5	6.5	3	5.76	3	5.7	6.44	8.29
Verfügbarkeit	20	10	10	1	10	5	3	1	1	3	1	1	5	1	1	10	10	10
Hardware Spezifikationen	20	4.3	5.15	6.76	3.68	1.47	6.18	5.88	6.76	3.38	3.38	5.88	1.54	3.38	1.54	7.65	5.15	2.43
Dokumentation	40	3	8	8	3	3	4	4	3	8	8	8	1	8	6	6	6	6
Total	100	5.36	7.36	5.8	5.02	3.09	4.52	3.98	3.83	5.81	5.38	5.88	2.31	5.23	3.51	7.07	6.72	6.54
Rang		9	1	7	11	16	12	13	14	6	8	5	17	10	15	2	3	4

Detaillierte Spezifikationen	Einheit	Pixhawk 4 mini	Pixhawk 4	Pixhawk 3 Pro	Pixhawk 2	Auterion Skynode	mRo PixRacer Pro	mRo Control Zero H7	mRo Control Zero H7 OEM	mRo x2.1 Rev. 2	mRo X2.1-777	mRo Pixracer R15	Zuppa uav	Paparazzi UAV / Lisa M	RevoMini	Holybro Durandal	Pix32 v5	Beagle Bone Blue
Preis		6.52	5.66	5.26	5.4	3	5.4	5	5.4	6.68	6.5	6.5	3	5.76	3	5.7	6.44	8.29
Orginalpreis (1)	USD	139	211	277	250	Auf Anfrage	250	350	250	130	140	140	Auf Anfrage	199	NA	205	143	82
Preis CHF	CHF	128	194	255	230	Auf Anfrage	230	322	230	120	129	129	Auf Anfrage	183	NA	189	132	75
Verfügbarkeit		10	10	1	10	5	3	1	1	3	1	1	5	1	1	10	10	10
Verfügbarkeit (1)	-	verfügbar	verfügbar	nicht verfügbar	verfügbar	Auf Anfrage	verzögert	nicht verfügbar	nicht verfügbar	verzögert	nicht verfügbar	nicht verfügbar	Auf Anfrage	nicht verfügbar	nicht verfügbar	verfügbar	verfügbar	verfügbar
Hardware Spezifikationen		4.3	5.15	6.76	3.68	1.47	6.18	5.88	6.76	3.38	3.38	5.88	1.54	3.38	1.54	7.65	5.15	2.43
Anzahl Aktuatoren	n	8	8	8	8	16	8	8	8	8	8	6	NA	6	8	8	8	8
Betriebsspannung	V	4.75 - 5.5	4.9 - 5.5	5.3	4.1 - 5.7	12 - 36	5 - 12	5	5	5	5	5	NA	5 - 16	5	4.9 - 5.5	4.9 - 5.5	7.4
Betriebsstrom	A	NA	NA	NA	2.5	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Hardware Interfaces		6	9	6	4	5	4	3	6	3	3	3	1	3	1	9	9	4
GPS on board	-	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	NA	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Inertial sensors on board	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	NA	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
I2C	n	2	3	2	1	2	1	1	3	1	1	1	NA	1	0	3	3	1
SPI	n	3	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	NA	1	1	4	4	2
CAN	n	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	NA	1	0	2	2	1
UART	n	0	0	0	5	8		6	5	5	5	5	NA	4	4	8	2	1
unterstützte RC Protokolle		2	2	4	2	0	4	4	4	2	2	4	1	2	1	4	2	1
Spektrum DSM	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	NA	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Futaba S.Bus	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	NA	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
FRSky	-	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	NA	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
Graupner SUMD.Yuneec ST24	-	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	NA	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
Dokumentation		3	8	8	3	3	4	4	3	8	8	8	1	8	6	6	6	6
Missionsplanung Software		QGC	QGC	QGC	QGC	Auterion Enterprise PX4	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot	ZAIP	Paparazzi	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot	Ardupilot
Open-source Hardware		Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Dokumentation		sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	genügend	genügend	gering	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gering	sehr gut	gut	gut	gut	gut
Anzahl Waypoints	n	NA	NA	NA	NA	5000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100	NA	NA	NA	NA	NA
Weiteres																		
Gewicht	g	37.2	15.8	NA	NA	188	9	12	4	15	15	10	NA	NA	NA	NA	NA	145
Gehäuse	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	nein	Ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	Ja	nein	nein
Anwendung	-	Entwickler	Entwickler	Entwickler	Entwickler	Industriell	Hobby	Hobby	Hobby	Hobby	Hobby	Hobby	Entwickler	Entwickler	Hobby	Entwickler	Entwickler	Entwickler
Hergestellt in		USA	USA	EU	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	Indien	USA	USA	USA	USA	USA
Link		Link	Link	Link	Link	Link		Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link	Link
Kommentar				end of life	Discontinued 2016	auf 59 Minuten limitiert	built in Wifi					ehemals R14, nun R15		Discontinued 2016	discontiuend			

PWRU1: Acoustic Doppler current profiler (ADCP) kombiniert mit Trübungssonde

INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN, Forschungsgruppe Ökohydrologie

Forschungsgruppe Ökohydrologie

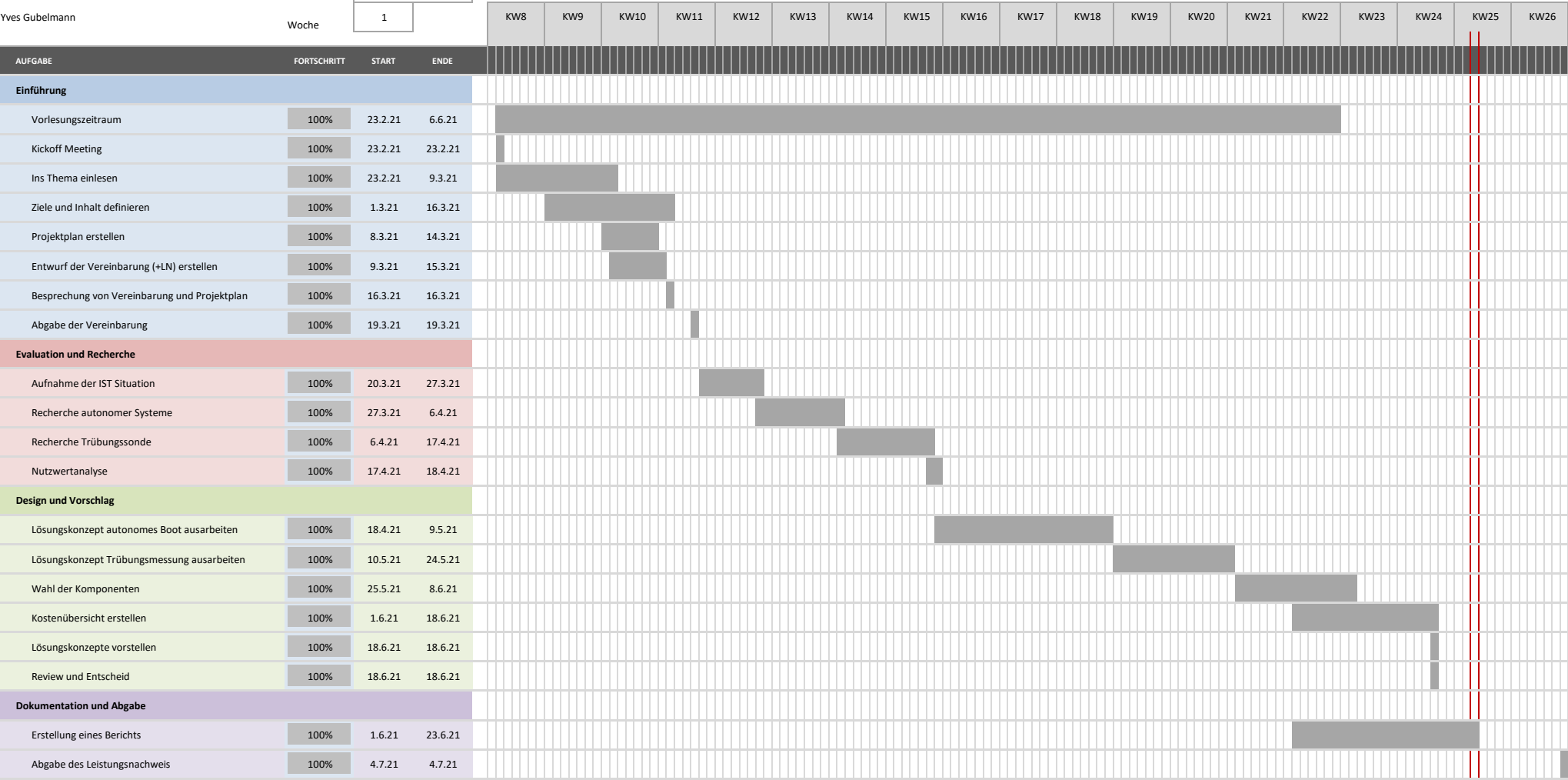
Yves Gubelmann

Start am

Mo, 2.22.2021

Woche

1



Neue Zeilen ÜBER dieser einfügen