



UNIVERSITÄT ZU LÜBECK

Aus dem Institut für Technische Informatik  
der Universität zu Lübeck  
Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. Mladen Berekovic

## **Der schwarmfähige Unterwasserroboter Monsun**

Inauguraldissertation  
zur  
Erlangung der Doktorwürde  
der Universität zu Lübeck  
Aus der Sektion Informatik/Technik

vorgelegt von  
Benjamin Meyer, M.Sc.  
aus Hagenow.

Lübeck, 2019

1. Berichtstatter  
2. Berichtstatter

Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle  
Prof. Dr.-Ing. Horst Hellbrück

Tag der mündlichen Prüfung

24.09.2019

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den

09.10.2019

## Vorwort

So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach der Zeit und den Umständen das Mögliche getan hat. //

//

--- Johann Wolfgang von Goethe

Die vor Ihnen liegende Dissertation ist für mich persönlich das Ende eines sehr langen Weges. Der Volksmund sagte schon immer, dass die Straße einem Reisenden nie sagt, was ihn am Ende seines Weges erwartet. Und dieses Sprichwort gilt auch hier. Ich begann meine Arbeit am Institut für Technische Informatik in meinem ersten Studiensemester an der Universität zu Lübeck im Jahr 2007, welches mittlerweile schon zwölf Jahre in der Vergangenheit liegt. Ich weiß noch genau, wie ich am Ende der Vorlesung *Einführung in die Robotik und Automation* aufgeregt zu dem Dozenten Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle ging und ihn fragte, ob es die Möglichkeit gebe, neben dem Studium als studentische Hilfskraft an seinem Institut zu arbeiten. Erfreut über die Anfrage wurde ich direkt einem Mitarbeiter am Institut zugewiesen, welches ich bis heute nicht mehr verlassen habe. Weder ich, noch mein Doktorvater Herr Maehle wussten wohl damals, welche Auswirkungen diese Entscheidungen auf uns beide haben würde.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Erik Maehle für die jahrelange Förderung und Betreuung in hohem Maße, denn er war es auch, der mich überhaupt auf den Weg zu meiner wissenschaftlichen Tätigkeit gebracht hat. Das Institut für Technische Informatik ist über die Zeit zu einer zweiten Heimat geworden und ich habe viele tolle Kollegen kennenlernen dürfen, worüber ich sehr dankbar bin. Ich durfte eine Reise quer durch die Robotik miterleben, über Laufmaschinen und Humanoiden, bis hin zu den Unterwasserrobotern, die mich seit dem nicht mehr losgelassen haben. Ich durfte das Institut beim SAUC-E Wettbewerb in Italien vertreten und als Krönung den „Europameister Titel“ entgegennehmen. Ich durfte an Messen und Konferenzen in vielen tollen Ländern teilnehmen, mich persönlich weiterentwickeln und Erfahrungen sammeln, die ich nie wieder missen möchte.

Während dieser Reise entstand über Jahre der Unterwasserroboter Monsun, dessen Entwicklung das Zentrum meiner Dissertation bildet. Mit Stolz blicke ich auf den Roboter und dieses entstandene Werk, welches gleichermaßen seinen und meinen Werdegang beschreibt. Doch sobald man in einer Sache Meister geworden ist, soll man in einer neuen Schüler werden.



## Kurzfassung

Albert Einstein sagte vor langer Zeit, die Phantasie sei wichtiger als Wissen, denn das Wissen ist begrenzt. Und genau diese Phantasie war es, die die Entwicklung des Monsun AUVs ermöglichte und diesem Roboter ist die vor Ihnen liegende Dissertation gewidmet. Unsere Zeit ist geprägt durch den Wandel der uns umgebenden Umwelt und den dadurch hervorgerufenen Naturphänomenen, für die Gründe und Erklärungen gesucht werden. Der Forschungsbereich des Umweltmonitorings beschäftigt sich mit der Bestandsaufnahme unserer Welt und besonders das Gewässermonitoring erfordert einen immensen Aufwand an Datenerhebungen und Vermessungen, da zwei Drittel der Erde von Wasser bedeckt sind. Um die Veränderungen der verschiedenen Lebensräume erkennen zu können, ist ein periodisches und flächendeckendes Monitoring alternativlos und mit konventionellen Methoden kaum zu bewerkstelligen.

Immer wenn die sich ergebende Aufgabe zu groß oder komplex erscheint, liegt es in der Natur des Menschen, sich Hilfsmittel zur Erleichterung zu erstellen. So ist es nicht verwunderlich, dass die autonomen Unterwasserfahrzeuge schnell ins Auge des Betrachters fielen, um bei den Aufgaben des Monitorings zu helfen. Die vorhandenen Systeme waren allerdings vor allem für den Einsatz auf offenem Meer konzipiert, kostspielig und nicht einfach an die Aufgaben anzupassen. Diese Arbeit beschreibt daher die Entwicklung des schwarmfähigen Unterwasserroboters Monsun, der mit dem Ziel entworfen wurde, durch ein flexibles und modulares Design für viele Missionen geeignet zu sein, um dort eingesetzt werden zu können, wo große AUVs ungeeignet erscheinen. Nacheinander werden alle Komponenten des Roboters Monsun genau beschrieben, bis sie sich final zu einem vergleichsweise kleinen Roboter zusammensetzen. Neben der großen Modularität zeichnet sich Monsun besonders durch seine Schwarmfähigkeit aus. Er kann zusammen mit anderen seines Typs Aufgaben in einer Gruppe von Robotern erfüllen. Positiv sind die sich ergebenden zusätzlichen Möglichkeiten durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Einheiten, wie beispielsweise die Unterwasserlokalisierung anhand von Entfernungsmessungen, wodurch teure Spezialelektronik nicht benötigt wird.

Neben verschiedenen Experimenten und Versuchen zur Präsentation der Funktionsweise des Roboters wird als zentrale Evaluation die Expedition Uhrwerk Ozean präsentiert und die gewonnenen Daten des mehrwöchigen Einsatzes aufgearbeitet. Das Ergebnis der Arbeit ist ein flexibler Unterwasserroboter, der die Basis für viele weitere Ideen und Einsätze bietet, die heute noch in der Phantasie des Betrachters liegen.



## Abstract

Albert Einstein said long time ago, imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited, whereas imagination embraces the entire world, stimulating progress, giving birth to evolution. Thus, this imagination made the development of the Monsun AUV possible, which is the robot dedicated to in this work. Our age is characterised by the change of our surrounding environment and caused natural phenomena. The aim is to find explanations and reasons for these effects. The research field of Environmental Monitoring deals with the survey of the world and especially monitoring of water bodies requires tremendous effort in data collection and measurements, because of two thirds of earth's surface is covered with water. To be able to identify changes in different habitats, a periodical and extensive monitoring is needed, which is difficult to achieve with conventional methods.

Whenever the resulting task is too complex for solving with nowadays resources, it is in the human nature to search for a tool for relief. Therefore, it is not surprising, that autonomous underwater vehicles arouse interest to help with the monitoring. However, the existing systems were primary designed to drive in open waters, expensive and not easily adaptable to needed missions. Therefore, this work describes the design of the swarm-capable underwater robot Monsun, flexibly developed towards the goal to be applicable for a large number of missions and to be used in areas not suitable for larger AUVs. One by one all components of the robot are described to be finally assembled to a comparable small underwater robot. Besides large modularity in design, the robot is characterized by its capability to drive in a swarm. It is possible to move in a team of robots to fulfil the missions. Thus, a wider range of possibilities is given due to the simultaneous use, for instance underwater localisation with the help of distance measurements instead of expensive sensors. Besides various experiments and trials to present general functioning of the robot, the Expedition Clockwork Ocean will be presented as central evaluation point and gathered data is processed. The flexible Monsun AUV is the result of the work, which acts as a starting point for new ideas and possible applications in the imagination of the viewer.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	2
1.2. Ziel und Aufbau dieser Arbeit . . . . .	3
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1. Autonome Unterwasserfahrzeuge . . . . .	5
2.2. Historische Entwicklung . . . . .	6
2.3. Schwarmverhalten . . . . .	8
2.3.1. Das GREX-Projekt . . . . .	9
2.3.2. Das MORPH Projekt . . . . .	11
2.4. Aktueller Stand der Forschung . . . . .	15
2.4.1. SeaCat . . . . .	16
2.4.2. Girona G500 . . . . .	18
2.4.3. Medusa AUV . . . . .	20
2.4.4. APIUM SwarmDiver . . . . .	22
2.4.5. CoCoRo . . . . .	24
2.4.6. Serafina und Hydromea . . . . .	26
2.4.7. HANSE . . . . .	28
2.4.8. SMART-E . . . . .	30
2.4.9. SEMBIO AUV . . . . .	33
<b>3. Umweltmonitoring</b>	<b>35</b>
3.1. Düstere Prognosen . . . . .	36
3.2. Ein globales Phänomen . . . . .	39
3.3. Grundlagen des Gewässermonitorings . . . . .	40
3.4. Expedition Uhrwerk Ozean . . . . .	50
3.5. Aktuelle Beobachtungsverfahren . . . . .	52
<b>4. Der Roboter Monsun</b>	<b>57</b>
4.1. Innovative Designkonzepte . . . . .	58
4.1.1. Robustheit . . . . .	60

4.1.2.	Modularität . . . . .	61
4.1.3.	Adaptabilität . . . . .	62
4.1.4.	Skalierbarkeit . . . . .	62
4.2.	Wasserdichter Korpus . . . . .	63
4.3.	Elektronik und Komponenten . . . . .	65
4.4.	Sensorik und Aktorik . . . . .	67
4.5.	Modulares Erweiterungspaket . . . . .	71
4.5.1.	Optischer Distanzsensor . . . . .	71
4.5.2.	Bildgebende Sensorik . . . . .	73
4.5.3.	Sonare und Echo-Sounder . . . . .	77
4.5.4.	Visuelles Feedback . . . . .	80
4.5.5.	Wasserproben Extraktion . . . . .	81
4.5.6.	Umweltsensorik . . . . .	83
4.5.7.	Unterwasserkommunikation . . . . .	86
4.5.8.	Verstärkungen für offene Gewässer . . . . .	88
4.5.9.	Aktuelle Konfiguration . . . . .	91
4.6.	Kontrollsoftware . . . . .	92
4.7.	Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten . . . . .	95
<b>5.</b>	<b>Experimente und Evaluation</b>	<b>99</b>
5.1.	Paradigmen und Verhalten der mobilen Robotik . . . . .	100
5.2.	Fahrtregelung . . . . .	102
5.3.	Grundfunktionalitäten . . . . .	109
5.4.	Evaluation der Umweltsensorik . . . . .	112
5.5.	Evaluation des Sonars . . . . .	114
5.6.	Kommunikation mehrerer Roboter . . . . .	115
5.7.	Küstennaher Einsatz . . . . .	122
5.7.1.	Vergleichsmessungen Umweltsensorik . . . . .	122
5.7.2.	Kooperierende Schwarmverhalten für Umweltmonitoring . . . . .	123
5.8.	Einsatz auf offenem Meer . . . . .	126
5.8.1.	Ablauf der Experimente . . . . .	126
5.8.2.	Messergebnisse . . . . .	127
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
6.1.	Weiterentwicklung des Roboters . . . . .	137
6.2.	Weitere Anwendungen . . . . .	139
<b>A.</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>143</b>
Tabellenverzeichnis . . . . .		143
Abbildungsverzeichnis . . . . .		145
Betreute Abschlussarbeiten . . . . .		147
Eigene Publikationen . . . . .		149
Literaturverzeichnis . . . . .		153
<b>B.</b>	<b>Persönliche Informationen</b>	<b>161</b>
B.1.	Curriculum Vitae . . . . .	161

# 1

## Einleitung

Wenn das Leben keine Vision hat, nach der man sich sehnt, die man verwirklichen möchte, dann gibt es auch kein Motiv, sich anzustrengen.

//

--- Erich Fromm

Wer nicht neugierig ist, der erfährt auch nichts, denn die Voraussetzung für das Wissen ist die Neugier. Dieser Drang ist in allen Bereichen unseres Lebens zu finden und letztendlich die Triebfeder für den Fortschritt. In der heutigen Zeit des technologischen Fortschritts fehlt oftmals die Zeit der Konsolidierung und besonders der Bereich der Robotik eilt von einer Entwicklung zur nächsten. Begünstigt ist dies natürlich durch die Entwicklungen in der Digitaltechnik, die immer leistungsstärkere und gleichzeitig kleinere elektronische Schaltungen und Rechenwerke realisiert. Eine Eigenschaft des Menschen war schon immer, sich Hilfsmittel für Aufgaben zu erstellen, die er mit seinen eigenen angeborenen Fähigkeiten nicht effektiv zu leisten vermag. So wurden die ersten Roboter auch als Handhabungsgeräte tituliert, da sie dem Bediener zur Hand gehen und ihm bei seiner Aufgabe, vor allem anfänglich in der industriellen Automation, helfen. Die Robotic Industries Association *RIA* definierte daher Roboter wie folgt:

„Ein Roboter ist ein programmierbares Mehrzweck-Handhabungsgerät für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten. Der frei programmierbare Bewegungsablauf macht ihn für verschiedenste Aufgaben einsetzbar.“

Mit der Zeit wurden die Roboter aber mobil und werden heutzutage überall auf der Welt für immer mehr Aufgaben eingesetzt. Die Entwicklung verläuft in einigen Fällen so schnell, dass Regelungen für den Umgang mit ihnen nur provisorisch ausgearbeitet werden können und es keine Richtlinien gibt. Als Beispiel kann hier die Entwicklung der Flugdrohnen angesehen werden, die heutzutage überall auf dem Markt zu finden sind, und dem Nutzer die Möglichkeit zum Fliegen bieten. Durch die Vielzahl an neuartigen Möglichkeiten durch die Robotik kamen in der vergangenen Zeit immer mehr Anwendungsfelder zum Vorschein, die vorher noch nicht betrachtet wurden. Ein wichtiges Betätigungsfeld ist aktuell der Bereich der Unterwasserrobotik. Nur 5 % der Meere unseres Planeten sind erforscht und viele Forscher behaupten sogar, dass über die Oberflächen von Mond und Mars mehr bekannt ist, als über den Meeresboden auf der Erde. Gleichzeitig kommt hinzu, dass der Lebensraum Wasser aufgrund des Klimawandels stark bedroht ist und dringend Hilfsmittel benötigt werden, um das genaue Maß zu erfassen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Diese Arbeit befasst sich aufbauend darauf mit der Entwicklung des schwarmfähigen Unterwasserroboters Monsun im Kontext des Umweltmonitorings und das folgende Kapitel liefert die Einleitung dazu.

### 1.1. Motivation

Das Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck begann im Jahr 2008 mit den ersten Projekten aus dem Bereich der Unterwasserrobotik. Der Forschungsbereich war noch relativ jung und schnell erkannte man, dass hiermit grenzübergreifend wissenschaftliche Erfolge gefeiert werden konnten. Der Fokus lag nicht primär auf der Entwicklung von Robotern, sondern es wurde aus Sicht der Informatik an die offenen Probleme herangetreten, um die diese zu definieren und mit entsprechenden Algorithmen zu lösen.

Die Unterwasserrobotik war geprägt von Hochleistungsfahrzeugen, hauptsächlich hergestellt von Spezialisten aus den Bereichen Maschinenbau und Elektrotechnik. Sie waren ausgestattet mit den effizientesten Sensoren, wurden aber hauptsächlich noch von Hand gesteuert und besaßen nur wenig Autonomie. Solche AUVs (engl. für *Autonomous Underwater Vehicle*) sind sehr kostspielig und waren daher nicht verfügbar, um die erdachten Algorithmen zu evaluieren. Aus diesem Grund begann man zeitnah mit der Entwicklung von Prototypen aus eigener Herstellung. Da auch die spezialisierte Sensorik für den Unterwasserbereich ebenfalls den finanziellen Rahmen der Projekte überstieg, entschloss man sich direkt zu Beginn, unkonventionelle Wege zu gehen und die Idee des Monsun Roboters war geboren, welchem diese Dissertation gewidmet ist.

Das Monsun AUV ist ein vergleichsweise kleiner Unterwasserroboter, der allerdings dank sechs Motoren mit einer sehr hohen Beweglichkeit unter Wasser ausgerüstet ist. Er war von vornherein so ausgelegt, intelligente Algorithmen aus dem Bereich der Schwarmrobotik zu nutzen, um in einer Gruppe von kleinen und preiswerten Robotern Missionen zu erfüllen, für die sonst ein großes kommerzielles AUV herangezogen

werden musste. Dieses Prinzip beinhaltet mehrere Vorteile: Der wichtigste Punkt ist, dass der Roboter im Institut für Technische Informatik mit geringem Preisaufwand und eigenen Mitteln hergestellt werden kann. Weiterhin sind die Kosten für Versuche und Experimente vergleichsweise sehr niedrig, da zum Einsatz der Roboter keine weiteren Hilfsmittel benötigt werden. Sie können einfach von Hand im Wasser ausgesetzt werden und auch der Transport ist ohne Schwierigkeiten möglich. Die kleine Bauweise ermöglicht es, den Roboter auch in flacheren Gewässern und schwer zugänglichen Stellen einzusetzen, da er auch Drehungen auf sehr kleinem Raum ermöglicht. Der Einsatz eines Schwarms von Monsun AUVs generiert weiterhin Fähigkeiten, die sonst nur mit teurer Spezialelektronik zu erhalten sind. So kann eine Lokalisation einzelner Roboter unter Wasser durch Entfernungsmessungen geschehen, und die Genauigkeit lässt sich durch die Redundanz der Informationen noch weiter steigern. Abschließend ist der Roboter dank seines modularen Konzepts in der Lage, verschiedenste Sensorik und Erweiterungsmodule aufzunehmen, wodurch ihm ein großes Spektrum von Missionen ermöglicht wird.

Die folgenden Seiten geben einen Überblick über das Monsun AUV und seiner Verwendung. Zu den aktuellsten Einsatzgebieten gehört in den Zeiten des Klimawandels in besonderem Maße das Umweltmonitoring, welches daher besonders unter dem Gesichtspunkt des Robotereinsatzes und dem daraus resultierendem Nutzen behandelt wird.

## 1.2. Ziel und Aufbau dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die ausführliche Beschreibung der Entwicklung des autonomen und schwarmfähigen Unterwasserroboters Monsun und seinen Einsatzmöglichkeiten im Rahmen des Umweltmonitorings. Hierfür werden anfänglich im **Kapitel 2** aktuelle AUVs beschrieben und ihre Eigenschaften mit denen von Monsun verglichen, um die Einzigartigkeit des Systems herauszuarbeiten. Bei den Vergleichen zwischen den Systemen wird besonderes Augenmerk auf die Leistungsfähigkeit der AUVs gelegt und ihre Einsatzmöglichkeiten verglichen. Weiterhin werden mit *GREX* und *MORPH* zwei bekannte europäische Projekte beschrieben, um auf die Besonderheiten von intelligentem Schwarmverhalten unter Wasser genauer einzugehen.

Das **Kapitel 3** liefert eine Einleitung in die Thematik des Umweltmonitorings und die aktuell angestiegene Notwendigkeit der Untersuchung und Überwachung des Lebensraums Wasser auf unserer Erde. Besonderer Wert wird auf die zu untersuchenden Parameter gelegt und die Möglichkeiten aufgezeigt, wie autonome Messsysteme bei der Erhebung der Daten helfen.

Das **Kapitel 4** beschreibt detailliert die Entwicklung des Monsun AUVs. Die Besonderheiten des Fahrzeugs hinsichtlich Flexibilität und Modularität werden besonders beleuchtet und alle Elemente des Roboters einzeln nacheinander beschrieben. Im **Kapitel 5** werden Experimente und Messkampagnen zur qualitativen Bewertung des Roboters gezeigt, bevor abschließend in **Kapitel 6** die Arbeit zusammengefasst und ein Blick in die Zukunft geworfen wird.



# 2

## Stand der Technik

Wer vor der Vergangenheit die Augen  
verschließt, wird blind für die Gegenwart.

//

--- Albert Einstein

### 2.1. Autonome Unterwasserfahrzeuge

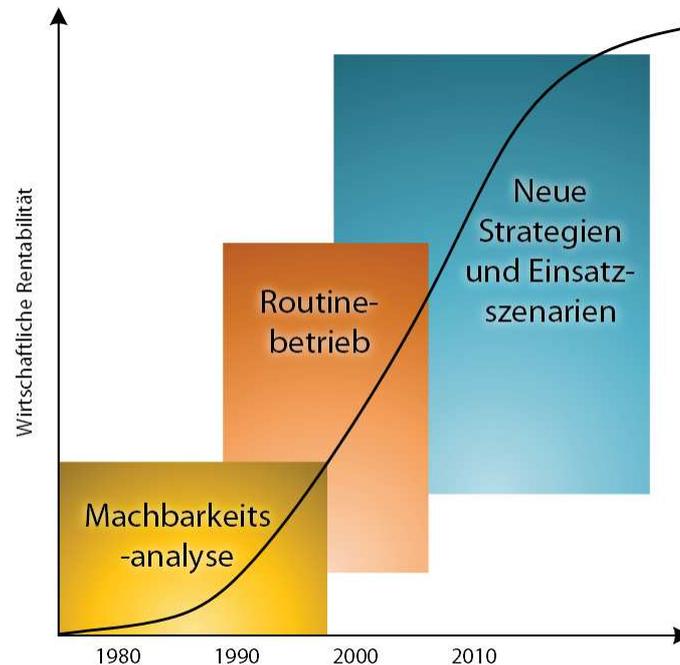
Der Wunsch des Menschen, länger und tiefer zu tauchen als seine Lungenkapazität es zulässt, ist etwa ebenso alt wie der Wunsch zu fliegen. Das Konzept von Unterwasserfahrzeugen lässt sich nachweislich bis in das 17. Jahrhundert zurückverfolgen, obwohl es schon technische Zeichnungen gibt, die sogar bis in das 13. Jahrhundert zurückdatiert werden können. Aus Holz und verstärkten Eisenringen wurde 1776 eine Ei-förmige Form namens *Turtle* entworfen, welche Platz für eine Person im Inneren bot, die dieses Boot über Handkurbeln und Propeller antreiben konnte, womit es heutzutage als erstes richtiges Unterwasserfahrzeug angesehen wird. Mithilfe von Ventilen und einfachen Pumpen konnte ein Ballasttank wahlweise mit Wasser gefüllt werden, um das Gefährt abtauchen zu lassen. Kleine, durch Muskelkraft betriebene Propeller dienten dem Insassen zusätzlich zur Steuerung. Fürs Militär entwickelt wurde das Fahrzeug 1776 einmalig eingesetzt, wodurch die Schlacht im New Yorker Hafen bis heute als diejenige gilt, in der erstmalig ein Unterwasserfahrzeug eingesetzt wurde [1]. Die Entwicklung von tauchfähigen Fahrzeugen nahm ab diesem Zeitpunkt ihren Lauf und war hauptsächlich militärisch motiviert. So ist es auch nicht verwunderlich, dass die ersten autonomen Unterwasserfahrzeuge Torpedos waren, die von U-Booten abgefeuert wurden.

Bei der Kategorisierung von Unterwasserfahrzeugen verwendet man seit dieser

Zeit verschiedene Unterscheidungsmerkmale. So werden generell die Fahrzeuge anhand der Eigenschaft unterschieden, ob sie bemannt oder unbemannt sind. Die unbemannten Fahrzeuge können weiter in drei große Untergruppen unterteilt werden. Die einfachste Gruppe dieser Unterwasserfahrzeuge sind nicht motorisierte Tauchboote, welche von einem Schiff an einem Seil hinterher gezogen werden. Diese Fahrzeuge sind oftmals mit mehreren Sonden ausgestattet, und ermöglichen eine Datenaufnahme in einer bestimmten Tiefe, welche dem Schiff selber nicht möglich ist. Ein zweiter Typus von Unterwasserfahrzeugen sind ferngesteuerte und kabelgebundene Roboter, auch als ROVs (*engl. für Remotly Operated Vehicles*) bezeichnet. Diese sind ebenfalls fest mit einem Schiff verbunden, allerdings dient die Kabelverbindung nicht nur zum Halt, sondern auch zur Stromübertragung und bidirektionaler Kommunikation mit dem Fahrzeug. Das Fahrzeug selbst verfügt neben Sensoren auch über Aktoren für eigene Fahrmanöver. Diese sind aber nicht vorprogrammiert, sondern werden zur Laufzeit von einem Anwender an Bord des Schiffes über das Kabel gesteuert. Die dritte Fahrzeugklasse bilden die unbemannten nicht kabelgebundenen Fahrzeuge (*engl. Unmanned Untethered Vehicles (UUV)*). Diese besitzen eine eigene Energieversorgung, werden aber noch von einem Anwender über einen zur Verfügung stehenden Kommunikationskanal gesteuert. Entfällt diese Steuerung von Außen, werden die Fahrzeuge als AUVs (*engl. für Autonomous Underwater Vehicles*) bezeichnet. Sie besitzen eine eigene Energieversorgung und steuern sich selbst, während sie eine vorher definierte Aufgabe mit bordeigenen Mitteln durchführen. AUVs benötigen während des Einsatzes keine Kommunikation mit der Außenwelt, sofern dies nicht für die Mission gewünscht ist, wodurch sie sich auch in diesem Punkt von UUVs weiter unterscheiden [2].

## 2.2. Historische Entwicklung

Die historische Entwicklung autonomer Unterwasserfahrzeuge begann vor mehr als 60 Jahren und die verschiedenen Entwicklungsschritte helfen sehr gut beim Verständnis der aktuellen Fahrzeuge und dem Nutzen, der sich aus dem Einsatz dieser erhofft wird. In den 1960er Jahren wurden erstmals einige AUVs gebaut, welche auf ganz spezialisierte Aufgaben zugeschnitten waren und vor allem für das Sammeln von Daten entwickelt wurden. Allerdings gibt es keine nennenswerte Anzahl von zur Verfügung stehenden Papern und Berichten, die über die ersten Schritte der autonomen Unterwasserfahrzeuge berichten. Zwischen den Jahren 1970 und 1980 konnten aufgrund der fortschreitenden Technik im Bereich der computergestützten Systeme erste Testumgebungen für AUVs aufgebaut werden. Die Universität Washington entwickelte die Fahrzeuge UARS und SPURV um Daten in den arktischen Regionen zu sammeln. Das Marine Systems Engineering Laboratory der Universität von New Hampshire entwickelte zusammen mit der US Navy das Fahrzeug EAVE, welches als erstes von einem offenen äußerem Rahmen gestützt wurde. Auf der anderen Seite der Welt wurden in der Russischen Akademie der Wissenschaften die SKAT Fahrzeuge entwickelt, sowie die ersten tiefseegeeigneten Fahrzeuge L1 und L2. Es war eine Zeit der Experimente mit der neuen Technologie, um das Potential der neuen autonomen Systeme herauszufinden. Es wurden viele



**Abbildung 2.1.:** Eine sehr wahrscheinliche Prognose der Entwicklung von einfachen ersten Prototypen bis hin zu vollständig einsatzfähigen AUVs ist beschrieben mit der illustrierten S-Kurve. Diese ist abgeleitet von der Einführung neuartiger Technologien im Bereich der computergestützten Elektronik und integrierter Steuerungen. Ab dem Jahr 2000 waren die Fahrzeuge bereits so weit, dass sie rentabel wurden und die Erfahrungen aus der Wirtschaft und dem einhergehenden Routinebetrieb führten wieder zu neuen Entwicklungen in der Forschung. Die Größe der illustrierten Kästen entspricht dabei der Anzahl an verschiedenen zur Verfügung stehenden Plattformen auf dem Markt [2].

Fortschritte gemacht, aber auch viele Fehler, da die von den Wissenschaftlern entwickelte Vision der autonomen Unterwasserfahrzeuge die zu dieser Zeit vorherrschenden technologischen Möglichkeiten stark überschritten [3].

In den 1980er Jahren kam es zu einer Vielzahl von technologischen Entwicklungen, welche auch stark den Bereich der autonomen Unterwasserfahrzeuge beeinflussten. Kleinere und vor allem leistungstärkere Computer mit größerem Speichervermögen erlaubten es, auch komplexere Algorithmen und Kontrollarchitekturen in autonomen Plattformen zu implementieren. Die Fortschritte bei den Softwaresystemen ermöglichten es erstmals, einige Visionen von autonomen Verhalten zu realisieren, allerdings wurde auch schnell deutlich, dass noch eine große Entwicklung vor diesem Forschungszweig stand. Mit dem *International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology* wurde die erste internationale Konferenz auf diesem Gebiet veranstaltet und öffentliche Förderungen ermöglichten Entwicklungen von neuen Prototypen. Mit der Zeit wurde deutlich, dass die durchgeführte Forschung zu einsatzbereiten Fahrzeugen führen würde, allerdings waren die angedachten Missionen für die AUVs noch nicht deutlich.

Die Jahre zwischen 1990 und 2000 führten dazu, dass aus den Machbarkeitsstudien

der ersten AUVs die erste Generation von einsatzbereiten Fahrzeugen wurden, die verschiedene Arten von Missionen erfüllen konnten. Potentielle Nutzer und Organisationen definierten genauere Missionen und Aufgaben, besonders im Bereich der Sammlung ozeanischer Daten. Neue Paradigmen für den Einsatz der Fahrzeuge, wie zum Beispiel das *Autonomous Oceanographic Sampling Network (AOSN)*, beschafften die benötigten Ressourcen, um die autonomen Fahrzeuge dichter an die Kommerzialisierung zu bringen [4]. Mit dem Beginn des neuen Jahrtausends ist die Benutzung von AUVs für viele kommerzielle Aufgaben klar ersichtlich und viele Organisationen, welche die Fahrzeuge herstellen, vertreiben und einsetzen, sind bereits finanziell sehr erfolgreich. Vielfältige Märkte entstehen und die autonomen Unterwasserfahrzeuge haben sich von reinen Forschungsfahrzeugen zu standardisierten Mitteln der Meerestechnologie entwickelt. Trotzdem ist der Forschungsbedarf immer noch sehr groß. So sind die einsetzbaren Sensoren für die Unterwasserfahrt immer noch nicht mit denjenigen an Land zu vergleichen und die Kommunikationsmöglichkeiten mit den Fahrzeugen bleiben eingeschränkt. Auch die Miniaturisierung wird stetig voran getrieben, um die Flexibilität der Fahrzeuge zu erhöhen [2].

### 2.3. Schwarmverhalten

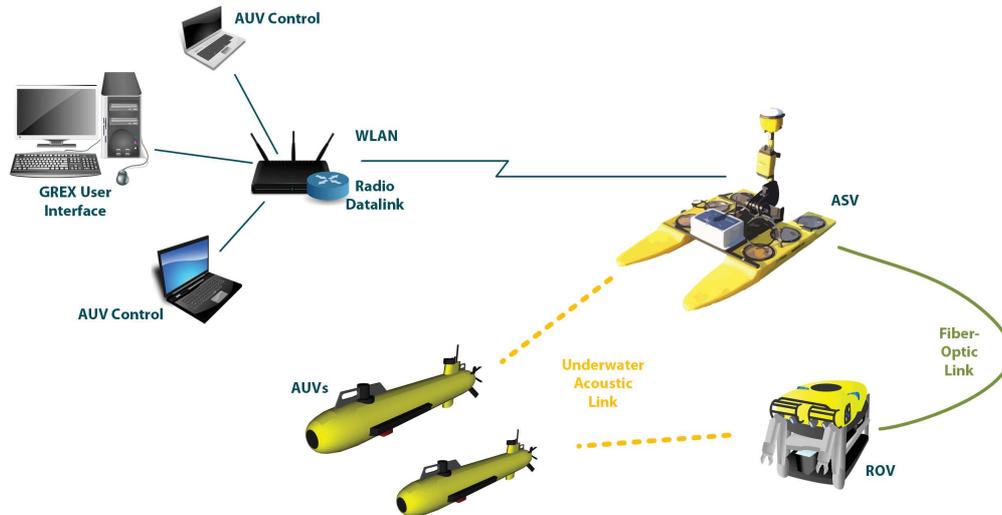
Die verschiedenen Anwendungsgebiete zeigen deutlich, dass eine Nutzung von mehreren Robotern in Kombination sehr hilfreich sein kann. In einem sogenannten Schwarm von Individuen können vorhandene Fähigkeiten einzelner Roboter so eingesetzt werden, dass ein Mehrwert erreicht werden kann. So können Roboter mit der Fähigkeit der Kartografierung und Vermessung dazu verwendet werden, Fahrzeuge mit integrierten Manipulatoren in das Einsatzgebiet zu dirigieren. Es können Roboter zur Missionsüberwachung und Dokumentation eingesetzt werden, die die eigentlichen zur Mission verwendeten Fahrzeuge begleiten und die Aufgaben protokollieren. In Kombination mit anderen AUVs können Hilfestellungen für die Navigation geleistet werden, oder einige Roboter als Relaisstationen in einem Kommunikationsnetzwerk dienen. Diese Ideen sind auch der Tatsache geschuldet, dass es auf dem Markt viele verschiedene Plattformen gibt, die aber als einzelnes Fahrzeug nicht über alle Fähigkeiten verfügen, die für komplexe Missionen nötig sind. Der Kostenfaktor bedingt auch, dass viele Forschungsinstitute oftmals nur wenige Exemplare eines AUVs besitzen und für die Erforschung von Schwarmverhalten Konsortien bestehend aus mehreren Mitstreitern gegründet werden, die alle ihre Fahrzeuge mit einbringen, um dann zusammen an Schwarmalgorithmen zu arbeiten. Einige Aufgaben verdeutlichen direkt den Mehrwert, wenn sie mithilfe eines Schwarms von Unterwasserrobotern durchgeführt werden könnten. Besonders ist dies bei Kartographierungsaufgaben des Meeresgrunds zu beobachten. Für die Aufnahme des Bodens werden spezielle Kameras und bildgebende Sonare verwendet, die zwar eine hohe Auflösung haben, allerdings nur einen eingeschränkten Betrachtungswinkel, da sie in einem geringen Abstand zum Grund betrieben werden. Der naheliegende Einsatz von mehreren Robotern parallel in zugewiesenen Korridoren würde die **Effizienz** des eingesetzten Systems erheblich erhöhen,

wodurch die Zeit im Wasser verringert werden könnte. Dieses Beispiel verdeutlicht mit der Effizienzsteigerung einen der wichtigsten Grundpfeiler beim Einsatz von Roboterschwärmen. Weitere fundamentale Eigenschaften sind die Steigerung der **Effektivität**, der **Fehlertoleranz** und der **Redundanz**. So ist der Einsatz von Unterwasserrobotern in Suchfunktionen nur dann effektiv, wenn das gesuchte Ziel gefunden wird. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist bei der Verwendung eines Schwarm von Fahrzeugen viel höher, wodurch die Effektivität des Verhaltens steigt. Ein weiterer Grundpfeiler ist in der erhöhten Fehlertoleranz gegeben. Bei dem Einsatz eines einzelnen Roboters können bereits kleine Fehler zu einem Abbruch der Mission führen. Werden hingegen mehrere Roboter eingesetzt, bedeutet der Ausfall eines Schwarmmitglieds noch nicht gleichzeitig das Scheitern der gesamten Mission, sofern andere Roboter den Ausfall einzelner kompensieren. Die Eigenschaft der Redundanz ist besonders bei der Erfassung von Messdaten und der fehleranfälligen Unterwasserkommunikation wichtig. Mit ihr können fehlende Informationen rekonstruiert werden und es ergibt sich ein Gesamtbild, welches von einem einzelnen Roboter nicht geleistet werden kann.

### 2.3.1. Das GREX-Projekt

Im Jahr 2006 wurde das GREX-Projekt (*lateinisch u.a. für Schwarm*) unter der Leitung der Atlas Elektronik GmbH aus Bremen gestartet. Das vorrangige Ziel war die Bündelung von Wissen und Ressourcen mehrerer Forschungsinstitute aus dem Bereich der autonomen Unterwasserrobotik. Eine Kombination der verschiedenen vorhandenen AUVs sollte die Forschung und Entwicklung der Schwarmrobotik unter Wasser effektiver voran treiben und eine Brücke über die Lücke zwischen vielen Konzepten und der eigentlichen Umsetzung schlagen. Hierfür sollte eine Kontrollsoftware entwickelt werden, die mehrere Konzepte der Schwarmrobotik umsetzt und als High-Level Struktur über den eigentlichen Robotersteuerungen angesiedelt ist. Die Software musste generisch aufgebaut sein, da die heterogenen Systeme der Projektpartner verschiedene Steuerungen verwenden und nicht verändert werden konnten. Als weitere Voraussetzung wurde eine erhöhte Robustheit gefordert, da die Steuerung auch mit der fehleranfälligen Kommunikation unter Wasser weiter funktionieren sollte.

Die Kontrollsoftware wurde unter der Prämisse entworfen, dass mit ihr Missionen durchgeführt werden können, die folgendes voraussetzen: Es wurde festgelegt, dass die angedachte Mission mehrere intelligente Fahrzeuge benötigt, um effektiv durchgeführt werden zu können. Weiterhin sei die Koordination der Schwarmmitglieder abhängig von den Daten, die zur Laufzeit der Mission gewonnen werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Suche nach Hydrothermalquellen auf dem Meeresgrund. Diese Quellen sind für die Meeresbiologie besonders von Interesse, da sie heißes Wasser und Gase an die Oberfläche befördern, die eine besondere Flora und Fauna in ihrer Umgebung hervorrufen. Neben dem dort ausgestoßenem Treibhausgas Methan ist auch eine ansässige Tiefseemuschel von Interesse, die in ihren Kiemen symbiotische Bakterien beherbergt, von der sie ihre Nahrung erhält. Die autonome Mission basiert auf dem Wissen, dass die Quellen Methan ausstoßen, welches sich unter Wasser nicht direkt auflöst und daher von Messsonden detektiert werden



**Abbildung 2.2.:** Verteilung von autonomen Fahrzeugen und Steuereinheiten im GREX-Projekt. Jeder Roboter besitzt hierfür einen eigenen Steuerrechner, welche mit der GREX Benutzungsschnittstelle in einem drahtlosen Netzwerk verbunden sind. An der Wasseroberfläche dient ein ASV (engl. für *Autonomous Surface Vehicle*) als Relaisstation, welche akustisch oder per Kabel mit den getauchten Einheiten kommuniziert [5].

kann. Anfänglich werden die Roboter dann so programmiert, dass sie eine schnelle Erkundungsfahrt mithilfe von Fächersonaren durchführen. Die Methanwolken sind aufgrund ihrer anderen Dichte in den Sonarbildern gut zu erkennen, womit das Untersuchungsgebiet zeitnah eingegrenzt werden kann. Anschließend werden spezielle Methansensoren verwendet, um die Quelle der ausströmenden Gase zu finden. Für die Mission ist eine enge Kooperation der AUVs vonnöten, um gemeinsam ein Suchgebiet abzufahren, sich über Detektionen zu informieren und sich bei der Fahrt nicht gegenseitig zu behindern. Die benötigten Fähigkeiten und Technologien sind hierfür neben einer dauerhaften Unterwasserkommunikation auch eine robuste Lokalisation und Navigation der Fahrzeuge.

Das GREX-Projekt nahm es sich als Aufgabe, für die geschilderten Missionen und Anwendungen Theorien und hierarchische Steuerungen zu entwickeln. Das Ergebnis sollte ein Master-Plan sein, der die Mission steuert und durchführt und in kleinere spezifische Pläne für jedes teilnehmende Fahrzeug herunter gebrochen werden kann. Da verschiedene Fahrzeuge von verschiedenen Partner für den Einsatz vorgesehen waren, musste die Kontrollsoftware so gestaltet sein, dass sie mithilfe festgeschriebener Schnittstellen mit der Steuerung der AUVs interagieren kann, welche selber aber nicht verändert werden sollte. Soll zum Beispiel mit Hilfe eines Schwarms von Unterwasserrobotern ein Pfad bestehend aus Wegpunkten abgefahren werden, so berechnet die GREX Steuerung die Pfade und Punkte der einzelnen Roboter und sendet diese geordnet an die Fahrzeugsteuerungen weiter, unter der Voraussetzung, dass die Positionen der Roboter bekannt sind. Die Abbildung 2.2 illustriert die erdachte Verteilung von Steuereinheiten und Fahrzeugen im gesamten System. Jedes Fahrzeug besitzt hierbei eine eigene Steuerung mit

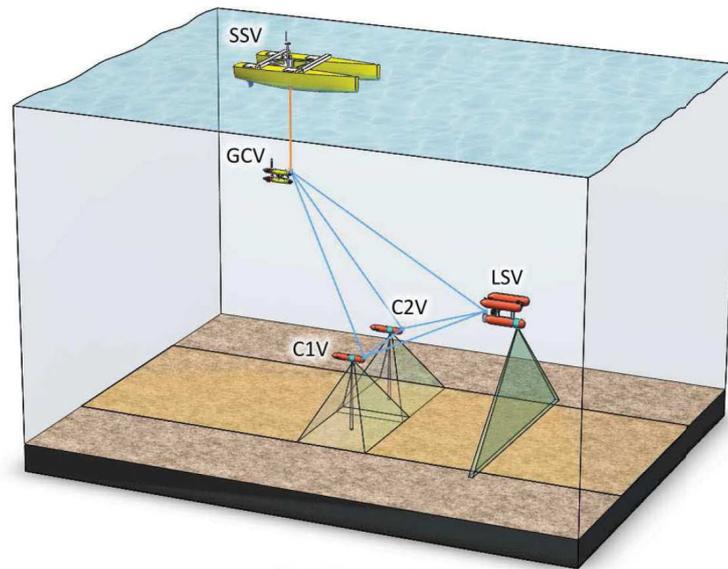
eigenen Steuerrechnern. Diese befinden sich mit der GREX Benutzungsschnittstelle in einem gemeinsamen drahtlosen Netzwerk. An der Wasseroberfläche dient ein ASV (*engl. für Autonomous Surface Vehicles*) als Relaisstation zu den getauchten Einheiten und kann je nach Entfernung ebenfalls über WLAN oder auch per Funk angesprochen werden. Das ASV kommuniziert akustisch mit den getauchten Robotern und kann auch ein ROV über ein angeschlossenes Kabel steuern und auswerten. Als Annahme wurde allerdings getroffen, dass sich alle Fahrzeuge selbstständig lokalisieren. Hierfür wird vorrangig akustisches Tracking und Trägheitsnavigation verwendet. Um weiterhin Kollisionen kategorisch auszuschließen, nehmen die Fahrzeuge in einer Formationsfahrt Abstände zwischen 20 m und 200 m ein.

Die im Rahmen des GREX-Projekts durchgeführten Experimente belegten allerdings deutlich, dass noch eine große Lücke zwischen der Theorie und der Praxis bestand. Besonders die limitierte Fähigkeit des kontinuierlichen Datenaustauschs führte zu einem Verhalten, bei dem schlussendlich die Roboter größtenteils eigenständig ihre Aufgaben erfüllten und somit noch nicht die Vorteile eines Schwarms von Individuen ausnutzen konnten [5].

### 2.3.2. Das MORPH Projekt

Großangelegte Projekte wie GREX schufen die Voraussetzungen für eine intensivere Forschung im Bereich der maritimen Schwarmrobotik. Allerdings war der Planungsaufwand vor den eigentlichen Missionen noch sehr hoch und viele durchgeführte Verhalten folgten fest programmierten Mustern. Ein Beispiel hierfür sind Fahrten zu definierten Wegpunkten in einem spezifiziertem Bereich, welche komplett durchgeplant sind und während der Durchführung keine Änderungen von Außen zulassen. Außerdem beschränkte dieser Mangel an adaptiven Verhaltensweisen den Einsatz von AUV Schwärmen auf relativ flache und bekannte Bereiche ohne offensichtliche Hindernisse. Um einen Kommunikationsverlust, oder gar den Verlust eines Roboters zu vermeiden, fuhren die Fahrzeuge sicherheitshalber in Sichtweite zueinander. Das akustische Tracking funktionierte ebenfalls nur in der Nähe zu den Begleitbooten zweifelsfrei. Ein bewährtes Mittel für autonome Fahrten ist die durchgeführte Trägheitsnavigation mithilfe Dopplergeschwindigkeitsmesser. Doch der Fakt, dass diese bei ungleichmäßigen Untergründen keine eindeutigen Echos bekommen, verdeutlicht den Drang der Forscher nach neuartigen Konzepten für die Unterwasser-Schwarmrobotik.

Das Ziel des MORPH-Projekts aus dem Jahr 2013 war daher die Schaffung einer flexibleren Schwarmarchitektur, welche die starre Programmierung der Vorgänger aufbricht und einen größeren Vorteil aus der Nutzung mehrerer Fahrzeuge zieht. Dabei sollten einzeln spezialisierte Roboter so eingesetzt werden, dass sie zusammengesetzt ein Gesamtverhalten als Einheit durchführen und effektiv als einzelnes Robotersystem agieren, bei dem jede Teileinheit einen speziellen Nutzen für die Mission hat. Als Missionsziel wurde auch die Kartographierung des Meeresbodens ausgewählt. Anders als beim GREX-Projekt wurden als Sensoren allerdings Multibeamsonare verwendet. Diese liefern auf unregelmäßigem und zerklüftetem Untergrund bessere Ergebnisse als Side-Scan Sonare. Komplettiert wurde die Sensorik mit hochauflösenden Kameras, um schlussendlich zusammen mit

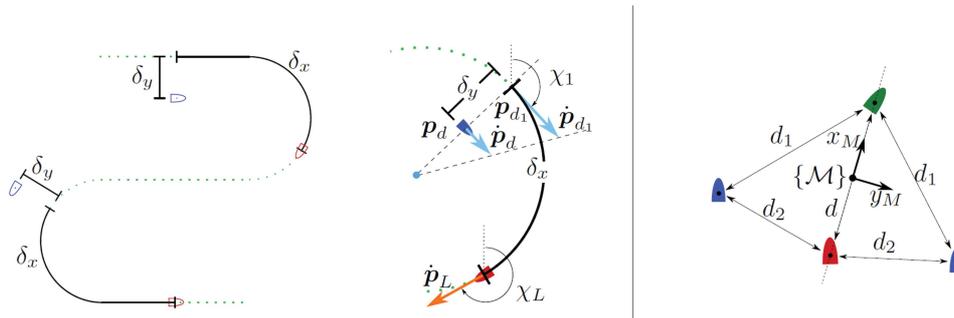


**Abbildung 2.3.:** MORPH Schwarmverhalten durchgeführt von einem fünf Fahrzeuge umfassenden Schwarmverbund. Ein Multibeamsonar verwendet vom LSV (*engl. für Local Sonar Vehicle*) und Unterwasserkameras in zwei CxVs (*engl. für Camera Vehicles*) dienen zur Kartographierung des Meeresbodens. Zur Koordination und Navigation werden zwei weitere Fahrzeuge verwendet, welche mit GCV (*engl. für Global Communication Vehicle*) und SSV (*engl. für Surface Support Vehicle*) bezeichnet werden. Neben individueller Trägheitsnavigationen werden noch USBL (*engl. für Ultra Short Baseline*) und GPS zur Lokalisation verwendet und die einzelnen Informationen mithilfe von akustischer Kommunikation im Schwarm verteilt [6].

den Fächersonaren eine 3D Szenerie des Untergrunds zu generieren. Die Abbildung 2.3 illustriert die grundlegende Konfiguration eines MORPH-Fahrzeugverbunds. Das Multibeamsonar bildet die Hauptsensorik des Systems und wird von einem als LSV (*engl. für Local Sonar Vehicle*) bezeichnetem AUV verwendet. Dieses fährt an vorderster Spitze der Fahrzeuge und vermisst die Höhenmerkmale des Bodengrunds in einem Betrachtungswinkel von bis zu 160°. Zusätzlich soll der Boden mithilfe von Kameras aufgenommen werden. Da der Betrachtungswinkel von Kameras wesentlich kleiner ist, allerdings derselbe Bereich wie mit dem Multibeamsonar aufgenommen werden sollte, werden zwei weitere AUVs versetzt hinter dem LSV verwendet. Nebeneinander nehmen diese CxVs (*engl. für Camera Vehicles*) den Untergrund mit ihren Kameras auf, müssen dafür aber auch in einem geringeren Abstand zum Boden fahren als das LSV. Das GREX-Projekt zeigte, dass eine Koordination mehrerer Fahrzeuge ausschließlich unter Wasser schwer durchzuführen ist, da die Roboter zu sehr abhängig von einer fehleranfälligen Kommunikation sind. Daher werden im MORPH-Projekt zwei weitere Fahrzeuge verwendet: An der Wasseroberfläche fährt ein autonomes Oberflächenfahrzeug, hier SSV (*engl. für Surface Support Vehicle*) genannt. Es kann seine eigene Position mithilfe von GPS orten und unterhält eine dauerhafte Funkverbindung zum Bedienpersonal.

Unter dem SSV befindet sich eng gekoppelt ein weiteres Fahrzeug, welches hier als GCV (*engl. für Global Communication Vehicle*) bezeichnet wird. Diese beiden Fahrzeuge fahren immer gemeinsam in der Formation. Wurde anfänglich eine starre Verankerung gewählt, nutzten die beiden Fahrzeuge später ein optisches Tracking, bei dem das SSV dem GCV mithilfe einer Kamera folgte. Beide Fahrzeuge besitzen weiterhin akustische Modems, wodurch dem GCV auch eine aktuelle GPS Position mitgeteilt werden kann, welche es für die Navigation benutzt. Das GCV besitzt im Schwarm eine zentrale Rolle. Es dient als Kommunikationsknotenpunkt zwischen allen anderen Fahrzeugen. Dabei hilft die Positionierung mehrere Meter unter Wasser gegen auftretende Fehlverhalten der Kommunikation hervorgerufen durch die Wasseroberfläche. Weiterhin verwendet das GCV neben einer Trägheitsnavigation mithilfe eines DVLs (*engl. für Doppler elocity Log*) auch eine USBL Lokalisation (*engl. für Ultra Short Baseline*) mit dem vor ihm fahrenden LSV. Die Positionen von SSV, GCV und LSV können damit aufgrund globaler Referenzwerte durch das GPS mit den anderen verwendeten Techniken relativ genau global bestimmt werden. Eine Akustikkommunikation zwischen allen Mitgliedern des MORPH Verbundes dient zur Verbreitung der Informationen im gesamten Schwarm. Die Kommunikation verläuft hierfür in einem Zeitmultiplexverfahren, welches bei der geringen Anzahl an Teilnehmern noch praktikabel ist.

Eine Mission erfolgt bei MORPH nach folgendem Muster: Dem GCV wird ein abzufahrender Pfad vorgegeben, welchen das AUV mithilfe seiner eigenen Navigationstechniken in Kooperation mit dem gleichzeitig folgendem SSV problemlos abfahren kann. Das LSV bekommt ebenfalls den Pfad übermittelt und fährt diesen eigenständig ab. Dabei versucht es, in einer Linie vor dem GCV zu fahren und den Abstand zu halten. Die USBL Lokalisation und das DVL helfen bei der Einhaltung der Formation. Die verbliebenen Kamerafahrzeuge befinden sich jeweils seitlich von den anderen Fahrzeugen und versuchen mithilfe der Distanzmessungen der akustischen Kommunikation den Abstand zu GCV und LSV konstant zu halten. Solange ihnen von Anfang an bekannt ist, ob sie sich links oder rechts der beiden anderen Fahrzeuge befinden, reichen zwei Abstandswerte aus, um das Folgeverhalten zu realisieren [6]. Bevor die Fahrzeuge allerdings unter realen Bedingungen eingesetzt werden konnten, wurden viele theoretische Überlegungen im MORPH-Projekt unternommen, wie die Steuerung und Koordination im Scharm ablaufen soll. Schnell wurde dabei deutlich, dass zu komplexe Fahrmanöver aufgrund der ungenauen Lokalisation unter Wasser und den Latenzen bei der Unterwasserkommunikation nicht möglich sind. Daher wurde sich auf einfache Folgeverhalten konzentriert, die auszugsweise in der Abbildung 2.4 abgebildet sind. Unter der Bedingung, dass ein Führungsfahrzeug seine Position global bestimmen kann, wird diesem ein Pfad vorgegeben. Dieser soll autonom abgefahren werden, wofür in der Realität vor allem die Informationen der Trägheitsnavigation und des GPS vom begleitenden SSV verwendet werden. Diesem Fahrzeug soll nun ein weiteres in einem definiertem Abstand folgen. Der folgende Roboter muss hierfür seine Position relativ zum Führungsfahrzeug bestimmen können, welches mithilfe der USBL Lokalisation möglich ist. Als feste Größen werden nun abhängig vom abzufahrenden Pfad ein rückwärtiger Abstand  $\delta_x$  und ein seitlicher Abstand  $\delta_y$  festgelegt, welche mit diversen Geschwindigkeitsreglern für die Drehbewegung und Translation  $p_d$  in der Ebene auch bei Kurvenfahrten eingehalten werden sollen. Mit diesen Überlegungen ist die Fahrt von LSV und GCV in einer



**Abbildung 2.4.:** Links: Theoretischer Hintergrund des MORPH Folgeverhaltens von LSV und GCV. Dabei wird der fundamentale Ansatz verfolgt, dass ein folgendes Fahrzeug seine Position relativ zum Führungsfahrzeug berechnen kann, welches mit Hilfe der USBL Lokalisation durchgeführt wird. Das folgende AUV (blau illustriert) berechnet davon abhängig einen rückwärtigen ( $\delta_x$ ) und einen seitlichen Abstand ( $\delta_y$ ) zum Pfad des vor ihm fahrenden AUVs (rot illustriert), welches in einer V-Formation resultiert, da die Abstände während der Fahrt immer eingehalten werden und die verschiedenen Fahrtwinkel durch das USBL bekannt sind. Davon abhängig werden die geregelten Geschwindigkeiten  $p_d$  berechnet. Das Führungsfahrzeug selbst fährt, dank seiner globalen Lokalisierung, den gewünschten Pfad einfach ab. Rechts: Die beiden Kamerafahrzeuge berechnen ihre Position anhand von Entfernungsmessungen ( $d_1$  und  $d_2$ ) zu den in einer Linie fahrenden Fahrzeugen LSV und GCV. Dabei sind zwei Positionen links und rechts der Linie möglich, welche durch vorher definierte Positionen der Fahrzeuge ermittelt werden müssen [7].

leicht versetzen Formation möglich, welches in der Simulation belegt wurde. Für die beiden Kamerafahrzeuge wird weiterhin ein Folgeverhalten verwendet, welches lediglich auf Abstandsmessungen zu den beiden seitlich in einer Linie fahrenden Führungsfahrzeugen beruht. Unter der Prämisse, dass vor der Fahrt bekannt ist, ob sich das Kamerafahrzeug links oder rechts der anderen AUVs befindet, reichen zwei Abstandsmessungen und die Kenntnis über die jeweiligen Tiefen aus, um einen einfachen Fahrtregler zu realisieren, welcher die angestrebte Formation des Fahrzeugverbunds realisiert [7].

Die theoretisch erdachten Verhalten wurden 2016 in experimentellen Feldtests erprobt. Um die Kosten des Projekts niedrig zu halten, brachten verschiedene Projektpartner ihre eigenen Plattformen mit ein, womit neben einem Atlas SeaCat AUV mehrere Girona G500 und Medusas verwendet wurden (siehe Kapitel 2.4.2 bzw. 2.4.3). Diese hatten den Vorteil, dass sie eine Lokalisation und Navigation auch eigenständig ohne die Hilfe anderer durchführen konnten, was sich während der Tests als hilfreich erwies. Die Ergebnisse ergaben, dass sich eine Lokalisation der Schwarmmitglieder während der Fahrt bis auf 1 m genau durchführen ließ. Die V-Formationen wurden allerdings nur mit den Medusas an der Oberfläche getestet, lieferten dort allerdings gute Ergebnisse. Ebenfalls wurde eine Hindernisvermeidung mit Hilfe von Scanning Sonaren durchgeführt, die das SeaCat AUV standardmäßig an Bord hat. Allerdings konnte nicht alle erdachten Missionen und Verhaltensweisen durchgeführt werden. Die zeitgesteuerte Akustikkommunikation erwies sie als bremsender Faktor in der Entwicklung. Außerdem dauerte die Entwicklung der generalisierten Steuerung für die verschiedenen Typen von Robotern ebenfalls

länger als gedacht. Trotzdem konnte ein funktionierendes Schwarmverhalten unter Wasser durchgeführt werden, aber auch nur, weil die Projektpartner ihre Maschinen im Wert von mehreren 100.000€ mit einbrachten. So konnte der Schwarm nicht wirklich einen Mehrwert liefern, da die Maschinen einzeln gesehen die Daten genauso hätten sammeln können [8].

## 2.4. Aktueller Stand der Forschung

Die vergangenen Jahre haben zu einer starken Änderung der AUV-Technik geführt. Neue Ideen und Entwicklungen kamen auf, um die bekannten Probleme bei der autonomen Fahrt unter Wasser zu lösen. Heute kann gesagt werden, dass einige Probleme gelöst werden konnten, andere aber immer noch bestehen und sogar neue Probleme aufgetaucht sind, die die verschiedenen Entwickler nicht bedacht hatten. Eine vollständige Liste der essentiell benötigten Technologien aufzustellen, die für autonome Unterwasserroboter benötigt werden, ist aus diesen Gründen fast unmöglich, da immer ein Aspekt fehlen würde. Allerdings kann man die fünf verschiedenen Schlüsseltechnologien nennen, die sich in den vergangenen Jahren heraus kristallisiert haben:

### **Autonomie, Energie, Navigation, Sensoren, Kommunikation**

Zur Autonomie gehören auch die Intelligenz des Fahrzeugs und die Möglichkeit der Kooperation mit dem Nutzer und anderen Fahrzeugen. Der Begriff der Energie umfasst nicht nur die verschiedenen Energiesysteme und Speicher, sondern auch Energiemanagementsysteme und deren Erhaltung. Die Sensortechnologie beinhaltet alle für den Unterwassereinsatz zur Verfügung stehenden Sensoren und deren Auswertung. Auch die immer mehr in den Fokus rückende 3D-Bildverarbeitung ist in diesem Bereich anzusiedeln.

Ein Unterwasserfahrzeug, welches alle Schlüsseltechnologien auf höchstem Niveau in sich vereint, ist heutzutage noch nicht zu finden. Dieses ist alleine schon aufgrund des Kostenfaktors kaum möglich. Daher versucht jedes Entwicklungsteam im Rahmen seiner Möglichkeiten eine Nische zu finden und die Technologien zu verwenden, die die angestrebte Aufgabe erfordert und gleichzeitig noch im Rahmen der Möglichkeiten liegt. Viele heute kommerziell vertriebene AUVs sind für eine spezielle Aufgabe konzipiert und erfüllen diese nach festen Abläufen. Eine komplette Autonomie wird daher nur in seltenen Fällen benötigt. Die Missionen werden eher im Vorfeld genau geplant, sodass das Fahrzeug anschließend einem festen Ablauf folgen kann und dementsprechend gesteuert wird. Weiterhin ist die Autonomie abhängig von anderen verwendeten Schlüsseltechnologien, beispielsweise den Sensoren und der Navigation. Das Fahrzeug kann sich nur sinnvoll autonom in der ihn umgebenden Umwelt bewegen, wenn es sich auch ein Bild von dieser machen kann. Die etablierten Navigationsverfahren unter Wasser sind die Trägheitsnavigation und eine Triangulation mit Hilfe von fest installierten akustischen Baken. Diese Verfahren wurden in der heutigen Zeit von Sonaren und spezialisierten Sensoren abgelöst, wodurch die dem Roboter mögliche Autonomie ebenfalls gesteigert werden konnte.

Auch in der Energietechnologie wurden große Fortschritte erzielt. Die Lithium Technologie führte zu immer kleineren Energiespeichern bei gesteigerter Leistung. Sie erlauben sehr lange Einsätze auf dem Wasser und können sogar auf dem Wasser durch Solarzellen wieder beladen werden [9].

Die Entwicklung von für AUVs geeignete Sensoren hat erheblich länger gedauert und dauert auch immer noch an. Die ersten AUVs mussten erstmal einsatzbereit sein, um zu erkennen, welche Arten von Sensoren benötigt werden und welchem Formfaktor diese entsprechen sollten. Dabei unterscheidet man zwischen Sensoren, die für die allgemeine Funktionsweise des Roboters essentiell sind (bspw. für die Navigation) und Sensoren, die für das Erfüllen der Aufgabe benötigt werden (bspw. Umweltsensorik). Mittlerweile bietet der Markt eine große Vielfalt an verschiedenen kleinen und intelligenten Sensorsystemen, die den Einsatz von AUVs bereichern und auch neue Möglichkeiten bieten. Als Folge dessen entstand die Idee, die mit den Sensoren gewonnenen Informationen zu aggregieren, redundant aufzunehmen und die Genauigkeit zu erhöhen. Dies war der Beginn der Kooperation mehrerer Maschinen unter Wasser, um die geforderten Informationen in größerem Rahmen sammeln zu können. Eine Kooperation mehrerer Roboter setzt allerdings mit der Kommunikation eine weitere Technologie voraus, die ebenfalls Einzug in den maritimen Bereich hielt. Unter Wasser wird diese aktuell vorrangig akustisch betrieben. Diese Kommunikationsart bietet eine hohe Reichweite, ist aber fehleranfällig und verfügt nur über eine sehr geringe Datenrate verglichen mit den etablierten Technologien an Land [10].

Die nachfolgend präsentierten Robotersysteme geben eine gute Übersicht über aktuelle AUV-Projekte. Die Roboter werden getrennt voneinander beschrieben und es wird auf die verwendeten Technologien eingegangen, um sie mit dem Roboter Monsun genauer vergleichen zu können. Das Kapitel dient damit als Zustandsanalyse aktueller AUV-Technik und liefert die Einleitung für die Beschreibung des Monsun AUVs.

Teile der nachfolgenden Unterkapitel beruhen auf den eigenen Veröffentlichungen [FHK<sup>+</sup> 12, MEOM13, EMM14, BAMM18].

### 2.4.1. SeaCat

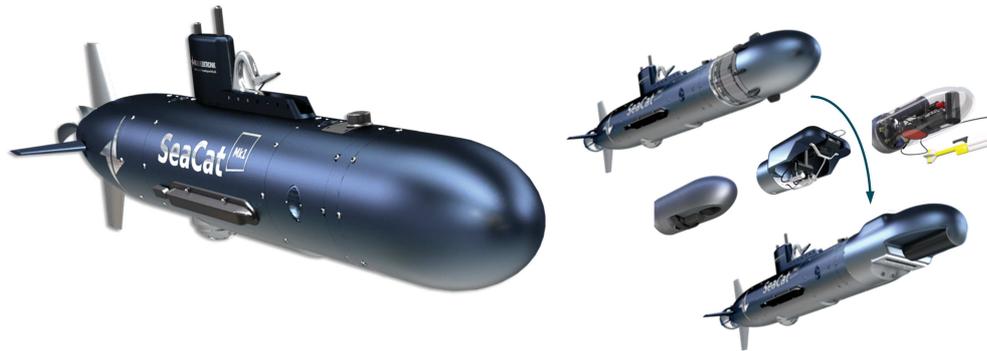
An vielen Orten auf der Welt werden heutzutage AUVs und weitere Robotersysteme für den maritimen Bereich entwickelt und es kann kein weltweit führender Hersteller benannt werden. Viele Systeme haben ihre speziellen Eigenschaften und stehen kaum in einer Konkurrenzsituation zueinander. In Deutschland kann die *Atlas Elektronik GmbH* als größter Hersteller kommerzieller autonomer Unterwasserfahrzeuge angesehen werden. Die Firma ist Bestandteil der ThyssenKrupp Marine Systems und kann daher auf einen großen Erfahrungsschutz aus der militärisch geprägten Entwicklung schöpfen. Neben diversen Über- und Unterwasserfahrzeugen wurde dort auch das SeaCat Hybrid Autonomous Underwater Vehicle entwickelt (siehe Abbildung 2.5). Mit einer Größe von 2.5 m bis 3.5 m bei einem maximalen Gewicht von 220 kg gilt das Fahrzeug im internationalen Vergleich als AUV mittlerer Größe.

Bei einer typischen Geschwindigkeit von 4 kn ist eine Tauchtiefe von 600 m mit dem Fahrzeug möglich. Die Energieversorgung des Fahrzeugs kann durch Erweiterungsmodulare leicht aufgestockt werden, wodurch Missionen bis zu einer Dauer von 20 h machbar sind. Die Bezeichnung als hybrides Fahrzeug ist durch die verschiedenen Betriebsarten von SeaCat begründet. So kann das Fahrzeug mithilfe eines angeschlossenen Lichtwellenleiters als ROV verwendet werden. Diese Möglichkeit wird besonders häufig in Hafengegenden und Bereichen mit verschiedenen Hindernissen und veränderlichen Umgebungsbedingungen angewendet. Gleichzeitig kann der Roboter aber auch vollkommen autonom betrieben werden. Hierfür wird die Mission vor dem Einsatz genau definiert und an den Roboter übertragen. Während der Ausführung dienen reaktive Verhalten in einem hybriden Paradigma der Anpassung an nicht vorhersehbare Ereignisse.

Das AUV ist sehr robust gebaut. Als Rohstoffe wurde nicht magnetische Metalle wie Aluminium, Titan und Edelstahl verwendet, was vor allem für militärische Einsätze von Vorteil ist, da die Roboter somit auch schwer zu orten sind. Neben einem Hauptantrieb am Heck des Roboters ist im Zentrum des torpedoförmigen Rumpfes ein vertikaler Motor verbaut, mit dessen Hilfe der Roboter die Tauchtiefe regulieren kann. Eine Änderung der Bewegungsrichtung wird mithilfe eines Leitwerks realisiert, womit eine Drehung auf der Stelle allerdings ausgeschlossen ist. Weiterhin bietet die Standardkonfiguration hochklassige Sensoren für die Navigation und Interaktion. Neben einem Doppler-Geschwindigkeitsmesser (*DVL*) für die Trägheitsnavigation ist ein Side-Scan Sonar und ein 360° Scanning Sonar für die Umgebungsvermessung verbaut. Ein Differential GPS System ermöglicht eine genaue Positionsbestimmung an der Wasseroberfläche, an der mittels WLAN und Iridium auch drahtlos kommuniziert werden kann. Unter Wasser wird ein USBL-fähiges Akustik Modem verwendet, welches zur Datenübertragung und Ortung des Roboters vom Begleitboot aus verwendet wird.

An der Front des Roboters können verschiedene Köpfe verwendet werden, wodurch die Modularität des Roboters stark ausgeprägt ist. Es stehen Erweiterungen mit verschiedenen Fächersonaren (*Multi-Beam Sonar*) zur dreidimensionalen Vermessung von beispielsweise Häfen zur Verfügung. Weiterhin gibt es Module mit speziellen Kameras, Magnetometern und Sensoren zur Untersuchung verschiedener Wasserwerte.

Autonome Missionen laufen oftmals nach einem definierten Muster ab. Auf einer interaktiven Karte werden verschiedene abzufahrende Wegpunkte ausgewählt, welche sequentiell von dem Roboter abgefahren werden sollen. Für die Navigation wird nach einer GPS Ortung an der Oberfläche unter Wasser hauptsächlich die Trägheitsnavigation mit dem DVL verwendet. Ist der Untergrund zu zerklüftet, welches die Daten des Doppler-Geschwindigkeitsmesser stark verzerrt, wird akustisches Tracking mit dem Begleitboot als Alternative verwendet. Auf dem Weg zwischen zwei Wegpunkten kann der Benutzer zusätzlich auswählen, welche weiteren Sensoren aktiviert werden sollen, um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten. Das Scanning Sonar dient der reinen Hindernisvermeidung. Taucht ein Echo in der Nähe des Roboters auf, wird diesem automatisch ausgewichen. Allerdings verringert sich hierdurch die Genauigkeit der Navigation, welches durch periodisches Auftauchen und Aktualisieren der GPS Ortung ausgeglichen werden kann. Ist das Einsatzgebiet unbekannt, wird auf die Möglichkeit der Fernsteuerung des Roboters



**Abbildung 2.5.:** Das SeaCat Hybrid Autonomous Underwater Vehicle der Firma Atlas Elektronik aus Deutschland. Es zeichnet sich durch ein äußerst robustes Design bei gleichzeitig hoher Modularität mittels austauschbarer Roboterköpfe aus. Es kann über einen Lichtwellenleiter ferngesteuert werden, oder vollkommen autonom Missionen ausführen und auf diesen verschiedene Messungen vornehmen. Es wird besonders für Inspektionsaufgaben und 3D Vermessungen unter Wasser verwendet, bietet aber eine solide Plattform für viele weitere denkbare Aufgaben [11].

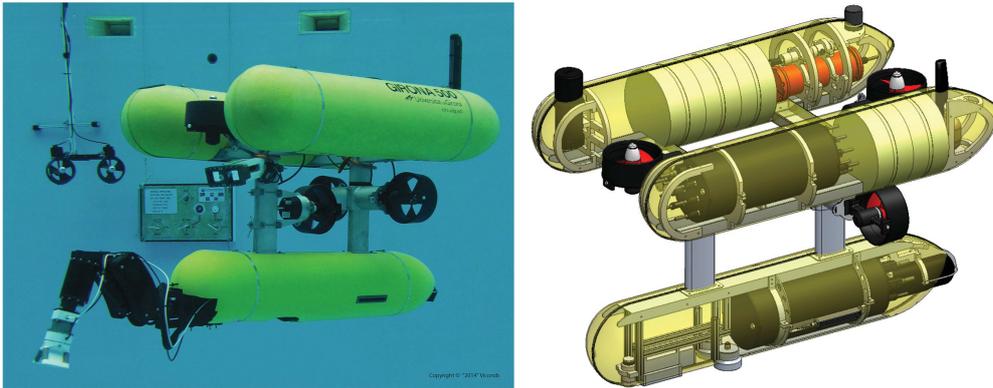
zurückgegriffen. Über das dort verwendete Lichtwellenkabel können ebenfalls Sensordaten an den Nutzer übertragen werden, der den Roboter dadurch wie ein ROV steuern kann [11].

Das SeaCat AUV ist ein voll ausgestattetes Hightech Fahrzeug und für viele Anwendungen unter Wasser geeignet. Dies hat natürlich auch seinen Preis und die Kosten des Fahrzeugs berufen sich je nach Ausstattung auf mehrere 100 000 €. Um den Roboter trotzdem für die Forschung als Plattform nutzen zu können, ist eine Beteiligung des Herstellers in Gemeinschaftsprojekten wie MORPH alternativlos, da sich viele Forschungsinstitute ein eigenes SeaCat AUV nicht leisten können.

#### 2.4.2. Girona G500

Nicht nur professionelle Firmen und Institutionen können als Marktführer in der Unterwasserrobotik benannt werden. Auch viele Forschungsinstitute an Universitäten konnten eine Vielzahl verschiedenster Fahrzeuge entwickeln und mithilfe von Ausgründungen auf den Markt bringen. Ein Beispiel hierfür ist das Girona G500 AUV. Es wurde am *Underwater Robotics Laboratory* in Girona, Spanien entwickelt. Das Fahrzeug zeichnet sich durch seine einfache Rekonfigurierbarkeit hinsichtlich anstehender Missionen aus und ist ebenfalls bestens für den Bereich der Inspektionen und Erkundungen geeignet. Als Besonderheit wurde das AUV aber auch für Manipulationsaufgaben unter Wasser konzipiert, wodurch es sich von anderen Plattformen wie dem SeaCat abgrenzt [12].

Die Idee der Unterwassermanipulation beeinflusste bereits den Designprozess des Roboters. Das klassische Designkonzept eines Torpedo-förmigen Rumpfes wurde



**Abbildung 2.6.:** Das Girona G500 AUV des Underwater Robotics Laboratory in Girona, Spanien. Drei druckfeste Röhren werden übereinander in einem Dreieck angeordnet, mithilfe eines Aluminiumrahmens verbunden und ergeben eine äußerst stabile Roboterplattform. Vier Motoren im Zentrum des Roboters ermöglichen geregelte Fahrtmanöver um einen Unterwassermanipulator genau in Position zu bringen. Ausgestattet mit hochklassiger Sensorik können autonome Einsätze bis zu einer Tiefe von 500 m durchgeführt werden. Allerdings ist der Roboter mit 200 kg alles andere als handlich und kostet ebenfalls mehrere 100 000 € [13].

schnell verworfen. Sie sind zwar durch Zwischenmodule leicht rekonfigurierbar, allerdings befinden sich Schwerpunkt und Auftriebspunkt sehr nah beieinander, wodurch sie weniger stabil im Wasser liegen. Als Alternative gibt es die sogenannten *Open-Frame* Modelle, bei denen verschiedene Druckkörper in einem offen im Wasser liegenden Rahmen befestigt sind. Diese Modelle sind zwar noch flexibler, allerdings auch langsamer durch ungünstige Strömungseigenschaften. Die Lösung war ein Roboter, welcher beide Prinzipien in einem Design vereinigte. Die Abbildung 2.6 illustriert das Girona G500 AUV in seiner aktuellen Ausführung. Der Roboter besteht aus drei jeweils 1.5 m langen Röhren, welche über einem Aluminiumrahmen miteinander verbunden sind. Dabei dienen die Röhren nicht als vollständige Druckkörper, sondern fungieren nur als strömungsgünstige Verkleidungen von mehreren unter ihnen angebrachten druckfesten Gehäusen. Angeordnet sind sie in einem Dreieck, wobei eine Röhre zentriert unter den anderen beiden platziert ist. So ergibt sich ein Gesamtausmaß von 1 m in der Breite, 1 m in der Höhe und 1.5 m in der Tiefe. Das Gewicht summiert sich ohne Payload auf 200 kg und das AUV ist druckdicht bis hin zu einer Tiefe von 500 m.

Um eine möglichst stabile Plattform unter Wasser zu erreichen, wurde versucht, den Schwerpunkt des Roboters so weit unten wie möglich zu platzieren. Dies wurde damit erreicht, dass in der unteren Röhre die Akkus, welche eine Operationsdauer von 8 h erlauben, untergebracht sind. Gleichzeitig befindet sich in der unteren Röhre der Raum für die zu transportierende Nutzlast und den Unterwassergreifer. Die Nutzlast kann maximal 15 % des Gesamtvolumens des Roboters einnehmen. In den oberen beiden Röhren wird auf der einen Seite die komplette Elektronik für die Steuerung des Roboters untergebracht. Auf der anderen Seite befinden sich dort auch die verschiedenen Sensoren und Kommunikationsgeräte. Die Motoren werden im Aluminiumrahmen zwischen den Röhren platziert. Standardmäßig werden zwei

Motoren ähnlich zu einem Differentialantrieb zur Bewegung in der horizontalen Ebene verwendet. Zwei weitere vertikale Motoren dienen der gleichzeitigen Lage- und Tiefenregelung, womit eine sehr bewegliche Plattform entsteht, die auch Drehbewegungen unter Wasser auf einer Stelle erlaubt, was sie vom SeaCat unterscheidet. Diese Bewegungsmöglichkeit wird besonders bei der Manipulation dringend benötigt. Als Hauptrechner wird ein Intel Atom Prozessor verwendet, welcher von einem Linux Betriebssystem verwendet wird, auf dem eine eigene Kontrollarchitektur zur Programmierung und Steuerung des Roboters zum Einsatz kommt.

Die verbaute Sensorik orientiert sich an den allgemeinen Standards der Unterwasserrobotik. Ein Side-Scan Sonar für die Vermessung des Untergrunds ist am unteren Rumpf installiert. Für die bekannte Trägheitsnavigation unter Wasser wird ein Dopplergeschwindigkeitsmesser verwendet, welcher durch Informationen eines akustischen USBL Trackingsystems angereichert werden kann. Das USBL System hat eine eigene Energieversorgung und dient im Notfall auch dazu, dass das AUV noch geortet werden kann, wenn der Rest der Maschine bereits ausgefallen ist. An der Wasseroberfläche verläuft die Navigation mit Hilfe eines GPS Systems und die Kommunikation erfolgt über ein WLAN Netzwerk.

Zusammen mit der Möglichkeit der Unterwassermanipulation mittels eines Greifers bietet das Girona G500 AUV eine vielseitige Plattform, die für eine große Anzahl an Missionen geeignet ist und dadurch auch im MORPH Projekt verwendet wurde. Die Manipulation unter Wasser ist allerdings noch durch die Möglichkeiten der Bildverarbeitung begrenzt, da es noch sehr schwer ist, die zu greifenden Objekte zweifelsfrei zu orten und diese anzufahren [12].

### 2.4.3. Medusa AUV

Die Möglichkeiten und Anwendungsgebiete für autonome Unterwasserfahrzeuge nahmen im Laufe der Zeit immer größere Dimensionen an. Allerdings waren die Anschaffungskosten für viele Systeme noch so hoch, dass sie besonders für Forschungseinrichtungen außer Reichweite blieben. Am *Institute for Systems and Robotics (ISR)* der Universität Lissabon nahm man sich diesem Problem an, und entwickelte eigenständig eine leicht zugängliche Forschungsplattform für das Testen neuer Algorithmen aus dem Bereich der autonomen Steuerung und Navigation, sowie der Kooperation mehrerer Roboter. Das Medusa AUV aus dem Jahr 2013 ist angelehnt an das Design eines Girona G500 AUVs, allerdings werden nur zwei zylindrische Röhren übereinander verwendet. Das Hauptaugenmerk lag auf der Kostenreduktion. Diese wurde auf der einen Seite dadurch erreicht, dass auf teure Komponenten weitestgehend verzichtet wurde. So ist die Hülle beispielsweise aus preisgünstigem Acrylglas gefertigt. Auf der anderen Seite wurde der Roboter kleiner und handlicher. Zwei Männer sind in der Lage, das AUV ohne Hilfsmittel zu tragen und es kann noch im Kofferraum eines PKWs transportiert werden. Die größten Kosten bei der Entwicklung fallen bei den Tests und Experimenten der Roboter an, da der logistische Aufwand für den Einsatz von klassischen Unterwasserrobotern sehr hoch ist. Diese werden durch kleinere Roboter wie die entstandene Medusa stark reduziert, wodurch der Fokus mehr auf die Entwicklung von Verhalten gelenkt



**Abbildung 2.7.:** Das Medusa AUV des Institute for Systems and Robotics der Universität Lissabon. Angelehnt an das Konzept des Girona G500 AUVs befinden sich zwei unabhängige zylindrische Druckkörper übereinander verbunden durch einen Aluminiumrahmen. Ziel des Medusa Projekts war die Kostenreduktion durch Verwendung günstiger Materialien und einer Verkleinerung des Fahrzeugs. Die Medusas können von zwei Mann ohne Hilfe getragen werden, welches die Einsatzmöglichkeiten erhöht, gleichzeitig aber den Aufwand und Zeitbedarf für Tests und Versuche senkt [14].

werden kann.

Die Kostenreduktion führt allerdings auch zu einer eingeschränkten Autonomie. So werden kleinere Energiespeicher verwendet, wodurch die maximale Einsatzdauer eines Medusa AUVs auf 12 h sinkt. Weiterhin können keine hochklassigen Sensoren verwendet werden, da diese oftmals mehr als das ganze Fahrzeug kosten. Die maximale Tauchtiefe und Reichweite des Roboters sinkt genauso wie Möglichkeit weitere Nutzlasten mitzutragen. Für Kooperationsaufgaben beschränkte man sich auf Kommunikation über WLAN an der Wasseroberfläche und einer klassischen akustischen Kommunikation unter Wasser. Untergebracht werden alle benötigten Komponenten in zwei zylindrischen Röhren aus Acrylglas, welche übereinander durch einen Aluminiumrahmen verbunden sind (siehe Abbildung 2.7). Die obere Röhre beinhaltet die gesamte Elektronik und den Steuerungsrechner, sowie die Antennenanschlüsse für GPS und WLAN. Die untere Röhre dient zur Aufnahme der Akkus, des Akustikmodems und Freiraum für weitere Nutzlasten oder missionspezifische Sensoren. Die Verteilung der Komponenten generiert wie bei den Girona G500 AUVs ein stabiles Schwimmverhalten durch den tiefen Schwerpunkt der Plattform unter Wasser. Dieses hat aber auch seinen Preis. So hat der Roboter bei Ausmaßen von 2.8 m x 1.5 m x 0.7 m ein Gewicht von rund 300 kg.

Je nach Ausführung und Benutzung der Medusa werden am Aluminiumrahmen Unterwassermotoren befestigt. Soll der Roboter nur an der Oberfläche fahren, reichen zwei Motoren als Differentialantrieb in der Ebene. Für die Tauchfahrten würde eventuell ein weiterer Motor in vertikaler Ausrichtung reichen, allerdings werden standardmäßig zwei weitere Motoren für die gleichzeitige Lage- und Tiefenregelung verwendet und äquidistant am Rahmen befestigt [14].

Die Steuerungssoftware von Medusa verwendet wie der Roboter Monsun das frei zugängliche *Robot Operating System* und kann damit bei der Entwicklung auf

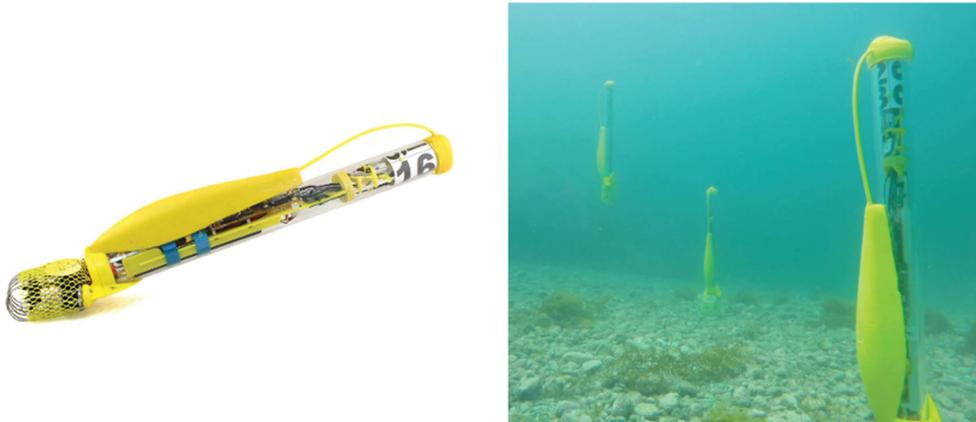
verschiedenste Algorithmen der Robotik-Gemeinschaft zurückgreifen. Außerdem erleichtert dies den Benutzern des AUVs die Bedienung und Weiterentwicklung der Software für eigene Anwendungen enorm. Für die Unterwassernavigation wird hauptsächlich Trägheitsnavigation verwendet. Die Informationen über die Geschwindigkeit über Grund kann entweder mit einem Dopplergeschwindigkeitsmesser, oder in über Messung der Propellerdrehzahl gemessen werden. Über Wasser erfolgt die Navigation hauptsächlich mithilfe des GPS Sensors [15].

Zur Handhabung und Steuerung des Roboters wird eine im Webbrowser aufrufbare App verwendet. Dort angezeigt wird eine Google Umgebungskarte, auf der die Roboterpositionen dargestellt werden. Der Nutzer kann mithilfe einfacher Interaktionen abzufahrende Wegpunkte und ganze Trajektorien auf der Karte einzeichnen, die dann an die Roboter an der Oberfläche übertragen werden. Eine Darstellung von getauchten Robotern ist leider nicht möglich, da die Bandbreite der akustischen Kommunikation keine Positionsübermittlung zulässt.

Den Forschern aus Lissabon ist es mit dem Medusa AUV gelungen, eine robuste und kostengünstige Roboterplattform zu entwickeln. Sie wird heutzutage in vielen Projekten verwendet und dank der offenen Softwarestruktur ständig weiterentwickelt. In aktuellen Projekten wird daher versucht, das Fahrzeug mit neueren Fertigungsmethoden tiefseetauglich zu machen, um das mögliche Einsatzspektrum noch weiter zu erhöhen.

### 2.4.4. APIUM SwarmDiver

Die in den USA ansässige Firma *APIUM Swarm Robotics* beobachtete in den vergangenen Jahren den Markt der autonomen Unterwasserroboter genau und fasste den Entschluss, eine Roboterplattform zu entwickeln, die sich von den bisherigen AUVs stark unterscheidet. Anstatt ein komplexes und in hohem Maße konfigurierbares Fahrzeug zu entwickeln, welches für ein großes Spektrum an Aufgaben im Unterwasserbereich geeignet ist, konzentrierte man sich auf ein simples Design mit dem Fokus auf hoher Reproduzierbarkeit. Als Anwendungsgebiet entschied man sich bewusst gegen die bekannten Inspektionsaufgaben des Meeresbodens, welche von den anderen Robotern bereits gut geleistet werden können, da hierfür vor allem kostenintensive Sensoren benötigt werden, die gegen das angestrebte Prinzip sprechen. Der Roboter sollte vor allem für das Umweltmonitoring verwendet werden können und dabei im Schwarm von mehreren Einheiten agieren. Die Messung von Umweltparametern an verschiedenen Positionen steht hierbei an primärer Stelle. Dieses erfordert aber nicht eine dauerhafte Tauchfahrt des Roboters, welches zum größten Unterscheidungsmerkmal zu den bereits vorgestellten Robotern führt. Die Koordination und Kommunikation des von APIUM entwickelten sogenannten *SwarmDivers* erfolgt ausschließlich an der Wasseroberfläche. Hierfür können Standardtechniken und Algorithmen aus der Überwasserrobotik verwendet werden und der Entwicklungsbedarf reduziert sich deutlich. So reicht für die autonome Navigation eine aktive GPS Ortung und für die Kommunikation wird eine Funkverbindung eingerichtet. Als weitere Besonderheit kommt hinzu, dass für das Umweltmonitoring aufgrund der Schichtung des Wassers besonders Messungen in verschiedenen Wassertiefen wichtig sind und Tauchfahrten unter Wasser in einer



**Abbildung 2.8.:** Der schwarmfähige SwarmDiver der in den USA ansässigen Firma *APIUM Swarm Robotics*. Der Roboter ist im Gegensatz zu den anderen vorgestellten AUVs nicht für den dauerhaften Unterwassereinsatz konzipiert, sondern bewegt sich hauptsächlich an der Wasseroberfläche zu interessanten Punkten, um dort stationär senkrecht abzutauchen. Der SwarmDiver verwendet u.a. Schwarmalgorithmen, um in einem definierten Gebiet Messungen von Umweltparametern an verschiedenen Punkten in benötigten Tiefen durchzuführen, um aus den gesammelten Daten ein Gesamtbild zu interpolieren [16].

Ebene nur bedingt mehr Informationen liefern. Daher ist das Antriebskonzept des SwarmDivers so konzipiert, dass der Roboter nur stationär an einer Position senkrecht nach unten tauchen kann und sich ansonsten nur an der Wasseroberfläche bewegt. Die genannten Besonderheiten, Vereinfachungen und Spezifizierungen führen zu einem spezialisiertem Fahrzeug, welches aber schnell und einfach herzustellen ist. Die dadurch zu erreichende Stückzahl begünstigt die Verwendung von mehreren Einheiten in einem Schwarm, welches wiederum zu Fähigkeiten führt, die mit einem einzelnen Fahrzeug nicht zu bewerkstelligen sind.

Die Abbildung 2.8 illustriert den APIUM SwarmDiver in seiner neuartigen Konfiguration. Mit einer Länge von 75 cm und einem Durchmesser von 57 mm entspricht seine Größe dem eines Monsun Roboters in der Grundkonfiguration. Gleichzeitig ist das Gewicht mit nur 1.7 kg sehr gering, womit die Handlichkeit besonders deutlich wird. Der Roboterkorpus ist aus einer Acrylglasröhre hergestellt, in der die verschiedenen Komponenten auf einer Schiene untergebracht sind. Am Ende der Röhre befinden sich leicht angewinkelt zwei Unterwassermotoren geschützt durch einen kleinen Metallkäfig. Diese Motoren werden für die Bewegung an der Wasseroberfläche als Differentialantrieb verwendet, womit keine Ruderanlage benötigt wird. Gleichzeitig dienen sie aber auch für das Abtauchen des Roboters. Laufen die Motoren mit einem rückwärts gerichtetem Schub, resultiert aus der Winkel der Motoren zum Rumpf und einer besonderen Gewichtsverteilung der Komponenten eine senkrecht gerichtete Kraft, die den Roboter bis zu einer maximalen Tiefe von 50 m abtauchen lässt. Die Komponenten sind so im Rumpf verteilt, dass der schwerste Punkt im Heck des Roboters zu finden ist. Der Roboter hat einen positiven Auftrieb, liegt dadurch aber immer leicht schräg im Wasser, wodurch der Bug des AUVs immer

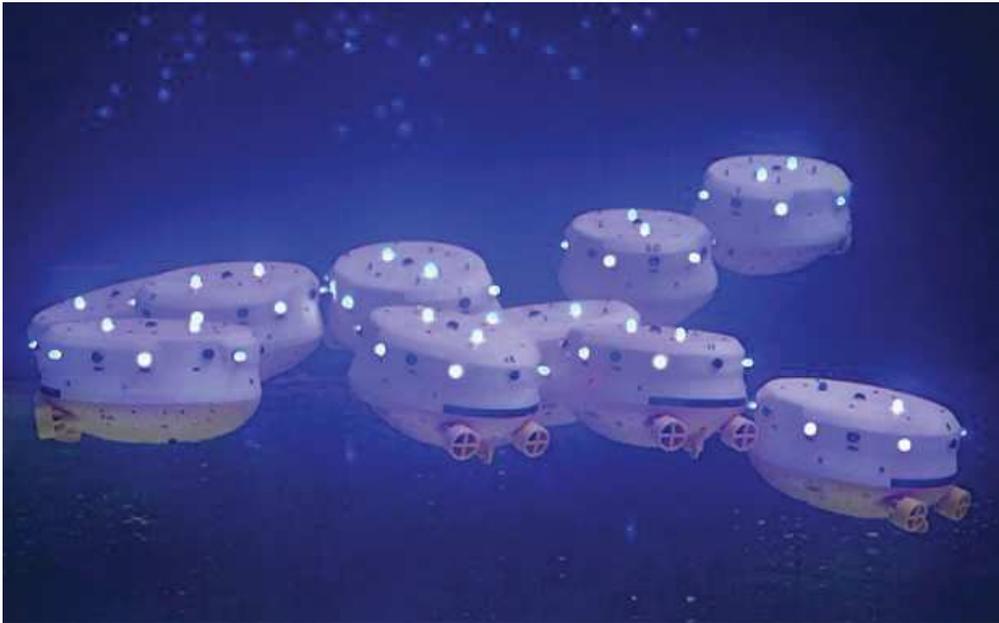
über der Wasseroberfläche zu finden ist. Im Bug befinden sich daher auch eine Dualband-Antenne (900 MHz / 2.4 GHz) und die GPS-Antenne für bessere Empfangs- und Sendeeigenschaften. Im Heck des Roboters nahe der Motoren sind die Akkus des Fahrzeugs untergebracht. Sie erlauben eine maximale Einsatzzeit von 2.5 h und können die Motoren auf bis zu 4.3 kn beschleunigen.

Mittlerweile wurden schon einige Untersuchungen mit den SwarmDivers durchgeführt. Dafür wurden Roboterschwärme mit mehr als zehn Fahrzeugen in flachen und strömungsarmen Gewässern von einem Boot aus eingesetzt. Mit Hilfe einer grafischen Benutzungsschnittstelle konnten auf einer Karte Bereiche ausgewählt werden, die von den Robotern eigenständig untersucht wurden. Die Koordination und Absprache der Einheiten erfolgt vor der Mission mithilfe eines drahtlosen Netzwerks, über das die anzufahrenden GPS Punkte auf den Einheiten verteilt werden. Wurden alle Punkte abgefahren, kehren die Roboter eigenständig zu einer vorher angegebenen Position zurück und können dort wieder an Bord des Bootes geholt werden. Die Daten werden nach der Mission von den AUVs heruntergeladen, um anschließend ein dreidimensionales Messprofil aufstellen zu können [16].

### 2.4.5. CoCoRo

Die bisher vorgestellten Roboterplattformen verdeutlichen das Potenzial und die Vielseitigkeit von autonomen Unterwasserrobotern in unterschiedlichen Anwendungsgebieten und neue Fahrzeuge werden mittlerweile überall auf der Welt hergestellt. Allerdings verwenden die meisten Roboter heute noch die gleichen Steuerungsprinzipien wie bereits vor zehn Jahren. Die Navigation erfolgt an der Oberfläche fast ausschließlich über GPS und unterhalb der Wasseroberfläche bedienen sich die Fahrzeuge hauptsächlich der Trägheitsnavigation, die mit ansteigender Strecke allerdings immer ungenauer wird. Eine Möglichkeit diese Strukturen zu modernisieren, bieten die Algorithmen der Schwarmrobotik. Die Universität Graz beschäftigte sich daher im Rahmen des CoCoRo Projekts federführend mit Schwarzalgorithmen, zugeschnitten für den Unterwasserbereich. Im Fokus des Projekts standen neuere Verhaltensweisen von AUVs und die Simulation dieser. Allerdings wurden auch kleine Demonstratoren entworfen, um die Konzepte zu verdeutlichen. Die Abbildung 2.9 illustriert die dort hergestellten *Lilly* Fahrzeuge. Die handgroßen Fahrzeuge verfügen über ein einfaches optisches Kommunikationssystem, bestehend aus mehreren rundherum installierten blauen LEDs und Fotodioden. Neben der Übertragung einfacher Informationen, dienen die LEDs vor allem der gegenseitigen Wahrnehmung der Roboter. Als Demonstratoren gebaut, werden sie hauptsächlich in kleinen Aquarien mit klarem Wasser eingesetzt.

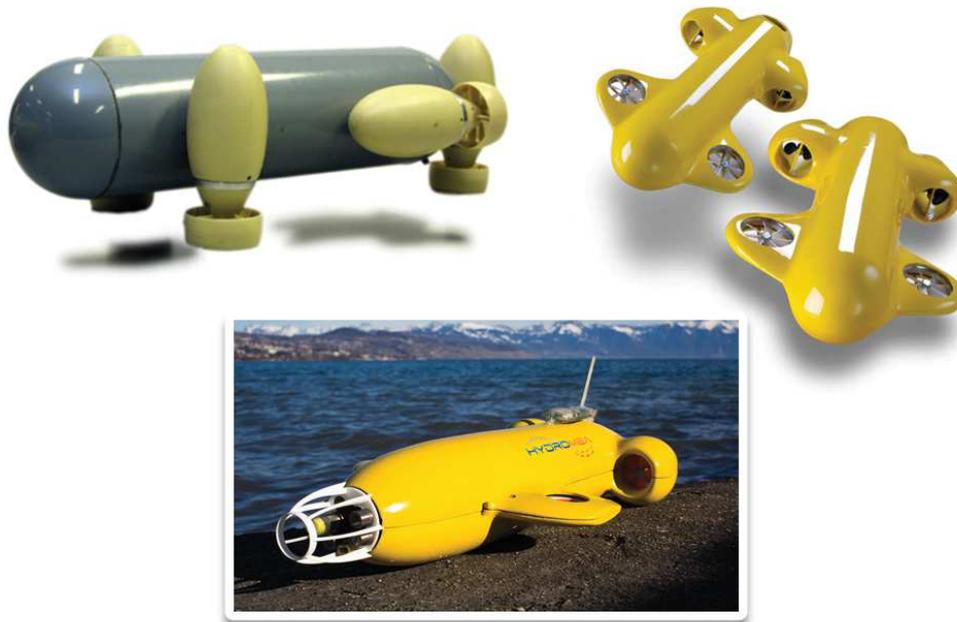
Im Fokus des CoCoRo Projekts stand allerdings die Ausarbeitung grundlegender Fragestellungen, welche beachtet werden müssen, um einen Schwarm von Unterwasserrobotern einzusetzen. Diese können ohne viele Anpassungen auch an andere Systeme angewandt werden. So stand im Zentrum die Frage, welche Tätigkeiten der Schwarm durchführen soll. Hauptaufgabe ist hier die Suche nach einem Ziel unter Wasser. Dieses kann aber nur effizient gefunden werden, wenn die Einheiten eines Schwarms zusammen arbeiten. Werden allerdings mehrere Ziele unter Wasser gefunden, müssen die AUVs einer Gruppe auch in der Lage sein, diese Ziele zu



**Abbildung 2.9.:** Im CoCoRo Projekt befasste sich die Universität Graz federführend mit Schwarmalgorithmen für autonome Unterwasserroboter. Neben aufwendigen Simulationen und Ausarbeitungen von Fragestellungen betreffend der Anforderungen an einen AUV Schwarm wurden ebenfalls die dargestellten *Lilly* Fahrzeuge als Demonstratoren entwickelt. Die Fahrzeuge kommunizierten lokal über LEDs und konnten einfache Schwarmalgorithmen wie das Zusammenballen von Individuen unter Wasser darstellen [17].

unterschieden und anhand von Qualitätsmerkmalen zu klassifizieren. Abhängig davon kann dann das Ziel mit der höchsten Qualität ausgewählt werden. Nachdem dieses geschehen ist, soll es eine Möglichkeit geben, die Position und Qualität an die Oberfläche zu übertragen.

Um diese Tätigkeiten durchführen zu können, müssen laut dem CoCoRo Team allerdings einige Hürden überwunden werden. Als primäres Ziel kann angesehen werden, dass die Roboter nicht verloren gehen können. Hierfür ist angedacht, einen sogenannten virtuellen Käfig im Einsatzgebiet einzurichten. Von einer Basisstation kann periodisch ein akustisches Signal ausgesendet werden. Wird dieses zu schwach, kehren die Roboter automatisch zurück, um im Einsatzgebiet bleiben zu können. Sollte allerdings doch mal ein Fahrzeug verloren gehen, muss der Roboterschwarm in der Lage sein, dieses zu kompensieren und die angedachte Mission unabhängig davon fortzuführen. Selbstorganisierende Features in den Algorithmen sind hierfür hauptverantwortlich. Als essentiell gilt weiterhin, dass sich mehrere AUVs zu einer Gruppe von Fahrzeugen in einem Verbund zusammenschließen können. Hierfür ist ein lokaler Kommunikationskanal benötigt, wie er bei den Lilly Fahrzeugen durch die LEDs realisiert wird. Für die Koordination des Schwarms ist es von Nöten, mit den einzelnen Gruppen von AUVs interagieren zu können. Dieses erfordert neben einer lokalen Kommunikation auch eine globale Variante über mehrere Gruppen hinweg und zur Oberfläche. Da ein Schwarm von AUVs auch als verteiltes Sensornetz angesehen kann, stehen ebenfalls Methoden zur Verfügung, um Lösungen für die



**Abbildung 2.10.:** Das Serafina Projekt wurde 2006 von der Australian National University ins Leben gerufen und beschäftigte sich ebenfalls mit der Entwicklung von kleinen autonomen Unterwasserfahrzeugen. Forschungsschwerpunkt war in diesem Projekt vor allem die Realisierung von verschiedenen Kommunikationsmethoden der Schwarmmitglieder unter Wasser und dem verteilten Datenaustausch. Oben links ist der erste Prototyp abgebildet, der handelsübliche Komponenten aus dem Modellbau verwendete. Rechts daneben ist die daraus resultierende Designstudie. Nach Ende des Projekts wurde die Entwicklung des AUVs in der Ausgründung Hydromea weiter getrieben. Dort entstand das mittig illustrierte Vertex AUV, welches die gelernten Erfahrungen aus dem Projekt umsetzt [19–21].

veränderlichen Umwelt und auch das Sensorrauschen unter Wasser zu finden. Hier sind die redundanten Daten der Fahrzeuge von großem Vorteil [17].

Bis die erdachten Fragestellungen und herausgearbeiteten Methoden des CoCoRo Projekts mit leistungsstarken AUVs umgesetzt werden können, ist allerdings noch ein weiter Weg zu gehen. Die Fahrzeuge müssen robuster und einfacher herzustellen sein, um die Vorteile eines Schwarms von Robotern auch ausnutzen zu können. Dieses wird aktuell im Nachfolgeprojekt subCULTron in Angriff genommen, welches weitere Experimente mit neueren Fahrzeugen in der Lagune von Venedig anstrebt [18].

#### 2.4.6. Serafina und Hydromea

Im Jahr 2006 wurde federführend von der Australian National University das Serafina Projekt ins Leben gerufen. Die Ziele hier waren denen von Monsun sehr ähnlich gestaltet. So ging es um die Erforschung des Potentials von mehreren kleinen und völlig autonomen AUVs, die sich aber selbst untereinander organisieren können. Von vornherein war also klar, dass die Anzahl der eingesetzten Roboter nicht

festgelegt ist und die jeweilige Funktionalität der einzelnen Fahrzeuge an die aktuelle Position innerhalb des Schwarms angepasst ist. Bedingungen waren dynamische Kommunikations- und Routing-Protokolle um die Informationen im Schwarm zu verteilen und eine Lokalisation global und relativ zu anderen Robotern zu ermöglichen. Neben den Ausarbeitungen am theoretischen Hintergrund und ausgiebigen Simulationen wurde auch mit der Entwicklung eigener Roboter begonnen. Die Abbildung 2.10 illustriert die verschiedenen Stufen der entstandenen AUVs. Die Grundlage für die Roboter bildete ein handelsüblicher Bausatz aus dem Modellbau. Ein druckfester Hauptrumpf mit 400 mm Länge und einem 100 mm Durchmesser wurde von außen mit fünf Motorgondeln für dreidimensionale Bewegungen im Raum ergänzt. Diese einfache Form reichte aus, um die ersten Experimente unter Wasser durchführen zu können. Als Controller diente ein PowerPC Core mit 40 MHz, welcher die verwendeten Sensoren über analoge Kanäle und serielle Leitungen auswerten konnte. Die Sensorik des Roboters bestand aus einem 4-Achsen Beschleunigungssensor, einem Kompass und Drucksensor, sowie einem Sonar für die Lokalisation unter Wasser. Für die Kommunikation wurde eine Langwellen-Funkkommunikation verwendet. Diese ermöglichte im Nahbereich von 6 m auf der Trägerfrequenz von 122 kHz eine Datenrate von 1024 bis 8192 bit s<sup>-1</sup>. Zusätzlich wurde an einer optischen Kommunikation gearbeitet [20].

Verbunden mit dem Serafina Projekt wurden in den Jahren von 1998 bis 2009 insgesamt 35 wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht, welche aber zu einem Großteil auf theoretische Arbeiten und Simulationen beruhen. Unter [19] findet sich eine komplette Übersicht der Arbeiten. Ein Hauptaugenmerk lag auf Algorithmen zur Lokalisation und Formationsfahrten unter Wasser mithilfe von verschiedenen Kommunikationsstrategien und Lernalgorithmen. Die Entwicklung des eigenen AUVs wurde im Rahmen des Projekts nicht weiter voran getrieben. Es wurde zwar eine Überarbeitung des Designs vorgenommen, aber mehr als das Mock-Up aus der Abbildung 2.10 rechts oben konnte nicht realisiert werden.

Nach Ablauf des Projekts und mehreren Jahren Pause nahmen sich die ehemaligen Mitarbeiter Dr. Felix Schill und Dr. Alexander Bahr allerdings dem Thema wieder an und versuchten die Designstudie aus dem Serafina Projekt zu aktualisieren und einen leistungsfähigen Unterwasserroboter zu entwickeln. Im Rahmen der Ausgründung Hydromea SA wurde das Vertex AUV entwickelt (siehe Abbildung 2.10 unten). Mittelpunkt des Roboters ist ein YSI EXO2 Sondenträger, welcher bis zu 7 verschiedene Messsonden für chemische, biologische und physikalischen Parameter ausgestattet werden kann. Im Gegensatz zu anderen AUVs wurde dieses Fahrzeug um einen Sensor herum entworfen und speziell an diesen angepasst. Hinter der Multiparametersonde befindet sich ein zylindrischer Druckkörper, welche die Batterien und Elektronikboards beinhaltet. Von Außen werden zwei strömungseffiziente Halbschalen um den Druckkörper gelegt, in welche auch die Unterwassermotoren eingelassen sind. Das eingebettete Steuerungssystem besteht aus mehreren einzelnen Modulen mit jeweils einem 32 Bit Mikrocontroller. Dazu gehören ein Board für Steuerung und Datenspeicherung, ein Board für die Navigation und Regelung, ein Board für

die Langwellenkommunikation und ein Board zur Ansteuerung der Messsonde. Zusätzlich wird ein Board mit einem GNSS Empfänger zur Positionsbestimmung und einem 868 MHz Modem zur Kommunikation an der Oberfläche verwendet. Alle Boards kommunizieren über einen gemeinsamen CAN Bus und können zur Steigerung der Energieeffizienz unabhängig voneinander ausgeschaltet werden. Das Softwareframework basiert aus diesem Grund aus mehreren C-Bibliotheken und verwendet für den Datenabgleich eine Zeitsynchronisation. Höherwertige Verhalten wie bei Monsun auf Basis von Linux Betriebssystem und ROS können allerdings noch nicht vollständig implementiert werden, da im Moment kein leistungsstärkerer Prozessor vorhanden ist [22].

Im Jahr 2018 konnten erste Ergebnisse mit einem Vertex AUV gemessen werden. Von einem stationären Punkt in mitten eines Sees wurde nacheinander verschiedene Messläufe durchgeführt, bei denen der Roboter Wegpunkte entlang einer Geraden unter Wasser anfahren sollte. Für die Navigation wurde eine initiale Positionsbestimmung an der Wasseroberfläche mit anschließender Trägheitsnavigation basierend auf den Umdrehungsgeschwindigkeiten der Motoren verwendet. Während der Fahrt wurde die Daten der Multiparametersonde gespeichert und anschließend der See Cadagno in der Schweiz auf Schichtungen untersucht. Das Vertex AUV kann somit als stabile Plattform gesehen werden, welches allerdings noch nicht im Schwarm eingesetzt werden kann. Es fehlen weitere Funktionalitäten in der Unterwasserlokalisierung und -kommunikation, welche aber aktuell entwickelt werden [23].

### **2.4.7. HANSE**

Das Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck begann seine eigene Entwicklung im Bereich der autonomen Unterwasserrobotik im Jahr 2008. Zu dieser Zeit wurden bereits die ersten Prototypen von Monsun entworfen, allerdings wurde gleichzeitig nach einer größeren Plattform gesucht, welche einen schnelleren Einstieg in den speziellen Forschungsbereich möglich machte. Als treibende Kraft diente die erstmalige Teilnahme am neu ausgerufenem europäischen Unterwasserroboter Wettkampf SAUC-E (engl. für *Student Autonomous Underwater Challenge - Europe*). Kommerziell waren AUVs zu dieser Zeit noch kaum zu beschaffen und die Kosten für bereits abgeschlossene Entwicklungen waren immens hoch. Als Einstieg wurde aber auch keine hochentwickelte Plattform benötigt, sondern der Fokus lag auf einer schnellen Realisierung eines ersten Prototypen bei gleichzeitig einfachster Bauweise, sodass auch unerfahrene Mitarbeiter und Studentengruppen ohne große Vorkenntnisse in das Projekt einsteigen konnten. Als Voraussetzungen für den Roboter wurde eine einfache Wartbarkeit, geringer Produktionsaufwand der Hardware und Elektronik, sowie ein Steuerungs- und Kontrollsystem angestrebt, welches nicht erst speziell integriert werden musste. Das Ergebnis dieser Überlegungen war der nachfolgend präsentierte Roboter HANSE, welcher im Laufe seiner Jahre überdauernden Einsatzzeit viele wichtige Grundlagen und Verhalten lieferte, die noch heute im Monsun Projekt verwendet werden.



**Abbildung 2.11.:** Der Unterwasserroboter HANSE in seiner letzten Ausbaustufe im Jahr 2012. Die Hauptbestandteile sind ein wasserdichter Koffer, welcher von einem Rahmengestell aus Glasfaser verstärktem Kunststoffrohren umgeben ist. Zur Steuerung wird ein Laptop verwendet, welcher sich mit der restlichen Elektronik innerhalb des Koffers befindet. Außen am Rahmen sind vier Unterwassermotoren und Sensoren wie Kameras und Sonare installiert [FHK<sup>+</sup> 12].

Die Abbildung 2.11 illustriert den Roboter HANSE in seiner letzten Ausbaustufe im Jahr 2012. Hauptbestandteil des Roboters war ein wasserdichter Koffer aus dem Bereich der Fotografie, welcher die Elektronik und Steuerungskomponenten in sich aufnahm. Um diesen Druckkörper wurde ein Rahmen aus Glasfaser verstärkten PVC-Röhren platziert, an den alle externen Komponenten mithilfe handelsüblicher Schellen befestigt werden konnten. Hierzu gehörten unter anderem vier SeaBotix BTD150 Unterwassermotoren, zwei für die Lage- und Tiefenregelung, zwei für die Bewegung in der Ebene, sowie Kameras, Echosounder und Sonare. Für die Programmierung und Steuerung wurde ein kleiner Laptop verwendet, welcher ebenfalls in dem wasserdichten Koffer untergebracht werden konnte. Der Roboter hatte damit ein Ausmaß von 50 cm x 50 cm x 30 cm bei einem Gewicht von 14 kg. Diese Ausstattung ermöglichte es, die grundlegenden Kenntnisse der autonomen Fahrt eines Unterwasserroboters zu erlernen und wichtige Erfahrungen für spätere Entwicklungen zu sammeln. Dabei lag der Hauptfokus des Roboters HANSE auf der autonomen Lokalisierung und Navigation. Unter Wasser sind die sensorischen Informationen hierfür leider überaus begrenzt. So kann kein globales Lokalisierungssystem verwendet werden, die Sensoren zur Abstandsbestimmung sind um ein vielfaches größer und kostenintensiver verglichen zu Landrobotern, Kameras können aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse nur im Nahbereich verwendet werden und die Unterwasserlandschaft ist generell sehr arm an charakteristischen Merkmalen, an denen sich Roboter orientieren könnten. Kommerzielle Unterwasserroboter verwenden zur Lokalisation und Navigation heutzutage eine Mischung verschiedener Techniken. So dienen Sonare für die Lokalisation in Hafengebieten

mit festen und erkennbaren Grenzen. Im Freiwasser werden Kombinationen aus Trägheitsnavigationssystemen und akustische Ortung mithilfe von festen Landmarken verwendet [24]. Viele dieser Techniken konnten bei HANSE und auch später bei Monsun alleine schon aufgrund des Kostenfaktors nicht verwendet werden. Es wurde sich daher auf eine Möglichkeit begrenzt und versucht, diese mit dem Hintergrund der Informatik besonders effektiv zu gestalten. Unterhalb des Roboters HANSE wurde ein Imagenex 360° Scanning Sonar installiert und im Roboter Gehäuse diente ein XSens Sensor zur Bestimmung der Lage des Roboters im dreidimensionalen Raum. Ohne die Nutzung eines DVLs zur Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeit und der zurückgelegten Strecke (Odometrie) liegt eine große Herausforderung besonders in der geringen Update-Rate des verwendeten Scanning Sonars. Für einen 360° Scan vergehen je nach Konfiguration mehrere Sekunden, welches in der Lokalisation berücksichtigt werden muss. Außerdem gelten Sonarbilder als sehr verrauscht, wodurch ein sehr robuster Algorithmus zur Merkmalsextraktion gefordert ist. Die verwendete Lokalisierung basiert daher auf einem mit Landmarken arbeitendem Partikel Filter Framework, beschrieben in [25]. Zur Verbesserung der Erkennung von Wänden unter Wasser, wie sie besonders in Hafengebieten vorkommen, wurden weiterhin skalierbare Gradientenfilter verwendet. Die erkannten Wände werden dann in der Lokalisierung fortlaufend als Landmarken verwendet und ermöglichen dem Roboter eine Lokalisation unter Wasser mit einer Genauigkeit kleiner als der Durchmesser des Roboters selbst.

HANSE nimmt eine Vorreiterrolle in der Entwicklung des Unterwasserroboters Monsun ein, konnten doch viele Prinzipien und Methoden übernommen werden und die gewonnenen Erfahrungen gelten noch heute als sehr wertvoll. Bei dem SAUC-E Wettkampf konnte der Roboter insgesamt vier mal antreten und sich neben dem Innovationspreis auch noch mit dem Gesamtsieg 2012 und einem zweiten Platz 2013 auszeichnen. Verglichen mit dem dieser Arbeit gewidmetem Roboter ist HANSE allerdings limitiert. Er wurde dafür ausgelegt, in größeren Gebieten alleine zu operieren. Die Beweglichkeit und Manövrierfähigkeit ist begrenzt und auch Mittel zur Unterwasserkommunikation sind nicht vorhanden. Es ist allerdings denkbar, ein kooperierendes Verhalten der beiden Robotersysteme zu realisieren, in dem HANSE aufgrund seiner Größe und einhergehender Stabilität als Basisstation für mehrere Monsun dienen könnte.

### **2.4.8. SMART-E**

Nachdem mit dem Roboter HANSE beim europäischen Unterwasserroboter Wettkampf SAUC-E große Erfolge gefeiert werden konnten und auch die Expertise am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck im Bereich der Unterwasserrobotik stark angewachsen war, entschied man sich parallel zu den vorhandenen Projekten einen weiteren Roboter namens SMART-E zu entwickeln. Die Intention bei der dieser Entwicklung war ein in dem diesen Bereich neuartigen omnidirektionalen Unterwasserantrieb zu entwerfen, welcher mit einer minimalen Anzahl an Motoren realisiert werden konnte. Besonders für Inspektionsaufgaben unter Wasser bietet ein derartiger Antrieb große Vorteile gegenüber konventionellen AUVs, welche meist die Form eines Torpedos aufweisen und durch den Heckantrieb



**Abbildung 2.12.:** Der Unterwasserroboter SMART-E kurz vor seinem ersten Einsatz 2013 beim SAUC-E Wettbewerb in La Spezia, Italien. Als druckfester Körper dient ein zweiteiliger Ellipsoid aus Glas- und Kohlefaser verstärktem Kunststoff, welches über einen großen Bajonetting aus Acrylglas geöffnet werden kann. Der Druckkörper beinhaltet die gesamte Elektronik und Steuerungskomponenten. Außerhalb des Ellipsoids befindet sich ein Ring aus Edelstahl, welcher von sechs Armen am Körper befestigt ist. In den Zwischenräumen befinden sich drei drehbar gelagerte Unterwassermotoren, welche zusammen den holonomen Antrieb erzeugen [MEOM13].

keine große Mobilität auf engstem Raum aufweisen können. Zur Jahrtausendwende wurde erstmals ein omnidirektionaler Antrieb in einem Unterwasserroboter namens ODIN realisiert [26]. Dieser Roboter hatte die Form einer Kugel, welche rundherum mit acht Unterwassermotoren dreidimensional im Raum gesteuert werden konnte. Mit einem Manipulator ausgestattet, konnten schwer erreichbare Stellen erreicht werden, welches mit konventionellen Robotern zu dieser Zeit nicht möglich war [27]. Die Prinzipien des Roboters ODIN wurden beim Design des Roboters SMART-E mitberücksichtigt, allerdings wurden einige Verbesserungen vorgenommen, welche durch die rasante Entwicklung eingebetteter Systeme begünstigt wurden. Durch die Verwendung miniaturisierter Elektronik und Steuerungskomponenten wie den Overo Fire COM Gumstix mit 720 MHz ARM Prozessor konnte der Platzbedarf stark verkleinert werden. Eine kugelförmige Form hat zwar sehr gute hydrodynamische Eigenschaften, allerdings ist das Volumen vergleichsweise sehr groß, womit die Wasserverdrängung durch ein hohes Gewicht ausgeglichen werden muss. Als Form wurde daher ein Ellipsoid gewählt, welches in der Ebene ähnliche strömungsgünstige Eigenschaften besitzt, allerdings eine viel geringere Verdrängung aufweist. Gleichzeitig bietet der kleinere Querschnitt eine geringere Anfälligkeit gegenüber horizontaler Strömungen, wodurch Bewegungen in der Ebene parallel zur Wasseroberfläche begünstigt werden. Bei einem Durchmesser von 70 cm und einer Höhe von 30 cm wiegt der Roboter nur 10 kg.

Das Alleinstellungsmerkmal des SMART-E AUVs ist das verwendete Antriebskonzept.

Um den Druckkörper verteilt sind in einem Winkel von  $120^\circ$  drei drehbar gelagerte SeaBotix BTD150 Unterwassermotoren. Diese Motoren können dank gleich proportioniertem Vorwärts- und Rückwärtslauf Schub in beide Richtungen erzeugen. Gleichzeitig ist es mithilfe digitaler Dynamixel Servos im Inneren des Roboters möglich, den Winkel des Schubs ebenfalls zu ändern. Für jeden der drei Motoren ergibt sich somit ein eigener gerichteter Kraftvektor, dessen Summe die Bewegungsrichtung des Roboters ergibt. Der resultierende Antrieb ist omnidirektional und wurde mit der minimal nötigen Anzahl von Motoren realisiert. Die Regelung hierfür ist entsprechend komplex und kann unter [EMM14] eingesehen werden.

Das gewählte Design ist sehr speziell und war nur umsetzbar, da SMART-E der erste vollständig am Computer entworfene Roboter des Instituts für Technische Informatik war. Mit Hilfe des 3D CAD Programms Solidworks<sup>1</sup> wurde das AUV komplett digital entwickelt, um die Größen perfekt aufeinander anzupassen. Der Zugang zur Elektronik war ebenfalls eine Herausforderung. Konnte der Roboter HANSE einfach durch das Öffnen des Deckels geöffnet werden, musste für SMART-E ein eigener wasserdichter Verschluss entwickelt werden. Die Lösung war, den elliptischen Körper mittig in zwei Halbschalen zu trennen, und zwischen diesen einen Bajonettring mit demselben Durchmesser zu platzieren. Durch eine Verdrehung der oberen Hälfte kann so der gesamte Roboter geöffnet werden und man hat direkt Zugang zum Inneren des AUVs. Der Ring wurde weiterhin aus Acrylglas gefräst, welches korrosionsbeständig und lichtdurchlässig ist. Dieses wurde genutzt, in dem im Inneren von SMART-E RGB LEDs angebracht wurden, wodurch der Ring des Roboters in mehreren Farben leuchten konnte. Dieses visuelle Feedback codiert interne Zustände und ermöglicht es, den Roboter unter Wasser besser zu erkennen. Das Design ist durch einen Ring aus Edelstahl um den Roboter abgeschlossen. Der Ring dient nicht nur dem Schutz des Roboters vor Kollisionen, sondern erlaubt es auch, die drehbar gelagerten Motoren an zwei Achsenpunkten zu lagern. Dadurch verbiegen die Achsen nicht, welches zu Undichtigkeiten an den Öl gefüllten Durchgangsöffnungen der Achsen führen könnte.

Bei der Programmierung des Roboters SMART-E konnten dank flexibler Schnittstellen viele Teile des Roboters HANSE übernommen werden. Zur Lokalisation wurde ebenfalls ein Scanning Sonar verwendet und nach unten gerichtet war eine Kamera an einer Schwenkvorrichtung in einer Kuppel angebracht. Der entworfene omnidirektionale Antrieb ist allerdings die wichtigste Eigenschaft von SMART-E, wodurch der Roboter einzigartig verglichen zu vielen anderen ist. Dies war auch der Grund, warum mit dem Roboter der Innovationspreis bei dem SAUC-E Wettkampf 2012 gewonnen wurde. Für weitere Aufgaben empfiehlt sich der Roboter allerdings nicht, da sein Antriebskonzept sehr kompliziert und schwer zu reproduzieren ist. Die Nutzlast des Roboters ist sehr gering und es ist daher auch nicht möglich, weitere Sensoren und Kommunikationsgeräte zu installieren. Dennoch konnten beim SMART-E Projekt viele Erfahrungen im Bereich der computergestützten Entwicklung und Herstellung gewonnen werden, welche im Monsun Projekt besonders beim Entwurf verschiedenster Erweiterungsmodule genutzt werden konnten.

---

<sup>1</sup><https://www.solidworks.com/de>



**Abbildung 2.13.:** Das Sembio AUV des Instituts für Technische Informatik der Universität zu Lübeck. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung war ein energieeffizientes Design, welches auf der einen Seite durch eine strömungsgünstige Form und auf der anderen Seite durch ein Energiemanagementsystem realisiert wurde [28][BAMM18].

### 2.4.9. SEMBIO AUV

Eine der neuesten Roboterentwicklungen am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck ist das SEMBIO AUV, das ausführlich in der Dissertation von Ammar Amory beschrieben ist [29]. Die Entwicklung an diesem Roboter begann im Jahr 2015 zu der Zeit, als die Monsun AUVs gerade für Einsätze auf dem offenen Meer vorbereitet wurden. Ziel war es, die Energieeffizienz eines Unterwasserroboters zu steigern und gleichzeitig die Kosten für die Herstellung weiter zu senken. Beim Design wurde daher das Augenmerk auf eine strömungsgünstige Form gelegt, um den Widerstand während der getauchten Fahrt so gering wie möglich zu halten. Pate für das Design war der Rundkopf-Geigenrochen, auch Gitarrenfisch genannt. Sein flacher Körper lässt das Wasser seitlich an ihm vorbeifließen und verursacht beim Gleiten über den Meeresboden kaum Verwirbelungen, welches sich der Fisch bei der Nahrungssuche zu Nutzen macht, da bodenlebende Wirbellose nicht aufgeschreckt werden.

Das Design führt dazu, dass während der getauchten Fahrt weniger Energie verbraucht werden muss. Für die Realisierung wurde der Roboter komplett in Solidworks entworfen und mit der dort integrierten Strömungsanalyse optimiert. Anschließend konnte der Rumpf vollständig im 3D-Druckverfahren hergestellt werden. Da bereits kleine Unebenheiten auf der Außenhaut des Roboters negativen Einfluss haben, wurde nach dem Zusammenbau der 3D-Druck Teile aus PLA (engl. für polylactic acid) der gesamte Rumpf mit Polyether vergossen und geglättet. Gleichzeitig wurde versucht, auf mechanische Komponenten wie Verschraubungen und Anbauteile weitestgehend zu verzichten. Im oberen Teil des Roboters dient eine kleine herausnehmbare Platte als Zugang zum Inneren des Roboters. Diese soll in einer späteren Variante durch eine passende Solarzelle ersetzt werden, was zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht realisiert wurde.

Um die Energieeffizienz weiter zu steigern, wurde zusätzlich für die interne Elektronik des Roboters ein Energiemanagementsystem, genannt SEMS (Solar-Energy-Management-System), implementiert. Dieses ermöglicht es, temporär nicht benötigte Elektronik von der Energieversorgung zu trennen und damit die Batterie

nicht unnötig zu belasten. Das System misst die an den verschiedenen Komponenten anliegende Spannung und errechnet daraus ergebend den Stromverbrauch. Mithilfe von Relaisschaltungen können nicht benötigte Verbraucher so direkt abgeschaltet werden. Beispielsweise wird der Drucksensor des Roboters nicht betrieben, solange das AUV an der Wasseroberfläche fahren soll.

Der Roboter in seiner aktuellen Ausführung ist 60 cm lang und 25 cm breit, wiegt aber voll ausgerüstet nur 6.5 kg. Bereits beim Design wurde versucht, so viele Komponenten wie möglich vom Monsun AUV zu übernehmen. So verwendet SEMBIO neben den selben bürstenlosen Motoren auch den gleichen Drucksensor. Gesteuert wird das System aber hauptsächlich von einem Arduino Mikrocontroller, welcher bei Bedarf durch einen Raspberry Pi ersetzt werden könnte. Um weitere Kosten zu sparen, wurden jedoch handelsübliche Propeller und Motorcontroller verwendet. Während der Entwicklungsphase stellte sich allerdings heraus, dass die Regelungsstrategie von Monsun (siehe Kapitel 5.2) nicht verwendet werden konnte. Die Kombination von Propeller und Motortreiber bei SEMBIO ist auf eine hohe Drehzahl ausgelegt und besitzt im niedrigen Drehzahlbereich eine erhebliche Totzeit. Eine Regelung mit PID Reglern führt zu unüberwindbaren Schwingungen, womit ein aufwendiger Ansatz gewählt werden musste. In aufwendigen Versuchen wurde eine Systemidentifikation durchgeführt, um anhand der dort gewonnenen Daten ein Systemmodell mit beinhaltenden Totzeiten und linearen Zusammenhängen zu erhalten. Auf Basis dessen wurde anschließend ein schaltender Regler mit Gleitzustand (engl. Sliding Mode Controller) implementiert, um eine Tiefenregelung mit dem verwendeten Antriebssystem zu ermöglichen [BAMM18]. Dieser Aufwand wurde für Monsun nicht betrieben, da seine eigenen Controller und Propeller die Totzeiten der Motoren unterdrücken [28, 29].

# 3

## Umweltmonitoring

Unser Planet ist unser Zuhause, unser einziges Zuhause. Wo sollen wir denn hingehen, wenn wir ihn zerstören. //

//

--- Dalai Lama, 2004

Das Verantwortungsbewusstsein für unser eigenes Handeln im Gleichklang mit der Natur ist in der heutigen globalisierten Welt zu einem wichtigen Grundpfeiler des menschlichen Lebens geworden. Die Natur in all ihren Facetten bildet die Grundlage allen Lebens und muss zu dessen Erhaltung geschützt und bewahrt werden. Das Umweltmonitoring kann in diesem Kontext als Programm von wiederkehrenden Studien beschrieben werden, die den Zustand der Umwelt offenbaren. Die gewonnenen Ergebnisse dienen als Grundlage für die Erforschung neuer Umweltfragen und für die Entwicklung von Zieldefinitionen zum Schutz der Natur. Die periodischen und flächendeckenden Überwachungen der Umwelt dienen dabei nicht nur der Überprüfung, ob angegebene Ziele erreicht wurden, sondern auch ob diese neu definiert und angepasst werden müssen.

Für dieses wichtige Thema mit globaler Bedeutung hat die Europäische Union eine eigene Forschungsstelle des Wissenschafts- und Wissensdienst mit dem Schwerpunktgebiet der Umweltüberwachung ins Leben gerufen und unter anderem die Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG als Kernkompetenz für den Schutz der europäischen Gewässer entworfen [30, 31].

Dieses Kapitel betrachtet die heutigen Methoden und Vorgehensweisen des Umweltmonitorings im Rahmen der Gewässerüberwachung, welche Informationen über die Qualität der Gewässer und eine Bewertung der Auswirkungen von Schadstoffen

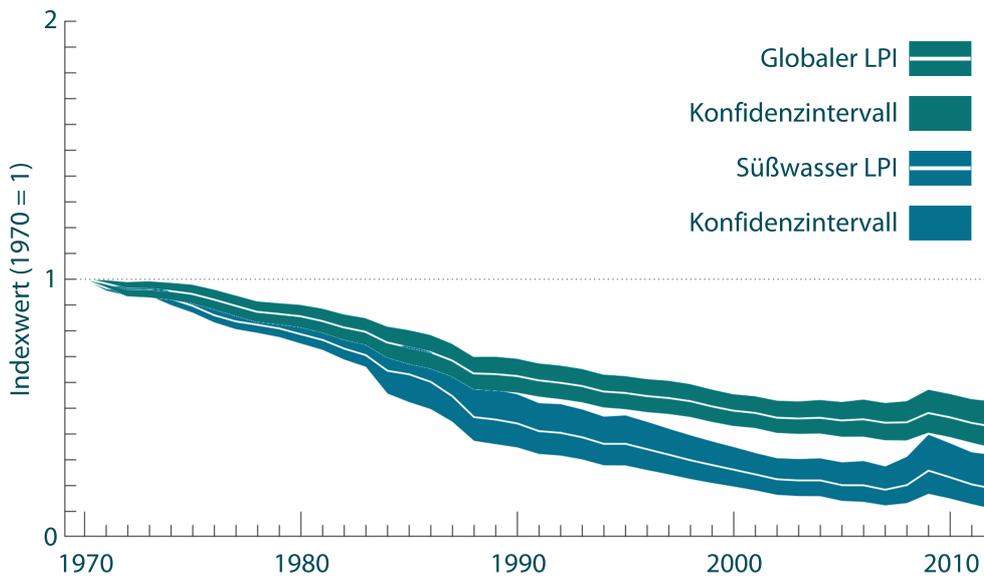
und Chemikalien liefert. Nach einer Betrachtung der globalen Prognosen für die Notwendigkeit der Umweltüberwachung werden die Methoden und Richtlinien genauer untersucht. Gleichzeitig werden die wichtigsten Parameter genannt und ihr Einfluss auf den Zustand der Gewässer beleuchtet. Am Beispiel der Expedition Uhrwerk Ozean [32] werden abschließend mehrwöchige Untersuchungsverfahren auf offenem Meer geschildert, welche der Grundlagenforschung im Bereich der Umweltbeobachtung dienen und langfristige Entwicklungen offen legen.

### 3.1. Düstere Prognosen

Die heutige Welt ist im stetigen Wandel und viele Wissenschaftler reden bereits von einer neuen geochronologischen irdischen Epoche, dem *Anthropozän* - dem sogenannten Menschenzeitalter [33]. Dieses ist geprägt durch einen akuten Wandel unserer Erde, welcher besonders durch die Veränderung des Klimas beeinflusst wird. Die Ozeane und Süßwasserreservoirs übersäuern, ganze Ökosysteme verschwinden und dies alles innerhalb der Zeitspanne eines Menschenlebens [34]. Dieses führt zu einer gestiegenen Bedrohung vieler Tier- und Pflanzenarten. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wildtierbestände mittlerweile erschreckend geschrumpft sind und bis 2020 um durchschnittlich 67 % abnehmen werden [35]. Der in dieser Arbeit betrachtete Lebensraum Wasser hat besonders zu leiden. So beziehen weltweit 3 Mrd Menschen 20 % des tierischen Eiweiß bei der Nahrungsaufnahme aus Fisch. Die stetig wachsende Nachfrage und die auf Profit ausgelegten Fangmethoden haben dazu geführt, dass sich 31.4 % der Fischbestände auf einem biologisch nicht nachhaltigem Niveau befinden [36].

Ohne das Überdenken des menschlichen Handelns deuten alle Hinweise darauf hin, dass die Erde im Zeitalter des Anthropozän zu einem unwirtlichem Ort werden könnte. Der Unterschied zu den vergangenen Epochen der Erdgeschichte ist aber, dass der Mensch in der Lage ist, die Veränderungen der Natur und die sich daraus ergebenden Risiken zu registrieren und zu erfassen. Die Überwachung der Umwelt nimmt dabei einen immer größer werdenden Bestandteil ein und der Aufwand ist weltweit kaum mit konventionellen Mitteln zu bewerkstelligen. In diesem Bereich können autonome Systeme und Roboter, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt werden, helfen. Denn erst wenn genügend Informationen darüber gewonnen werden, was wirklich in der Umwelt geschieht, kann gehandelt werden, um schlechte Folgen für alle zu vermeiden.

Zur illustrativen Erfassung der gesammelten Umweltdaten hat der World Wide Fund For Nature (WWF) Naturschutzbund den sogenannten Living Planet Index (LPI) eingeführt. Dieser dient als Gradmesser für den ökologischen Zustand der Erde [37, 38]. Für die Ermittlung des LPI werden Populationsdaten verschiedenster Individuen gesammelt, um Bestandsveränderungen innerhalb bestimmter Zeiträume zu ermitteln. Das erschreckende Ergebnis der Datenauswertung ergab in den letzten 40 Jahren einen Rückgang der Populationsgrößen bei den Wirbeltierarten von 58 %, was

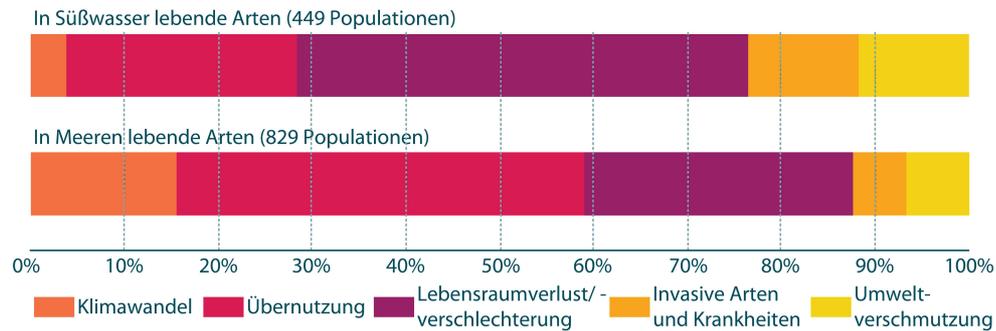


**Abbildung 3.1.:** Die Entwicklung der Bestandsgrößen von weltweit 14 152 beobachteten Populationen von 3706 Arten zwischen 1970 und 2012. Anteilig illustriert sind die 3324 Populationen von 881 Spezies der im Süßwasser lebenden Individuen. Der globale LPI zeigt eine Abnahme von 58 %, im Süßwasser sind es sogar 81 % [35].

einem durchschnittlichem Verlust von 2 % pro Jahr entspricht [35]. Die Abbildung 3.1 zeigt den zeitlichen Verlauf des globalen LPI über die vergangenen Jahre. Gleichzeitig wird der LPI der im Süßwasser lebenden Individuen illustriert. Deutlich zu sehen ist hier ein noch erheblicherer Rückgang der Populationsgrößen von 81 %. Aus den Untersuchungen wird die besondere Rolle des Gewässermonitorings deutlich, da dieser Lebensraum besonders bedroht ist und flächendeckender untersucht und kontrolliert werden muss.

Die Bedrohungen der verschiedenen Arten und der Grad dieser hängen von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren ab. Abhängig von der Art der Bedrohung, dem Ort und der Widerstandsfähigkeit der untersuchten Spezies wird dann entschieden, ob eine entwicklungsbeeinträchtigende oder bestandsgefährdende Bedrohung vorliegt [39]. Einer der Hauptgründe für den Rückgang der Populationsgrößen ist die Verschlechterung und der Verlust des Lebensraums [40]. Als weitere Gründe können die Übernutzung von Arten, die Umweltverschmutzung, invasive Arten und Krankheiten, sowie der Klimawandel genannt werden [35].

Die Abbildung 3.2 illustriert die Bedrohungsarten der in Süßwasser und in den Meeren lebenden Arten. Insgesamt 70.7 % der gesamten Erdoberfläche sind von Gewässern bedeckt und das Wasser verteilt sich hauptsächlich auf die Ozeane. Daher haben äußere Umwelteinflüsse einen geringeren Effekt auf die in den Meeren lebenden Arten. Die größte Bedrohung für die Populationen ist die Übernutzung der Meere. Die industrialisierten Fangmethoden ganzer Fischereiflotten und eine zu hohe Beifangquote führen zu einer Überfischung der Meere und stellen eine große Gefahr



**Abbildung 3.2.:** Häufigkeit der Bedrohungsart für 449 in der LPI-Datenbank erfasste abnehmende Populationen von Süßwasserarten und 829 Populationen von in Meeren lebenden Arten. Für das Süßwasser wurden 781 Bedrohungen, für die Meere sogar 1155 Bedrohungen aufgezeichnet [35].

für die Meere dar. Die Korallenwälder der Meere bieten die höchste Populationsdichte im Meer und dienen als Schutzzone für 25 % der Meeresbewohner. Doch mittlerweile gelten 75 % als bedroht [41]. Beobachtet werden kann dies an den immer öfter auftretenden massenhaften Ausbleichen ganzer Korallenstämme, welches durch zu hohe Wassertemperaturen ausgelöst wird. Bei steigender Temperatur vertreiben die Korallen die in ihrem Gewebe lebenden Algen und bleichen aufgrund dessen komplett aus. Dadurch sind sie anfälliger für Krankheiten und sterben oftmals aufgrund Nährstoffmangel [42].

Im Süßwasserbereich ist die größte Bedrohung im Verlust des Lebensraums und einer Verschlechterung der Lebensbedingungen auszumachen [43]. Die verschiedenen Biotope sind relativ klein und reagieren empfindlich auf äußerliche Veränderungen. Die wirtschaftliche Nutzung der Wasserwege verschlechtert die Qualität des Wassers deutlich. So führen Aushebungen von Flusssand, sowie Begradigungen und Unterbrechungen zu irreversiblen Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und damit der Wasserqualität. Die Rodungen von Wäldern erhöhen außerdem den Sedimenteintrag, was oftmals zu Ufererosionen führt. Die bisherigen Arbeiten im Bereich des Umweltmonitorings haben ebenfalls einen erhöhten Schadstoffeintrag feststellen können. Die Ursachen dafür sind in der Veränderung der urbanen Trinkwasserversorgung und vor allem in der Landwirtschaft zu suchen [44].

Die Stickstoffdepositionen verunreinigen das Süßwasser und häufen sich vorrangig in der terrestrischen Biosphäre an [45]. Um den Ertrag der landwirtschaftlichen Produktion zu steigern, werden die Düngermengen seit Jahren sukzessive erhöht. Ein Hauptbestandteil des Düngers ist Phosphor und dieser endet zu großen Teilen im Wasser [46]. Dieses führt zu einem übermäßigem Algenwachstum in den umliegenden Gewässern, welches leicht an der grünlichen Farbe des Wassers erkannt werden kann. Die Algen erhöhen die Absorptionsfähigkeit des Sonnenlichts, was zu einer gestiegenen Wassertemperatur führt, die für einige Gewässerlebewesen lebensbedrohlich ist. Gleichzeitig steigt die Menge an verbrauchtem Sauerstoff durch die Photosynthese der Algen und sauerstoffarme Gebiete entstehen in strömungsarmen Teilen der Gewässer.

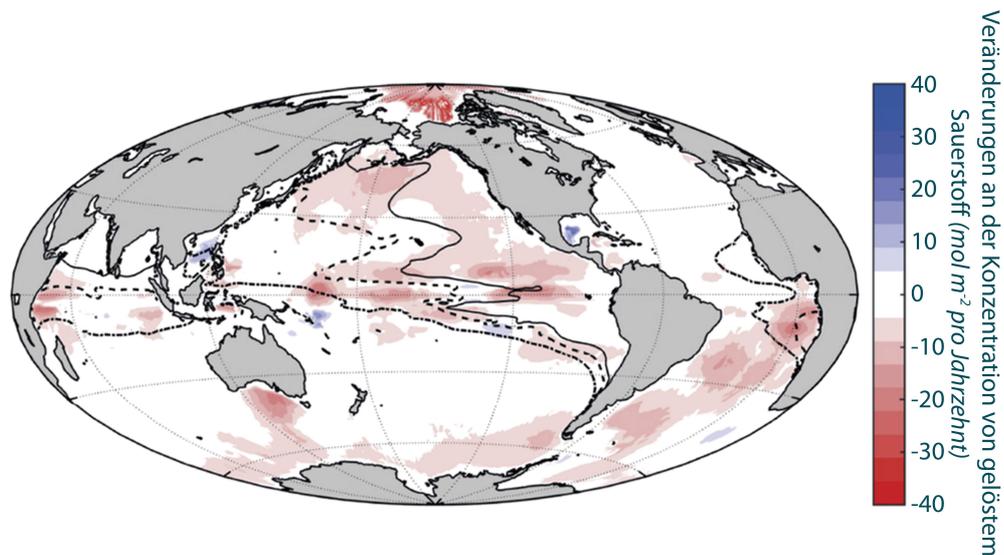
## 3.2. Ein globales Phänomen

Die bereits genannten Prognosen bezüglich der Bedrohungen für unsere irdischen Gewässer unterstreichen die Notwendigkeit einer gründlichen Umweltüberwachung in allen Bereichen unserer umgebenden Natur. Allerdings konzentrieren sich die geplanten Maßnahmen heute noch auf lokale Gebiete und globale Zusammenhänge geraten dadurch in den Hintergrund. Die globale Erwärmung führt unabhängig von allen bisher betrachteten Gefahren zu einem zusätzlichem Phänomen, welches ein verbessertes Beobachtungssystem für die gesamten Ozeane erfordert, nämlich der Sauerstoffverarmung der Ozeane [47].

Die Lösbarkeit von Sauerstoff verschlechtert sich zunehmend bei steigender Wassertemperatur und dies führt besonders im Bereich des Äquators zu vielen bekannten sauerstoffarmen Zonen. Weiterhin führt die Erwärmung des Wassers im Rahmen der globalen Erwärmung zu einer ausgeprägteren Schichtung der Wassermassen. Die unterschiedlichen Schichten unterscheiden sich vor allem in Temperatur und Salzgehalt und bilden starke Sprungschichten zwischen den jeweiligen Übergängen. Die starke Schichtung verhindert den Sauerstofftransport von der Oberfläche in die tieferen Bereiche der Wassersäule, wodurch die Gefahr der Sauerstoffverarmung weiter gesteigert wird [48, 49]. Für den Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf spielt der gelöste Sauerstoff eine essentielle Rolle und bildet somit die Lebensgrundlage für alle aeroben Lebensformen in den Weltmeeren. Stagniert das Wasser in den gebildeten Schichten, würde der Sauerstoffverbrauch der Lebewesen innerhalb von nur wenigen Jahrzehnten zu Mangelzonen führen, in denen kein Leben mehr möglich ist [50]. Die meisten Lebewesen reagieren relativ unempfindlich auf schwankende Sauerstoffkonzentrationen im Wasser, solange dieser über einem bestimmten Level bleibt. Fällt die Konzentration weiter, sterben die aeroben Lebewesen. Dieser Zustand wird als Hypoxie bezeichnet und ist typischerweise bei einem Schwellwert von  $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$  zu finden. Der Bereich unter dem Schwellwert wird daher auch umgangssprachlich als Todeszone bezeichnet [51]. Fällt der Anteil an gelöstem Sauerstoff weiter, ändern sich die biochemischen Kreisläufe noch viel drastischer. Unter  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  nehmen Nitrate eine primäre Rolle bei der Atmung ein und ersetzen Sauerstoff als vorrangigen Elektronenakzeptor. Fällt die Sättigung auf einen Bereich um den Nullpunkt, wird dieses als Anoxie bezeichnet, ein Bereich in dem nur noch anaerobes Leben möglich ist [47].

Ein natürlicher Sauerstoffgehalt im Wasser reguliert ebenfalls die Produktion von Stickstoffoxid als Produkt der Nitrifikation. Bei diesem Prozess wird das aus abgestorbener Biomasse gebildete Ammoniak durch Bakterien wieder in ungiftiges Nitrat überführt [52]. Herrschen allerdings anoxische Bedingungen, verändern die Bakterien ihre Stoffwechselprozesse grundlegend hin zur Denitrifikation, bei der vorhandene Nitrate zur Energiegewinnung umgewandelt werden. Bei diesem Prozess wird ebenfalls Stickstoffoxid gebildet. Sinkt also der Anteil an gelöstem Sauerstoff in den Gewässern, steigt die Menge an gebildetem Stickstoffoxid durch die Umstellung der Bakterien an die neuen Lebensbedingungen [53]. Dieses Treibhausgas gelangt in die Atmosphäre und verstärkt die Effekte der globalen Erwärmung, in dessen Kreislauf die Ozeane sich noch weiter erwärmen [54].

Die Abbildung 3.3 illustriert die gemessenen Veränderungen der Sauerstoffkon-



**Abbildung 3.3.:** Veränderungen der Konzentration von gelöstem Sauerstoff pro Dekade. Die Linien weisen auf die Grenzen von Sauerstoffmangel-Zonen hin [55].

zentrationen und zeigt einen deutlichen Verlust von Sauerstoff besonders in der Nähe des Äquators. Die größte Sauerstoffabnahme konnte besonders unter der Thermokline im tropischen und Nordpazifik entdeckt werden. Dieser Bereich weist eine besonders starke Schichtung auf und ist relativ isoliert von großen ozeanischen Strömen, die Frischwasser in das Gebiet einbringen könnten. Diese Effekte können mit einer ähnlichen Situation in isolierten Gewässern, bspw. dem Schwarzen Meer oder der Ostsee verglichen werden. Je weiter sich das Wasser erwärmt, desto ausgeprägter bilden sich die unterschiedlichen Wasserschichten, welches zwei erhebliche Effekte auf den Sauerstoffkreislauf hat. Erstens erschwert eine starke Thermokline die Versorgung der unteren Wasserschichten mit lebenswichtigen Nitraten, wodurch der Sauerstoffverbrauch vermindert wird. Zweitens verringert sich durch geringe Zirkulation der Wassermassen der Austausch von sauerstoffreichem Oberflächenwasser mit sauerstoffarmen Wasser aus der Tiefe. Dieser Effekt wirkt um ein vielfaches schwerwiegender als der geringere Sauerstoffverbrauch in tieferen Wasserregionen und so führen beide zu einer stetigen Abnahme an gelöstem Sauerstoff in der gesamten Wassersäule [47].

### 3.3. Grundlagen des Gewässermonitorings

Die genannten Prognosen verdeutlichen die Notwendigkeit einer flächendeckenden Umweltüberwachung, die vor territorialen Grenzen keinen Halt macht und eine Einschätzung der globalen Zustände möglich macht. In Deutschland hat die Bund / Länder Arbeitsgemeinschaft, kurz LAWA, eine Rahmenkonzeption zur Aufstellung von Monitoringprogrammen und Bewertung des Zustands von Oberflächengewäs-

sern veröffentlicht, welche die Ziele und die Durchführung des Umweltmonitorings genauer definiert [56]. Das vorangige Ziel ist ein guter chemischer und ein guter ökologischer Zustand, bzw. ein gutes ökologisches Potential aller Oberflächengewässer. Dafür müssen periodisch die Bewirtschaftungsziele der jeweiligen Regionen überprüft werden. Gleichzeitig bildet das Gewässermonitoring die Grundlage der Maßnahmenplanung bei geschädigten Gewässern und dient der Erfolgskontrolle bei durchgeführten Maßnahmen zur Mängelbehebung. Die langfristigen Entwicklungen können beobachtet werden und eine Ursachenermittlung bei Überschreitungen von Normen bzw. Nichterreichung von Zielen eingeleitet werden.

Voraussetzung für ein verwertbares Monitoring sind die Aufstellung und Einhaltung verschiedener Qualitätsanforderungen und die resultierenden Daten müssen eine zuverlässige Bewertung zulassen. Ein wesentlicher Aspekt dafür ist die Auswahl repräsentativer Messstellen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse ausüben. Es ist nicht nur eine genaue Kenntnis der Gewässertopologie erforderlich, sondern auch die urbane Nutzung des Gewässers muss genau begutachtet werden. So gibt es in vielen Gewässern Wasserentnahme und -einleitungsstellen und auch stoffliche Eintragungen können punktiert dem Wasser zugeführt werden. Daher muss bei Einleitungen die Probestelle unterhalb aller Teileinleitungen liegen, um die Gesamtheit aller stofflichen Zuführungen messen zu können. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Auswahl an Messstellen flexibel angepasst werden muss, um schnell auf unterschiedliche Belastungssituationen reagieren zu können. Gleichzeitig müssen auch Referenzmessstellen an unbeeinflussten Teilgebieten des Gewässers vorgenommen werden. All das verdeutlicht die Nachfrage nach einem flexiblen Messgerät, welches durch den in dieser Arbeit präsentierten Unterwasserroboter geleistet werden kann.

Für die angedachten Gewässeruntersuchungen wurden im Rahmen des Monitoringprogramms des LAWA Ausschusses drei verschiedene Arten der Überwachungen definiert: die *Überblicksüberwachung*, die *operative Überwachung* und die *Überwachung zu Ermittlungszwecken*.

Die *Überblicksüberwachung* dient zur Bewertung des Gesamtzustands eines Bewirtschaftungsgebiets. Die Ziele liegen bei der Beurteilung von antropogenen Belastungen und der Bewertung langfristiger Veränderungen der natürlichen Gegebenheiten. Um langfristige Trends ermitteln zu können, sind präzise Messungen an repräsentativen Stellen erforderlich. Dafür wird ein festes, relativ grobmaschiges Messstellennetz aufgestellt, welches periodisch überwacht werden muss. Die manuelle Probenentnahme stößt hier an ihre Grenzen, da Messstellen oftmals nach einer praktischen Zugänglichkeit ausgewählt werden und über einen längeren Zeitraum aufgrund von Veränderungen der Landschaft nicht dauerhaft beibehalten werden können. Dieses unterstreicht deutlich den Nutzen von punktgenau gesteuerten Unterwasserrobotern, da diese die Messstellen problemlos erreichen können und in größerer Anzahl die Daten in kürzerer Zeit erheben [56].

Die *operative Überwachung* unterscheidet sich dahingehend, dass sie bei akuten Veränderungen von Gewässern angewandt wird. Erreichen Oberflächenwasserkörper ihre definierten Bewirtschaftungsziele nicht, oder treten besondere Belastungen im Gebiet auf, ist das Ziel der Überwachung, schnell den Zustand des Gebietes zu

bestimmen. Es ist weiterhin darauf ausgelegt, dass schnell effiziente Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können, um Schlimmeres zu vermeiden. Kleine mobile Plattformen wie der Monsun Unterwasserroboter, welche schnell ins Einsatzgebiet eingebracht werden können, haben hier große Vorteile gegenüber manueller Messverfahren, da sie schnell einen Überblick über ein gesamtes Gewässer liefern können. Bei Umweltbelastungen aus Punktquellen muss das Ausmaß und die Auswirkungen dieser auf das gesamte aufnehmende Gewässersystem bewertet werden. Dafür sind Messungen an verschiedenen Stellen abhängig von der Verbreitung der Schadstoffe nötig, welche mit flexiblen Unterwasserrobotern realistisch umsetzbar sind [56]. Das dritte Monitoringverfahren wird als Überwachung aus Ermittlungszwecken bezeichnet. Es hat die Klärung der Ursache einer Gewässerbelastung als Ziel und kommt bei Oberflächengewässern zum Einsatz, bei denen die Gründe für das Abweichen von Bewirtschaftungszielen und Umweltnormen unbekannt sind. Sie bildet also den Übergang zwischen Überblicks- und operativer Überwachung, sofern diese noch nicht genau festgelegt ist [56].

<b>Biologische Qualitätskomponenten</b>			
<i>Qualitätskomponentengruppe</i>	<i>Qualitätskomponente</i>	<i>Parameter</i>	<i>Gewässerkategorie (F,S,Ü,K)</i>
Gewässerflora	Phytoplankton	Artenzusammensetzung, Biomasse	F,S,Ü,K
	Großalgen oder Angiospermen	Artenzusammensetzung, Häufigkeit	Ü, K
	Makrophyten Phytobenthos	Artenzusammensetzung, Häufigkeit	F,S,Ü,K
Gewässerfauna	Benthische wirbellose Fauna	Artenzusammensetzung, Häufigkeit	F,S,Ü,K

**Tabelle 3.1.:** Biologische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56]

Für die Beurteilung der verschiedenen Arten von Oberflächengewässern nach den vorgestellten Verfahren werden diese in vier Hauptkategorien unterteilt: *Flüsse (F)*, *Seen (S)*, *Übergangsgewässer (Ü)* und *Küstengewässer (K)* [31]. Abhängig von der jeweiligen Zugehörigkeit des zu betrachtenden Gewässers, werden für das Monitoring folgende Faktoren einbezogen: die *chemisch und chemisch-physikalischen Parameter* des Wasserkörpers, die bereits durchgeführten *gewässerökologischen Untersuchungen*, definierte *Belastungsanalysen* und vorhandenes *Expertenwissen*, wobei das Augenmerk für eine belastbare Aussage auf dem ökologischen und dem chemischen Zustand liegt, welcher ebenfalls von autonomen Messsystemen

gewonnen werden kann. Weiterhin werden folgende Komponentenklassen für die Einschätzung des ökologischen Zustands eingeführt: die *biologischen*, die *chemisch und chemisch-physikalischen*, sowie die *hydromorphologischen Qualitätskomponenten*. Die gesamte Gewässerfauna und -flora zählt zu den biologischen Komponenten. Diese sind schwer von autonomen Messsystem zu erfassen, da es beispielsweise um die Größe und Vielfalt der ansässigen Populationen handelt, welche mit elektronischen Sensoren nicht gemessen werden kann. Die Tabelle 3.1 liefert einen Überblick über die wichtigsten zu betrachtenden biologischen Qualitätskomponenten. Diese können besonders effizient durch Wasserproben von verschiedenen Stellen unter Laborbedingungen gemessen werden.

<b>Allgemein physikalisch-chemische Qualitätskomponenten</b>		
<i>Qualitätskomponente</i>	<i>Parameter</i>	<i>Gewässerkategorie (F,S,Ü,K)</i>
Sichttiefe	Sichttiefe	S,Ü,K
Temperaturverhältnisse	Wassertemperatur	F,S,Ü,K
Sauerstoffhaushalt	Sauerstoffgehalt	F,S,Ü,K
	Sauerstoffsättigung	F,S,Ü,K
	Organischer Kohlenstoff	F
	Sauerstoffbedarf	F
Salzgehalt	Chlorid	F,S,Ü,K
	Leitfähigkeit bei 25° C	F,Ü,K
	Sulfat	F
	Salinität	Ü,K
Versauerungszustand	ph Wert	F,S
	Säurekapazität Ks*	F,S
Nährstoffverhältnisse	Gesamtphosphor	F,S,Ü,K
	Ortho-Phosphat-Phosphor	F,S,Ü,K
	Gesamtstickstoff	F,S,Ü,K
	Nitrat-Stickstoff	F,S,Ü,K
	Ammonium-Stickstoff	F,S,Ü,K

**Tabelle 3.2.:** Allgemein physikalisch-chemische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56]

Die chemisch und chemisch-physikalischen Komponenten sind vergleichsweise einfach autonom zu ermitteln, da diese die spezifischen Schadstoffe und allgemeinen Wasserparameter umfassen, welche mit Sonden und speziellen Apparaturen schnell und zuverlässig bestimmt werden können. Die Tabelle 3.2 liefert einen Überblick über die gängigen Parameter. Ein Großteil kann mithilfe von standardisierten CTD-Sonden

(siehe Kapitel 3.5) in kurzer Zeit gemessen werden, wodurch eine manuelle Probenentnahme in den Hintergrund gerät. Zur Ortsbestimmung gewonnene Kamerabilder können ebenfalls zur ersten Bestimmung der Sichttiefe verwendet werden und die Gesamtmenge der gewonnenen Daten steht mittels drahtloser Kommunikation direkt zur Verfügung und kann ausgewertet werden.

<b>Hydromorphologische Qualitätskomponenten</b>		
<i>Qualitätskomponente</i>	<i>Parameter</i>	<i>Gewässerkategorie (F,S,Ü,K)</i>
Wasserhaushalt	Abfluss und Abflussdynamik	F
	Verbindung zu Grundwasserkörper	F,S
	Wasserstandsdynamik	S
	Wassererneuerungszeit	S
Durchgängigkeit		F
Morphologie	Tiefen- und Breitenvariation	F
	Tiefenvariation	S,Ü,K
	Struktur und Substrat des Bodens	F,K
	Menge, Struktur und Substrat des Bodens	S,Ü
	Struktur der Uferzone	F,S
	Struktur der Gezeitenzone	Ü,K
Tidenregime	Süßwasserzustrom	Ü
	Seegangsbelastung	Ü,K
	Richtung vorherrschender Strömungen	K

**Tabelle 3.3.:** Hydromorphologische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56]

Die hydromorphologischen Qualitätskomponenten beschreiben die tatsächlich vorhandenen Wasserstrukturen und den Wasserhaushalt, die Durchgängigkeit und das Abflussverhalten, sowie der Morphologie des Wassers. Die Tabelle 3.3 listet die allgemeinen Parameter der Komponentenklasse auf. Besonders die Morphologie kann mit Hilfe von Sonaren und anderen bildgebenden Abstandssensoren gemessen werden. Diese Geräte dienen autonomen Unterwasserrobotern als Navigation- und Lokalisationssensorik und zeichnen die Ausmaße des Einsatzgebietes periodisch auf. Strömungsverhältnisse sind vergleichsweise schwierig zu erfassen, da hierfür sehr

Sehr guter Zustand	Keine oder nur sehr geringe Abweichungen der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter gegenüber den festgelegten Referenzwerten
Guter Zustand	Geringe Abweichungen der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter gegenüber den festgelegten Referenzwerten
Mäßiger Zustand	Mäßige Abweichungen der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter gegenüber den festgelegten Referenzwerten - signifikant stärkere Störungen der Werte als bei gutem Zustand
Unbefriedigender Zustand	Starke Abweichungen der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter gegenüber den festgelegten Referenzwerten - Biozönose weicht stark vom unbeeinflusstem Standard ab
Schlechter Zustand	Erhebliche Abweichungen der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter gegenüber den festgelegten Referenzwerten - Biozönosen fehlen

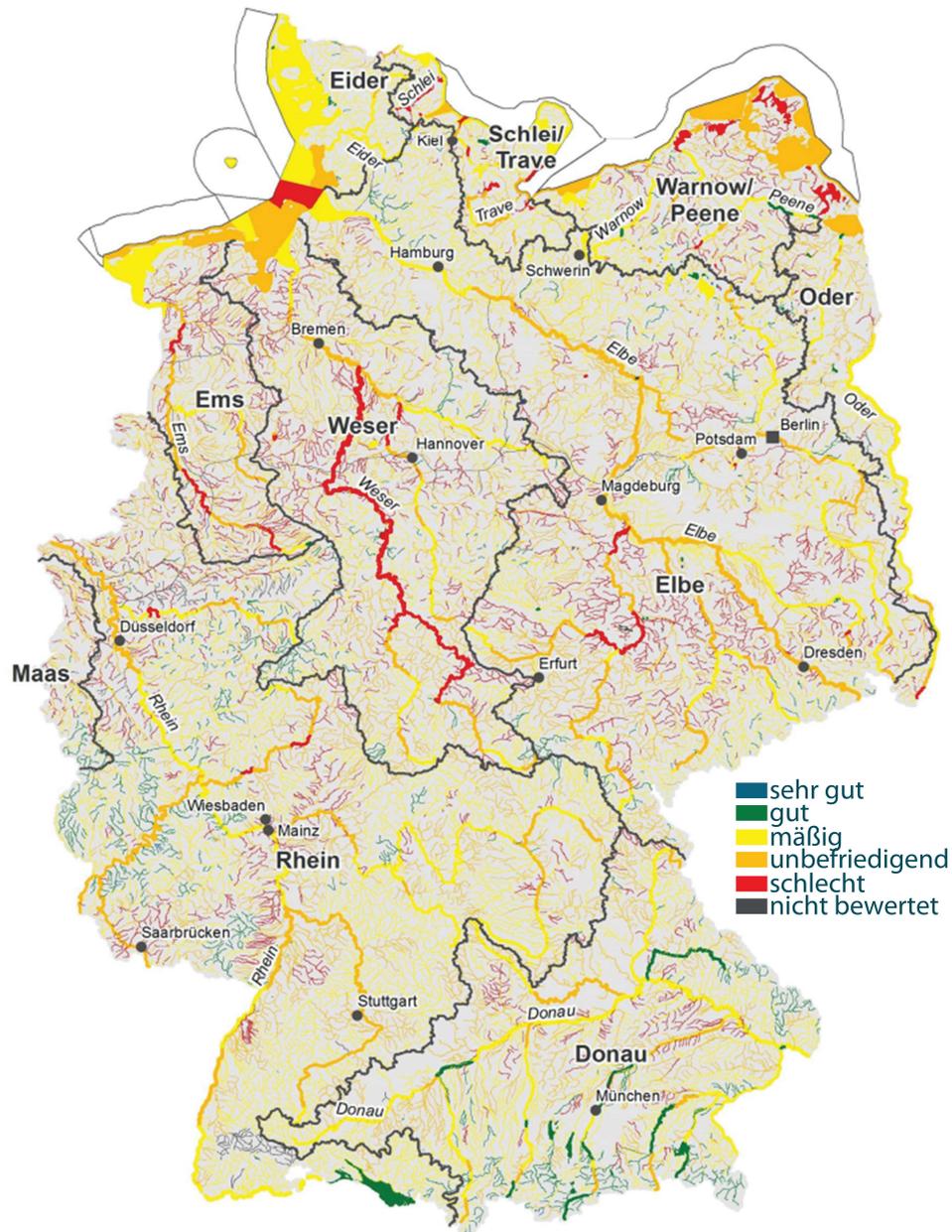
**Tabelle 3.4.:** Allgemeine Einstufungskriterien für den Zustand von Flüssen, Seen, Übergangsgewässern und Küstengewässern [57]

genaue Sensorik, beispielsweise ein Dopplergeschwindigkeitsmesser, benötigt wird, die oftmals nur in sehr großen Roboterplattformen Platz finden.

Nach Spezifikation der verschiedenen Qualitätskomponenten wurden darauf aufbauend fünf Zustände zur Klassifizierung der Oberflächengewässer eingeführt (siehe Tabelle 3.4). Dabei bestimmt die biologische Komponente mit der schlechtesten Bewertung den ökologischen Zustand [57]. Nach Untersuchung der genannten Qualitätskomponenten werden die Gewässer klassifiziert, um Beobachtungspläne für die verschiedenen Regionen aufzustellen.

Die Abbildung 3.4 illustriert die deutschlandweit im Jahr 2016 gewonnenen Messdaten, bewertet in den genannten Zuständen. Neben vielen nicht bewerteten Gewässern fällt besonders der allgemein schlechte Zustand der Oberflächengewässer auf. Besonders im Bereich der Weser und den viel befahrenen Küstenstraßen ist der Zustand beispiellos schlecht. Das Ziel der nächsten Jahre ist neben einer flächendeckenden Zustandserfassung daher auch die periodisch häufigere Überwachung der schlecht bewerteten Gewässer, um den Gesamtzustand und die Änderungen aller Oberflächengewässer zu evaluieren. Als längerfristiges Ziel hat das Umweltbundesamt eine Überführung der Gewässer in einen guten Zustand bis zum Jahr 2027 gesetzt. Dafür werden dringend weitere Ressourcen für die Bestandsaufnahme und Überprüfung der Gewässer benötigt, welche durch den Einsatz von autonomen Messsystemen wie dem Monsun Unterwasserroboter geleistet werden können.

Die in den Tabellen 3.1 bis 3.3 aufgelisteten Komponenten und Parameter geben



**Abbildung 3.4.:** Der gemessene ökologische Zustand bzw. ökologische Potential der Oberflächengewässer in Deutschland im Jahr 2016. Deutlich zu erkennen ist die Häufung von schlechten Zuständen in Gegenden mit starker landwirtschaftlicher Nutzung in Mitteldeutschland. Außerdem konnten viele Wässer aufgrund des gestiegenen Aufwands nicht untersucht werden [58].

eine Gesamtübersicht über die messbaren Werte des Gewässermonitorings. Für die Ersteinschätzung des operativen Monitorings wird allerdings nur eine Teilmenge benötigt, welche im folgenden näher beschrieben und hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Gewässer evaluiert wird.

#### **Sauerstoffgehalt**

Wie bereits im Kapitel 3.2 dargestellt, ist der Anteil an im Wasser befindlichem Sauerstoff essentiell für viele interne biologische und chemische Prozesse. Die Konzentration an gelöstem Sauerstoff dient im Rahmen des Gewässermonitorings als Indikator zur Einschätzung der biologischen Aktivität und einer eventuellen Eutrophierung, wobei zwischen biochemischen und chemischen Sauerstoffbedarf unterschieden werden muss. Unnatürlicher hoher Nährstoffeintrag hat einen indirekten Einfluss auf den Sauerstoffgehalt. Dieser führt zu einem hohen Pflanzenwachstum, welches die Lichteinstrahlung vermindert, wodurch weniger stark beleuchtete Pflanzen absterben. Die Zersetzung erfordert ebenfalls viel Sauerstoff, womit die gesamte Sauerstoffkonzentration stark abfällt. Im sauerstoffarmen Milieu siedeln sich in Folge dessen anaerobe Bakterien an, deren Stoffwechselprodukte Methan und Ammoniak das Gewässer zusätzlich vergiften und zum biologischen Tod des Gewässers führen.

#### **Gesamter organischer Kohlenstoff (engl. TOC)**

Die Menge an organischem Kohlenstoff in einer Wasserprobe liefert ein Maß zur organischen Verunreinigung des Wassers. Der chemische Sauerstoffbedarf eines Gewässers lässt sich nur sehr schwer automatisierbar bestimmen. Um allerdings Aussagen über diesen treffen zu können, bedient man sich der Konkurrenzbeziehung zum Anteil an organischem Kohlenstoff, um Rückschlüsse über die Wasserchemie ziehen zu können. Die Bestimmung des Kohlenstoffanteils besitzt darüber hinaus eine größere Genauigkeit, benötigt nur kleine Proben und produziert keine belastenden Abfälle, da durch die selektive Methode alle Kohlenstoffverbindungen unabhängig von der Oxidationsstufe erfasst werden. Weiterhin ist der Parameter ein wichtiger Indikator für industrielle Einleitungen in das Gewässer.

#### **pH-Wert: Versauerungszustand**

Der Versauerungszustand des Wassers ist für viele chemische und biologische Prozesse besonders wichtig. So liefert er Rückschlüsse über das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht und die Kapazität des Wassers, Schadstoffe im Sediment zu binden. Naturgemäß bewegt sich der pH-Wert in Gewässern zwischen 6.5 (schwach sauer) und 8 (schwach basisch) und befindet sich somit ohne große Schwankungen um den neutralen Wert 7. Bedingt durch die vorherrschenden natürlichen Gegebenheiten und besonders den Untergrund gibt es viele Gewässertypen, die von Natur aus aber auch sauer oder basisch sind. Industrielle Einleitungen und die Einflüsse der Landwirtschaft verändern den natürlichen pH Wert des Wassers drastisch. So führt Eutrophierung zu einem basischen Zustand welcher von vielen Lebewesen auf Dauer nicht gut verkraftet werden kann. Neben dem Sauerstoffgehalt zählt der pH Wert zu den wichtigsten Messparametern, welcher mit elektronischen Sonden schnell und zuverlässig gemessen werden kann.

### **Leitfähigkeit**

Die Verfügbarkeit von beweglichen Ladungsträgern bestimmt, ob ein Stoff elektronisch leitfähig ist oder nicht. Im Wasser bilden Anionen und Kationen die beweglichen Ladungsträger und die spezifische Leitfähigkeit ist abhängig von der Wassertemperatur, der Stoffkonzentration, sowie der Wertigkeit und Wanderungsgeschwindigkeit der Anionen. Aus diesem Grund kann mit Hilfe der Leitfähigkeit eine Aussage über den Salzgehalt der Flüssigkeit abgeleitet werden, was besonders in küstennahen Gebieten von großer Relevanz ist. Über die Art der Ionen können allerdings keine Rückschlüsse gezogen werden. Die im Wasser befindlichen Salze beruhen oftmals aus natürlicher Auswaschung aus Gesteinen und Sedimenten, können aber auch aus menschlicher Herkunft, bspw. durch Abwässer und Streusalze, stammen. In der Regel liegt die elektronische Leitfähigkeit in Bächen und Flüssen unter  $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ .

### **Redoxpotential**

Ein wichtiger Indikator für das biologische Selbstreinigungsvermögen eines Gewässers ist das Redoxpotential. Es beschreibt das Konzentrationsverhältnis von reduzierten zu oxidierten Stoffen, welches die Löslichkeit, die biologische Aktivität und auch den pH-Wert des Gewässers beeinflusst. Das Potential kann in einem Intervall von 800 mV für ein stark oxidiertes Milieu bis hin zu  $-300 \text{ mV}$  für ein stark reduziertes Milieu liegen. Ein hohes Redoxpotential begründet durch viele oxidierte Verbindungen ist oftmals an sauerstoffreichen Gewässerabschnitten zu finden, wobei ein niedriges Potential in sauerstoffarmen Bereichen zu finden ist.

### **Nitratgehalt**

Eine der bedeutendsten Ursachen für die Eutrophierung ist im Nitratgehalt der Gewässer zu finden. Nitrat ist das Endprodukt des bakteriellen Umformungsprozesses, bei dem unter Sauerstoffverbrauch aus natürlichem Ammonium erst Nitrit und dann Nitrat entsteht. Das entstandene Endprodukt ist ein wichtiger Pflanzennährstoff und aus diesem Grund auch in den meisten landwirtschaftlichen Düngern zu finden. Das führte in vergangener Zeit zu einem erhöhten Nitratgehalt in umliegenden Gewässern und dem Grundwasser, wodurch die Eutrophierung in der Mehrzahl der Gebiete weiter voran schreitet. Für das Gewässermonitoring ist der Nitratgehalt ein wichtiger Indikator für die Auswaschung von Düngemitteln und die Reinigungsleistung von Kläranlagen.

### **Ammonium / Ammoniak**

Ähnlich zum Nitratgehalt liefert der Ammoniumgehalt eines Gewässers Informationen über direkte Fremdstoffeinleitungen in das Gewässer, bspw. über Kläranlagen oder Regenüberläufe. Ammonium und Ammoniak bilden im Wasser ein Dissoziationsgleichgewicht und befinden sich nur bei einem pH-Wert von 7 zu gleichen

Anteilen im Wasser. Durch Verschmutzungen und dazugehöriger Änderung des pH-Wertes verlagert sich das Gleichgewicht zu einer Seite. Während Ammonium ungiftig für Lebewesen ist, erreichen Gewässer bereits ab einem Ammoniak Wert von  $0.7 \text{ mg L}^{-1}$  einen kritischen und lebensbedrohenden Bereich.

#### **Ortho- und Gesamt-Phosphat-Gehalt**

Ein bedeutender Hinweis für die Unterscheidung von Punkt- und diffusen Einleitungsquellen kann mit dem Phosphat-Gehalt eines Gewässers gemessen werden. Phosphor ist ein wichtiger Nährstoff für alle biologischen Organismen und wird im natürlichen Stoffkreislauf nur durch den Abbau organischer Substanzen frei. Die Phosphorkonzentrationen in sauberem Wasser sind daher sehr gering, wodurch übermäßiges Pflanzenwachstum auf einem natürlichen Level gehalten wird. Jede Einleitung von Phosphaten führt unmittelbar zu einem starken Pflanzenwachstum, welches eine Kettenreaktion im Stoffkreislauf des Gewässers auslösen kann, die das natürliche Gleichgewicht irreparabel beschädigt. Im Rahmen des Gewässermonitorings ist es daher von besonderer Wichtigkeit, den Anteil an Phosphaten genau zu bestimmen, um eine Eutrophierung des Gebiets frühzeitig zu verhindern.

#### **Sichttiefe / Trübung**

Ein auf den ersten Blick einfach zu bestimmender Wasserparameter ist die Trübung eines Gewässers und die damit verbundene Sichttiefe. Ursachen für eine Wassertrübung sind organische und anorganische Schwebstoffe, sowie kleine Organismen. Eine erhöhte Anzahl Wasserpartikeln führt zu einem größerem Absorptionsvermögen, wodurch sich die Wassertemperatur ebenfalls erhöht, was einen negativen Effekt auf die anderen bereits genannten Parameter haben kann. Der Trübungsgrad kann mithilfe elektronische Messsysteme einfach bestimmt werden. Optische Messungen mit Infrarotlicht im Bereich von 860 nm ermöglichen eine qualitativ nicht beeinträchtigte Aufnahme der durchgehenden Lichtstrahlung oder der Seitwärtsstreuung des eingestrahlt Lichts. Anhand der Veränderung des Trübungsgrads kann dann der Oberflächenab- und zufluss eines Gewässers ermittelt werden.

#### **Chlorophyll**

Einen Hinweis auf die Zusammensetzung der Biozönose eines Untersuchungsgebiets kann mit Hilfe einer Chlorophyllmessung gewonnen werden. Chlorophyll ist bei allen grünen Pflanzen ein essentielles Element der Photosynthese und Untersuchungen des Chlorophyllanteils erlauben eine Abschätzung der Menge an Algen in Oberflächengewässern. Cyanobakterien sind ein wichtiger Bestandteil des Stoffwechselkreislaufes, produzieren allerdings auch toxische Stoffe, die in größeren Mengen schädlich sind. Ein hoher Anstieg der Chlorophyllmenge ist somit ein guter Indikator für eine beginnende Eutrophierung des Gewässers und sollte daher immer bei der Gewässeruntersuchung berücksichtigt werden.

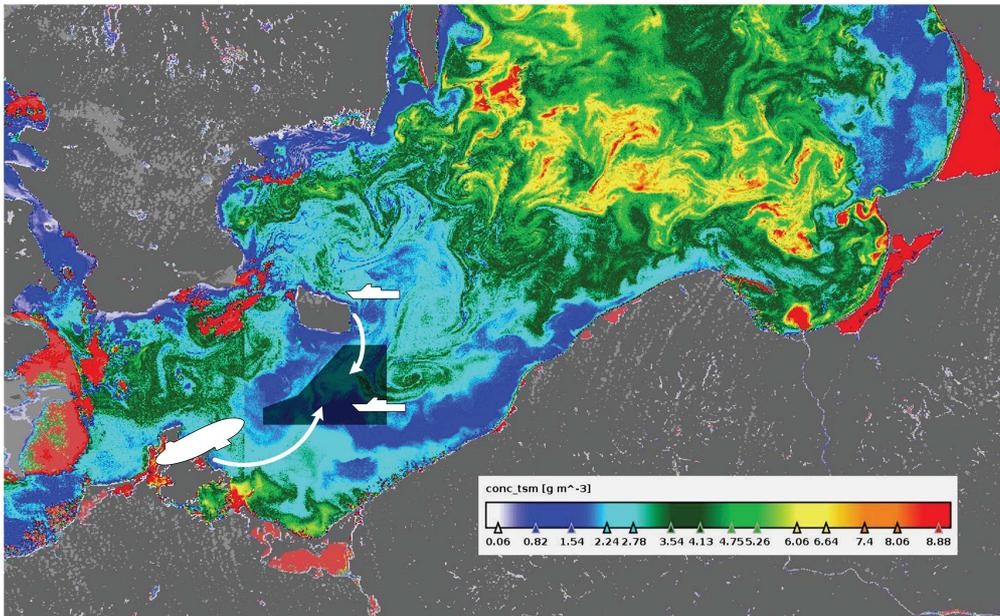


**Abbildung 3.5.:** Die Expedition Uhrwerk Ozean war ein Experiment zur Untersuchung submesoskaler Wirbel in der Ostsee. Weltweit erstmalig wurde ein Verbund aus mehreren Forschungsschiffen, Flugzeugen und einem Zeppelin zur gleichzeitigen Vermessung dieser Wasserphänomene eingesetzt, wodurch eine einzigartige Datensammlung aufgenommen werden konnte.

### 3.4. Expedition Uhrwerk Ozean

Die Strömungen und Gezeiten der Meere beeinflussen das irdische Klima auf besondere Art und Weise. Durch Winde angetriebene Wassermassen transportieren Nährstoffe und Sauerstoff und ermöglichen die Vielfalt dieses einzigartigen Lebensraums. Neben den bekannten großen Meeresverwirbelungen drehen sich meist unzählige kleinere vor den Blicken verborgene Wirbel. Diese haben vergleichsweise geringe Durchmesser von 100 m bis zu 10 km bei einer relativ kurzen Lebensdauer von maximal einem Tag. Wie die Räder eines Uhrwerks greifen diese submesoskalen Wirbel ineinander und sind überall auf der Welt zu finden. Trotz der nachweislich geringen Größe vermischen sie das Wasser intensiv und führen zu Turbulenz und Reibung unterschiedlicher Wassermassen. Damit haben sie einen bisher gering erforschten Einfluss auf die Ozeanzirkulation und die Nahrungskette der Meere und werfen einige Fragen auf. Wie immens beeinflussen die Wirbel das globale Klima? Wie orientieren sich Fische an den Temperaturen der Meere, wenn ihr Weg durch zahlreiche Wirbel unterbrochen wird? [32].

Weltweit einmalig startete im Juni 2016 die Expedition Uhrwerk Ozean unter der Leitung des Instituts für Küstenforschung des Helmholtz Zentrums Geesthacht zur Beantwortung der ungelösten Fragestellungen. Während für andere Wasserphänomene in der Regel Satellitenaufnahmen und Radaraufnahmen wichtige Erkenntnisse liefern, werden für die Erforschung submesoskaler Wirbel schnelle und hochauflösende Beobachtungsverfahren benötigt. Die kleinen Wirbel sind an der Wasseroberfläche nur schwer zu erkennen und zerfallen bereits nach wenigen Stunden, wodurch eine hohe Flexibilität der Messsysteme vorausgesetzt wird. Bei der Expedition Uhrwerk Ozean wurden aus diesen Gründen viele Messsysteme parallel zueinander eingesetzt. Dabei diente ein mit Infrarotkameras ausgestatteter Motorsegler als erste Instanz der Instrumentenkette. Interessante Gebiete wurden so eingegrenzt und für nähere Untersuchungen markiert. Darauf aufbauend wurde erstmals ein Zeppelin, ausgestattet mit Wärmebild- und Hyperspektralkameras in

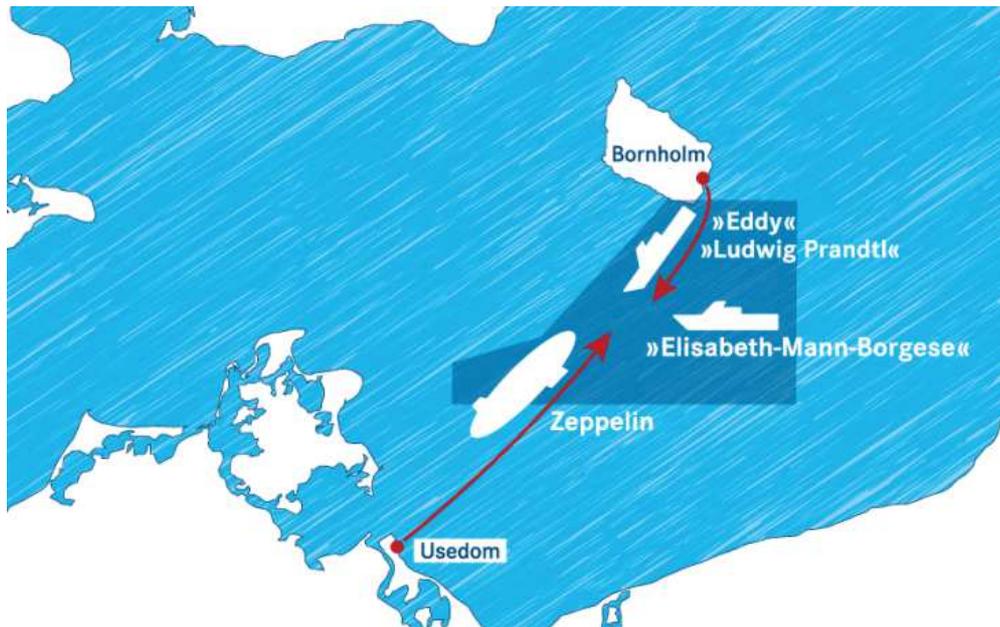


**Abbildung 3.6.:** Satellitenaufnahme der Ostsee im Juni 2016. Illustriert ist die Anzahl an vorhandenen Schwebestoffen zur Verdeutlichung der Turbulenzen. Deutlich zu erkennen ist ein sich aufspaltender Doppelwirbel südöstlich der Insel Bornholm.<sup>1</sup>

das Messgebiet dirigiert und konnte dort stationär Messungen vornehmen. Die Spezialkameras des Luftschiffs können Temperaturunterschiede von  $0.03\text{ °C}$  an der Meeresoberfläche erkennen und das Farbspektrum des Wassers aufnehmen. Gleichzeitig konnten mehrere Forschungsschiffe an wichtige Positionen geleitet werden, um dort Sensoren und Systeme in das Zentrum der Wirbel einzubringen. So ergab sich die einmalige Gelegenheit, submesoscale Wirbel von ihrer Entstehung bis hin zum Zerfall qualitativ beobachten und vermessen zu können.

Die Abbildung 3.6 zeigt eine Satellitenaufnahme der Ostsee, die während der Messkampagne aufgenommen wurde. Die Farbgebung illustriert die gemessene Anzahl an vorhandenen Schwebestoffen, welche durch die Wasserbewegungen und Turbulenzen in der Ostsee verteilt werden. Deutlich zu erkennen ist ein relativ großer Doppelwirbel südöstlich der dänischen Insel Bornholm, welcher als Grundlage für die Expedition gedient hat. Das Messgebiet konnte so eingegrenzt werden, dass auf Bornholm stationierte Forschungsschiffe schnell das Gebiet erreichen konnten, während Zeppelin und Motorsegler gleichzeitig von der Insel Usedom aus starteten (siehe Abbildung 3.7). Die Forschungsschiffe dienten dabei einer genaueren Untersuchung der Struktur und Zusammensetzung der Wassermassen, um das Verhalten der Wirbel genauer studieren zu können. So wurden an der Wasseroberfläche nicht motorisierte Drifter ausgesetzt, mit dessen Hilfe sich die Strömungsrichtungen nachträglich rekonstruieren lassen. Die Strömungsmessungen wurden durch schiffseitige Radarsysteme und Doppler Geschwindigkeitsmesser

<sup>1</sup>Die Satellitenaufnahmen wurden im Rahmen der Expedition Uhrwerk Ozean aufgenommen und vom Helmholtz Zentrum Geesthacht zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 3.7.:** Messszenario der Expedition Uhrwerk Ozean. Zeppelin und Motorsegler starten von der Insel Usedom aus in das Einsatzgebiet, während die Forschungsschiffe von der Insel Bornholm aus starten.

vervollständigt. Für die Untersuchungen in der Wassersäule wurden unter anderem sogenannte Schleppketten entwickelt. Diese bestehen aus bis zu 20 hintereinander gereihten Sensoren an einem Stahlseil, welches an einem Boot durch die zu untersuchende Struktur gezogen wird. Als Ergänzung der Schleppkette wurden ebenfalls Roboter vom Typ Monsun eingesetzt. Diese erweiterten das System der Schleppkette, da sie unter Wasser genau lokalisiert werden können und sich der Abstand der Messpunkte flexibel an die zu untersuchende Struktur anpassen lässt. Dafür wurden die Roboter im Zentrum des Wirbels ausgesetzt, um Trajektorien durch den Wirbel in unterschiedlichen Tiefen abzufahren. Anhand der aufgenommenen Messdaten lassen sich Fronten und Sprungschichten nachträglich genau lokalisieren, wodurch die räumliche Verteilung des Wirbels unter der Wasseroberfläche abgeschätzt werden kann. Alle Daten der verschiedenen Messsysteme liefern kombiniert ein gutes Gesamtbild der Struktur in einer vorher noch nie dagewesenen räumlichen und zeitlichen Auflösung, wodurch sich der Einfluss der submesoskalen Wirbel auf die Umwelt genauer einschätzen lässt. Eine genauere Beschreibung der Expedition und der dabei gewonnenen Ergebnisse folgt in Kapitel 5.8.

### 3.5. Aktuelle Beobachtungsverfahren

Die Notwendigkeit in den Bereichen des Umweltmonitorings und globaler Forschung nach der Messung physikalischer, chemischer und biologischer Parameter wurde bereits auf unterschiedliche Art und Weise beleuchtet. Das arrivierte Mittel zur Durchführung der Untersuchungen war über Jahrzehnte durch in situ Messungen an

erreichbaren Orten geprägt. Proben wurden auf Expeditionen entnommen, um diese unter Laborbedingungen untersuchen zu können. Während die Untersuchungen von Flüssen und Seen heutzutage noch durch händische Probenentnahme geprägt sind, hat die technische Entwicklung von Elektronik, Sensorik und Computern besonders im Bereich der ozeanographischen Untersuchungen zu rapiden Veränderungen geführt. Als standardisiertes Instrument werden selbst registrierende Geräte am Ozeanboden verankert und nehmen dort je nach Parameter über mehrere Jahre Daten auf. Nach erfolgreicher Bergung können diese Daten dann anschließend von Ozeanographen ausgewertet werden. Allerdings sind die Vorgehensweisen sehr zeit-, personal- und kostenaufwendig. Als weiteres Hilfsmittel liefern Satellitenaufnahmen seit den 70-er Jahren neuartige Daten, mit denen große Teile der Weltmeere in kurzer Zeit vermessen werden können. Leider bleibt auch den Satelliten ein Blick in das Innere der Ozeane verborgen. Um diesen zu gewährleisten und gleichzeitig eine kosteneffiziente und flexible Messmethode zu ermöglichen, wird in der heutigen Zeit eine neue Generation von automatisierten Messsystemen verwendet, zu denen auch der Monsun Unterwasserroboter gehört. Diese können flexibel an neuralgischen Punkten eingesetzt werden und messen vollautomatisch mithilfe elektronischer Sonden und Sensoren, von denen repräsentativ die gängigsten nachfolgend aufgeführt werden.

### CTD-Sonde

Um kontinuierliche Informationen über Temperaturprofile und Salzgehalt in der Wassersäule vom Meeresgrund bis zur Oberfläche messen zu können, dient die CTD-Sonde (siehe Abbildung 5.12) heutzutage als primäres Messinstrument. Der Name stammt aus dem Englischen von **C**onductivity - **T**emperature - **D**epth, welches die Sonde eindeutig als Instrument zur Messung der Leitfähigkeit und der Temperatur bei gleichzeitiger Ermittlung der Wassertiefe mittels Drucksensoren beschreibt. Anhand der gemessenen Parameter lässt sich auf einfache Art und Weise der Salzgehalt des Wassers berechnen. Dafür wird folgende Formel verwendet:

$$S = 0,008 - 0,1692 \cdot K_{15}^{\frac{1}{2}} + 25,3851 \cdot K_{15} + 14,0941 \cdot K_{15}^{\frac{3}{2}} - 7,0261 \cdot K_{15}^2 + 2,7081 \cdot K_{15}^{\frac{5}{2}}$$

Der resultierende Salzgehalt  $S$  beruht auf der Verwendung von  $K_{15}$  als Verhältnis der gemessenen Leitfähigkeit zur Leitfähigkeit einer Kalium-Chlorid-Lösung von  $32.4356 \text{ g kg}^{-1}$  bei  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck von  $1013.25 \text{ mbar}$  und kann so elektronisch bereits in der Sonde berechnet werden.

Mithilfe von CTD-Sonden können Thermoklinen in der Wassersäule auf schnelle und einfache Art und Weise gemessen werden. Weiterhin können Dichte- und Druckfelder im Ozean bestimmt werden, welche auf die Zirkulation des Wassers einen wesentlichen Einfluss haben. Durch die voranschreitende Miniaturisierung der elektronischen Sonden, werden CTD-Sondenträger mittlerweile ebenfalls mit Sauerstoff- und Chlorophyllsonden ausgestattet. Damit lassen sich Aussagen über die Entstehung und den Werdegang der untersuchten Wassermasse treffen und sogar bestimmen, wann der letzte Kontakt an der Wasseroberfläche stattgefunden hat [59].



**Abbildung 3.8.:** Eine CTD-48 Messsonde der Firma Sea & Sun, welche ebenfalls am Monsun Unterwasserroboter verwendet wird. Die Sonde ist in einem Titangehäuse untergebracht und die Sondenköpfe werden von einem Käfig gegen äußere Beschädigungen geschützt. Weiterhin verfügen die Sonden über eine eigene Energieversorgung und können so autark über viele Stunden betrieben werden [60].

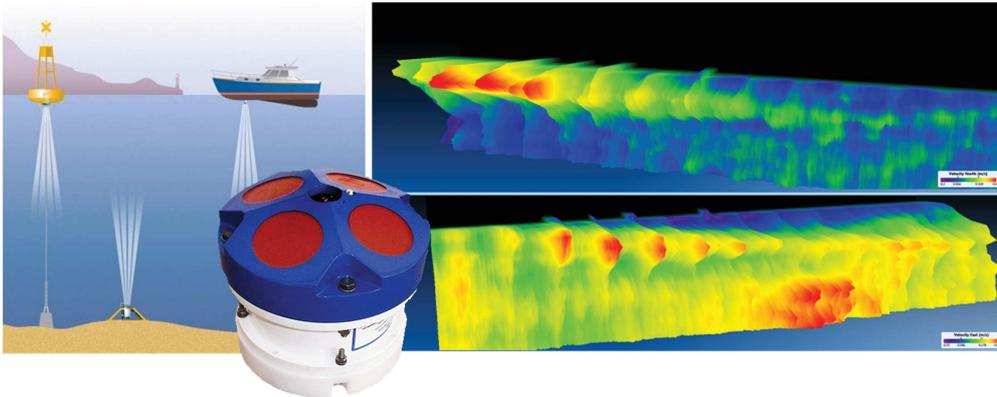
### ADCP Strömungsmessgerät

Ebenso wichtig wie die biologischen und chemischen Eigenschaften des Wassers sind die Bewegungsenergie und Strömungen in der Wassersäule. Anhand dieser Werte können genauere Aussagen über den Nährstoff- und Wasseraustausch mit der Oberfläche getroffen werden, welches in der Meeresforschung nicht nur im Forschungsbereich der submesoskalen Wirbel von großer Relevanz ist. In Binnengewässern können die Strömungsgeschwindigkeiten weiterhin auf eklatante Änderungen der Gewässerstruktur hindeuten [61].

Strömungsmessungen werden in der Regel akustisch durchgeführt. Dabei bedient man sich des Doppler-Effekts der sich ausbreitenden Schallwellen und kann elektronisch mithilfe eines sogenannten ADCP (**A**coustic **D**oppler **C**urrent **P**rofiler) Profile der Strömungsgeschwindigkeit über einen Tiefenbereich von bis zu 1000 m aufnehmen. Das ADCP ist hierfür mit einem Schallkopf und mehreren Hydrophonen ausgestattet. Ein Schallimpuls mit definierter Frequenz wird periodisch ausgesendet und von Schwebeteilchen im Wasser reflektiert. Die reflektierten Signale werden von den Hydrophonen empfangen und anhand der Signallaufzeit und Frequenzverschiebung kann die Tiefe und Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt werden. Die Sensoren sind klein genug, dass sie problemlos an Schiffsrümpfen platziert werden können. Außerdem werden sie oftmals in verankerte Bojen und CTD-Rosetten am Meeresboden integriert, um kontinuierliche Messungen über die Zeit aufnehmen zu können [62]. Die Abbildung 3.9 illustriert neben einem Sondenkopf und den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten einen repräsentativen Plot der Strömungsgeschwindigkeit in einem Flussbett. Deutlich zu erkennen sind die verschiedenen Stärken und Richtungen der Strömungen im gesamten Tiefenprofil.

### Mikrostruktursonde

Die turbulente Vermischung unterschiedlicher Wassermassen hervorgerufen durch Strömungsprozesse findet ebenfalls in vielfach kleinerer Skalierung auf molekularer Ebene statt. Dabei vermischen sich Wassermassen unterschiedlicher Dichte durch Diffusion von Salz und Temperatur, welches auch als diapycnische Vermischung bezeichnet wird. Diese Bewegungen finden auf vertikalen Skalen in der Größenordnung von wenigen Metern bis zu Millimetern statt, wodurch dieser Skalenbereich auch als Mikrostruktur des Ozeans bezeichnet wird. Für ein besseres Verständ-



**Abbildung 3.9.:** Mittig illustriert ist der Sondenkopf eines Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) mit einem Schallkopf und vier Hydrophonen. Diese können mobil oder stationär in verschiedensten Szenarios verwendet werden. Rechts abgebildet ist ein repräsentativer Strömungsdatensatz, aufgenommen über eine gesamte Woche in zwanzig verschiedenen Tiefen bis zu einer maximalen Wassertiefe von 400 m. Das obere der beiden zeigt Strömungen in Nord-Süd Richtung, dass untere in Ost-West Richtung. Zu erkennen sind die verschiedenen Stärken und Richtungen der Strömungen im gesamten Tiefenprofil [62].

nis der räumlichen und zeitlichen Variabilität der diapkyknischen Vermischung werden heutzutage sogenannte Mikrostruktursonden verwendet. Diese Multiparametersonden sind meistens mit Scherungssensoren, Temperatursensoren, einem Beschleunigungssensor und einer CTD Sonde ausgestattet. Die Scherungssensoren zur Turbulenzmessung messen kleinskalige Geschwindigkeitsfluktuationen mit einer räumlichen Auflösung von mehreren Millimetern und zusammen mit den übrigen Parametern kann die Dichte und Vermischung des Wassers genau bestimmt werden. Die Beschleunigungssensoren dienen einzig der Kompensation seitlicher Bewegungen der Sonde, die die Messergebnisse verfälschen würden. Die Mikrostruktursonden werden an einem Seil mit geringer Sinkgeschwindigkeit langsam von Booten abgelassen, um die Vermischung in der gesamten Wassersäule messen zu können. Dieses ist natürlich ein sehr zeitaufwendiger und teurer Einsatz, wodurch Datenabdeckung bisher noch sehr gering ist. Der Einsatz autonomer Trägersysteme wie beispielsweise ein Monsun Roboter sind in diesem Bereich besonders interessant [63].

Die vorgestellten Messsysteme sind in der Lage, viele der in diesem Kapitel als wichtig für das Gewässermonitoring klassifizierten Parameter zu messen. Die nachfolgende Tabelle 3.5 liefert daher einen Überblick über die Parameter und deren Messverfahren in Hinblick auf die automatisierte Messung mit computergestützten Systemen. Während für die Messung von gesamten organischem Kohlenstoff (TOC), Nitrat und Phosphat weiterhin Photometer benutzt werden, können die anderen Parameter mit Messsonden in kürzester Zeit erfasst werden. Die Messelektroden sind üblicherweise Bestandteil von weit verbreiteten CTD- oder Mikrostruktursonden, welche auch von Robotern mitgeführt werden können und damit für ein autonomes Monitoring zur Verfügung stehen. Photometer hingegen können noch nicht auf

Robotern eingesetzt werden. Sie benötigen mehrere Wasserproben und stellen mittels Spektroskopie Unterschiede zwischen diesen her. Im Kapitel 4.5.5 wird auf diese Vorgehensweise im Rahmen eines Moduls zur Wasserprobenextraktion genauer eingegangen.

<b>Gebräuchliche Messverfahren</b>		
<i>Parameter</i>	<i>Methode</i>	<i>Automatisierbar</i>
Sauerstoff	Messelektrode	✓
TOC	Verbrennungsmethode	✗
pH-Wert	Messelektrode	✓
Leitfähigkeit	Messelektrode	✓
Redoxpotential	Messelektrode	✓
Nitrat	Photometer	✗
Ammonium	Messelektrode	✓
Phosphat	Photometer	✗
Trübung	Kamera	✓
Chlorophyll	Messelektrode	✓

**Tabelle 3.5.:** Gegenüberstellung wichtigster Parameter des Gewässermonitorings und der gebräuchlichsten Messverfahren

# 4

## Der Roboter Monsun

In der Informatik geht es genau so wenig um Computer, wie in der Astronomie um Teleskope. //

//

--- Edsger W. Dijkstra

Die offenen Fragen der aktuellen Forschung und die Bestrebungen der Menschheit unseren Planeten zu untersuchen und seine Schönheit zu bewahren, kann kaum mit den uns heutzutage gegebenen Möglichkeiten gelöst werden. Automatisierte Robotersysteme nehmen daher einen immer größer werdenden Stellenwert in der heutigen Gesellschaft ein, können sie doch mit algorithmischer Präzision Aufgaben erledigen, welche sonst kaum vorstellbar wären. Waren in den vergangenen Jahrzehnten besonders die an Land betriebenen Roboter das Hauptforschungsfeld, so finden heutzutage im Bereich der fliegenden autonomen Roboter besonders große Fortschritte statt. Diese sogenannten Flugdrohnen verfügen über eigene Intelligenz und können autark ganze Gebiete überwachen, wobei sie aufgrund der relativ kleinen Größe in Gegenden operieren, die für den Menschen kaum erreichbar sind. Diese Entwicklung nimmt im Rahmen des Gewässermonitorings der Ozeane und Binnengewässer auch Einzug in schwimm- und tauchfähige Robotersysteme. Dabei gestaltet sich die robotergestützte Eroberung des Lebensraums Wasser als besonders kompliziert, da viele Konzepte für diesen Anwendungsraum neu entwickelt und angepasst werden müssen [64]. Der in dieser Arbeit präsentierte Roboter Monsun reiht sich passend in die geschilderte Entwicklungskette ein.

Dieses Kapitel dient der detaillierten Beschreibung des Roboters Monsun, beginnend bei der Entwicklung innovativer Designkonzepte des Roboters und umgesetzter

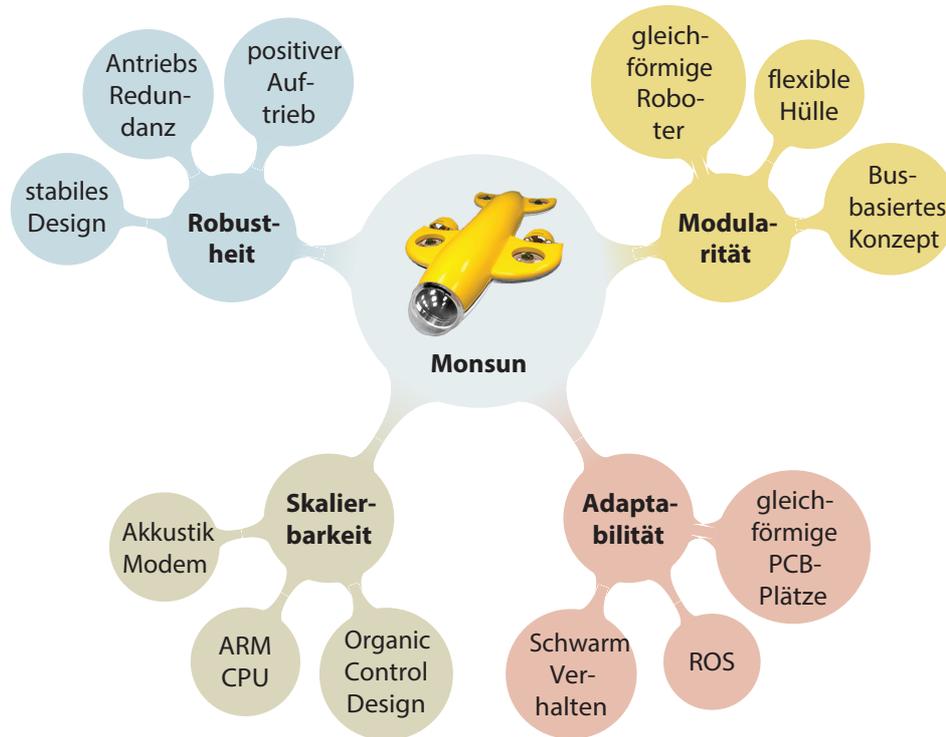
Prinzipien für den Einsatz in vielen aktuellen Forschungsbereichen. Der Aufbau in Hard- und Software wird genau spezifiziert und Besonderheiten, welche den Roboter von ähnlichen System abgrenzen, werden aufgezeigt. Das modulare Erweiterungspaket von Monsun verdeutlicht anschließend die Modularität des Gesamtkonzepts, mit welchen viele Einsatzarten realisierbar werden. Da sich die Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten unter Wasser stark von denen an Land üblichen unterscheiden, widmet sich ein Unterkapitel der verwendeten Unterwasserkommunikation und wie sie bei diesem Robotersystem angewandt wird. Abschließend wird die Softwarestruktur des Roboters genau beleuchtet, um den Gesamteindruck über das vollständige System abzurunden.

Teile dieses Kapitels beruhen auf den eigenen Veröffentlichungen [OMA<sup>+</sup>12, MEOM13, MOM13, MEIM14, MRM16].

### **4.1. Innovative Designkonzepte**

Bei der Konzeption eines Roboters müssen bereits im Designprozess viele wichtige Dinge beachtet und hinsichtlich der späteren Einsatzszenarien gründlich geplant werden. Besonders im Bereich der Unterwasserrobotik gelten eingrenzende Rahmenbedingungen, da die Funktionalität des Roboters in Anwendungsgebieten gewährleistet werden muss, die der Mensch selber nur sehr schwer erreichen kann. Aus diesen Gründen ist die Anzahl der heutzutage vorhanden Unterwasserroboter noch stark limitiert und viele Plattformen befinden sich noch in einem reinen Forschungszustand. Die Kosten eines AUVs sind verglichen mit an Land betriebenen Robotern sehr hoch, da die Testmöglichkeiten sehr begrenzt und mit hohem Aufwand verbunden sind. Gleichzeitig führt die nötige Wasser- und Druckfestigkeit des Gehäuses zu hohen Produktionskosten, welche das Design gleichzeitig besonders eingrenzen. Um unter diesen Umständen bestehen zu können, beinhalten die meisten Roboter eine große Anzahl an spezieller Sensorik und komplizierter Elektronik, um für viele Einsätze geeignet zu sein. Das hat allerdings den Nachteil, dass die Roboter einen sehr großen Formfaktor haben und dadurch auf viele externe Hilfsmittel im Einsatz angewiesen sind.

Die Entwicklung des Unterwasserroboters Monsun begann bereits im Jahr 2009 am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck. In dieser dort durchgeführten Machbarkeitsstudie wurde die Umsetzung eines kleinen Unterwasserroboters erprobt und erste Versuche wurden durchgeführt, deren Ergebnisse in den späteren drei Entwicklungsstufen mündeten (siehe Abbildung 4.2). Die erste Generation des Roboters lieferte viele Informationen, welche bei den folgenden Designschritten beachtet werden mussten. So wurde entschieden, die Elektronikkomponenten nicht fest mit der druckdichten Hülle des Roboters zu verbinden, wodurch die Fehleranalyse und Wartung vereinfacht wurde und gleichzeitig die Modularität des Roboters stieg. Um eine einfache Wartung des Roboters gewährleisten zu können, wurde das Prinzip eines mittig im Roboter platzierten Bajonettrings erprobt. Durch diesen war es schnell möglich, an das Innere des Roboters ohne zusätzliches



**Abbildung 4.1.:** Konzeptionelles Design des autonomen Monsun Unterwasserroboters. Es ist charakterisiert durch ein robustes und modulares Design, welches einen hohen Grad der Adaption an viele unterschiedliche Missionen ermöglicht. Zur Nutzung des Roboters in einem kontrollierten Schwarm bestehend aus mehreren Individuen wurde das Design skalierbar hinsichtlich großer Stückzahl gestaltet [MEIM14].

Werkzeug zu gelangen [65].

Die erste Generation von Monsun verfügte über ein aktives Tauchsysteem, bestehend aus zwei vertikal montierten Motoren und einem am Heck befindlichem Leitwerk aus Höhen- und Seitenrudern. Allerdings erwies sich dieses System als nicht tauglich. Der Roboter konnte zwar tauchen, allerdings benötigte er eine hohe Geschwindigkeit um unter Wasser zu gelangen. Ebenfalls ausgeschlossen war ein Verweilen auf der Stelle unterhalb der Wasseroberfläche, welches für Inspektionen und Überwachungen unabdingbar ist. Als Kontrolleinheit wurde ein AVR 8-Bit Mikrocontroller verwendet, mit dem sich die integrierte Sensorik auswerten lies und diverse Fahrtregler implementiert werden konnten. Für höhere Verhalten der mobilen Robotik war die Rechenleistung allerdings zu schwach. Die Arbeit an der ersten Generation des Monsun Roboters wurde nach Ende der Studie eingestellt, da ein Neudesign des Roboters für die angedachten Aufgaben unumgänglich war, allerdings waren die gewonnenen Kenntnisse für den Bau eines kleinen und flexiblen Unterwasserroboters von hohem Wert.

Die gemachten Erfahrungen bildeten das Fundament für beschlossenen Entscheidungen und Richtlinien beim Neudesign des Monsun Unterwasserroboters, welches sich auf vier Hauptsäulen beim Designkonzept verteilt: eine hohe *Robustheit* des

kompletten Roboters gegenüber Belastungen und äußeren Einflüssen, eine hohe *Modularität* in Hard- und Software, eine *Skalierbarkeit* des Gesamtsystems für den angedachten Betrieb eines Roboterschwarms und eine hohe *Adaptabilität* zur Anpassung des Systems an viele Missionen und Anforderungspotentiale auch im Bereich des Umweltmonitorings (siehe Abbildung 4.1).

### 4.1.1. Robustheit

Das Hauptaugenmerk beim Entwurf des Roboters lag auf einer erhöhten Robustheit gegenüber äußerlichen Einflüssen. So muss der Roboter einsatzbedingt nicht nur wasserdicht und druckfest bis in eine Tiefe von 100 m sein, sondern auch den Einsatzbelastungen, ob in stark bewachsenen Binnengewässern oder rauen Küstengewässern, standhalten. Die Belastungen erhöhen sich weiter, bedenkt man die Gefahren bei der Einbringung oder Bergung des Roboters von einer steilen Schiffswand bei erhöhtem Wellengang. Aus diesen Gründen wurde der Roboter aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) in mehreren Teilen gefertigt, welche unter Integration von Aluminiumprofilen fest verklebt wurden. Neben einer einfachen Fertigung verleiht das Glasfasergewebe dem Roboter eine erhöhte Elastizität, welches ihm ermöglicht, auch härtere Schläge durch Kollisionen mit bspw. Schiffsrümpfen schadlos zu überstehen. Zusätzlich ist das Material leichter als ein vollständiger Rumpf aus Aluminium und unempfindlich gegenüber Korrosion. Das Gewicht des Roboters ist so kalkuliert, dass ein positiver Auftrieb des Gesamtsystems erreicht wird. Dieses verhindert einen Roboterverlust bei einem Totalausfall der Elektronik oder Aktorik und erhöht die Robustheit des Systems weiter, da der Roboter an der Oberfläche treibt und so eine Bergung und Datenrekonstruktion ermöglicht wird. Die Öffnung des Roboters erfolgt über einen Bajonettring in dessen Zentrum. Der Ring ist aus Aluminium gefertigt und beinhaltet zur Abdichtung eine Verzahnung mit innen liegendem Dichtring. Durch weitere Behandlung mit zusätzlichen Schmierstoffen kann eine Dichtigkeit laut Hersteller bis in 100 m gewährleistet werden. Die aktuelle Variante des Monsun Roboters verfügt sogar über einen zusätzlichen Bajonettring an der Front, welcher zur Anbringung einer Acrylglaskuppel oder diverser Sensorik verwendet werden kann.

Die Erfahrungen der ersten Designstudie zeigten, dass ein Leitwerk zur horizontalen und vertikalen Richtungsänderung ungeeignet ist. Daher wurde die Aktorik des Roboters komplett geändert und eine Aktorik mit sechs Motoren in das System integriert, welche eine Beweglichkeit in fünf Freiheitsgraden ermöglicht [66]. Als Motorentyp wurden bürstenlose Motoren gewählt, welche sich durch eine sehr kleine Bauform bei gleichzeitiger Unempfindlichkeit gegenüber Wasser auszeichnen. Zur Anbringung der Motoren wurde der Rumpf des Roboters mit seitlichen Flügeln erweitert. An und in diesen Flügeln dienen vier horizontal angeordnete Motoren der geregelten Tiefen- und Lagekontrolle des Roboters bei gleichzeitiger Schaffung von einer Antriebsredundanz. Die horizontalen Motoren ermöglichen nicht nur Hovering<sup>1</sup> unter Wasser, sondern erhöhen auch die Fehlertoleranz des Roboters, da die volle Funktionstüchtigkeit auch beim Ausfall eines Motors gewährleistet werden

---

<sup>1</sup> Geregeltes Schweben des Roboters über einer festgelegten Position unter Wasser



**Abbildung 4.2.:** Die drei Entwicklungsstufen des Monsun Unterwasserroboters in seiner Grundform. Die erste Generation (links) lieferte viele wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung und Konzeption der nachfolgenden Robotergenerationen. Das Antriebskonzept und Formgebung wurden bereits in der zweiten Generation (Mitte) komplett geändert, bevor die Finale Version unter Zuhilfenahme von modernen Fertigungstechniken entwickelt wurde [65, 66].

kann. Die verbliebenen zwei Motoren befinden sich im Zentrum des Roboters und sind vertikal ausgerichtet, um ähnlich eines Differentialantriebs Bewegungen in der Ebene zu ermöglichen. Außerdem ist es dem Roboter möglich, auf der Stelle zu rotieren, was ihn von vielen anderen Unterwassersystemen unterscheidet.

### 4.1.2. Modularität

Viele kommerzielle Unterwasserroboter ähneln sich in ihrer Bauform und dem inneren Aufbau: eine oftmals röhrenförmige Hülle, selten unterbrochen durch einige Flügel oder Aufbauten, um die hydrodynamischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Ihre Größe und Kraft beträgt mehrheitlich ein Vielfaches von der eines Monsun Roboters und dieses benötigt eine entsprechend große Kapazität der Batterien. Diese Eigenschaften verhindern auf der einen Seite flexible Einsatzmöglichkeiten, da oftmals schweres Gerät benötigt wird, um den Roboter operieren lassen zu können und auf der anderen Seite verhindern sie Veränderungen an den Roboter, beispielsweise bei einem Tausch benötigter Sensorik oder im Fehlerfall.

Beim konzeptionellem Design des Monsun Roboters wurde ein besonderer Wert auf eine erhöhte Modularität gelegt. Keine verwendeten Komponenten sind stark miteinander verzahnt und daher leicht austauschbar. Die Hülle ist flexibel gestaltet und ermöglicht die Anbringung externer Sensorik an verschiedenen Stellen der Außenhaut des Roboters. Durch moderne Fertigungsverfahren sind die Roboter identisch geformt und ganze Teile der Hülle, beispielsweise ein gesamtes Heck mit beinhaltender Elektronik und Sensorik, kann einfach gewechselt werden. Dieses Designkonzept wurde im Inneren des Roboters ebenfalls weitergeführt. Die Elektronik basiert auf einer Bus-basierten Kommunikationsarchitektur mit gleichförmigen PCB Steckplätzen für Sensorik, Aktorik und Kontrolleinheiten. So ist es nicht nur möglich, fehlerhafte Komponenten schnell und einfach auszutauschen, sondern auch das Verhalten des Roboters lässt sich schnell und komfortabel durch Austausch diverser Kontrolleinheiten verändern.

### 4.1.3. Adaptabilität

Die Modularität des Roboters Monsun erlaubt nicht nur eine flexible Handhabung, sondern auch einen hohen Grad an Adaptabilität und Anpassbarkeit an diverse Missionen im Bereich des Unterwassermonitorings. So lassen sich die Roboter einfach auf unterschiedliche Weisen konfigurieren und ausrüsten, um ein breites Spektrum an denkbaren Aufgaben abdecken zu können. Neben einer Grundkonfiguration, bestehend aus Sensorik für die benötigte Lage- und Tiefenregelung, kann durch Ausnutzung der gleichförmigen PCB-Steckplätze diverse weitere Sensorik in den Roboter integriert werden. Im Frontbereich können zusätzliche bildgebende Sensoren integriert werden, welche nicht nur für gegenseitige Roboteridentifikation, sondern auch für Inspektionsaufgaben geeignet sind. Die Organisation der Komponenten ist innerhalb des Systems nicht festgelegt, wodurch eine komplett flexible Bestückung möglich ist. Weiterhin können im mittleren Teil des Roboters eigenständige Erweiterungsmodule platziert werden, die in der Lage sind, die Einsatzmöglichkeiten und Hardware des Roboters komplett zu ändern. Durch diesen hohen Grad an Modularität entsteht ein Gesamtkonzept, welches durch kommerzielle Roboter im Moment in diesem Umfang kaum geleistet werden kann.

Die Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Einsatzszenarien setzt sich in der Softwarearchitektur des Roboters fort. Die Verwendung des frei verfügbaren Software Frameworks *ROS - Robot Operating System* bietet einen hohen Grad an Abstraktion und Kapselung der einzelnen Softwarebestandteile. Gerätetreiber und Funktionen können unabhängig voneinander implementiert werden und nutzen ein gemeinsames Kommunikationsnetzwerk basierend auf einer TCP/IP Netzwerkstruktur. Dadurch können einzelne Softwareteile an vielen Stellen wiederverwendet werden und die Softwareentwicklung kann losgelöst von der eigenen Maschine erfolgen. Wird für eine neue Mission ein neuer Sensor benötigt, kann dieser einfach auf einen freien PCB Steckplatz im Roboter integriert werden und auf demselben Wege wird die spezifische Software in das Kontrollsystem von Monsun integriert.

Reicht die modulare Änderung des Roboters nicht aus, um diesen an ein neues Einsatzszenario anzupassen, kann außerdem die Fähigkeit des Roboters in einem Schwarm zu agieren ausgenutzt werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Schwarmintelligenz ist die Ausnutzung der verteilten Einheiten zur Adaption an sich verändernde Umgebungen. So können mit mehreren Individuen auch Aufgaben erfüllt werden, welche mit einem einzelnen Roboter unmöglich sind.

### 4.1.4. Skalierbarkeit

Je größer die Roboterplattformen im Bereich der Unterwasserrobotik werden, desto mehr Kapazitäten haben die Fahrzeuge, anspruchsvolle Sensorik und Nutzlasten zu transportieren. So können mithilfe von Sonaren und Trägheitsnavigationssystemen die schwierigen Lokalisations- und Navigationsaufgaben auf relativ einfache Art und Weise gelöst werden. Der Nachteil solcher Entwicklungen liegt allerdings auch klar auf der Hand, kosten die dafür verwendeten Sensoren schließlich ein Vielfaches der Materialkosten eines einzigen Monsun AUVs. Um den Nachteil der geringeren sensorischen Kapazitäten auszugleichen, werden die Monsun Roboter nicht alleine

eingesetzt, sondern operieren gleichzeitig in einer vernetzten Einheit.

Um so einen sogenannten Roboterschwarm ermöglichen zu können, muss bereits in der Designphase ein großer Wert auf die Skalierbarkeit des Systems gelegt werden. Bei der Fertigung wurde auf eine einfache Formgebung geachtet, die es erlaubt, ohne größeren Aufwand eine größere Anzahl an Robotern herzustellen. Anbauteile und Zubehör sind einfach mittels des 3D-Druckverfahrens zu duplizieren und die interne Elektronik erspart aufgrund der PCB Steckplätze Verkabelungsaufwand zwischen den Komponenten. Das Betriebssystem des Roboters befindet sich zusätzlich auf einer SD-Karte, welche einfach kopiert werden kann und somit die Vervielfältigung auf mehrere Roboter einfach möglich macht.

Um als Einheit mehrerer Roboter fungieren zu können, müssen diese in der Lage sein, untereinander zu kommunizieren und sich weiterhin gegenseitig als Mitglieder des Schwarms identifizieren können. Daraufhin wurde während der Designphase des Roboters parallel mit der Entwicklung eines Akustikmodems begonnen, welches sich als Eigenentwicklung perfekt in das Gesamtkonzept einfügt [67].

Während der noch laufenden Entwicklungsphase wurden bereits einige beschlossene Designkonzepte umgesetzt und als Ergebnis mit Monsun II bezeichnet. Dieser Roboter wies eine orange Farbgebung auf und in ihm wurden bereits die wichtigsten Konzepte umgesetzt [66]. So verfügte er über das Antriebskonzept bestehend aus 6 bürstenlosen Motoren in seitlich angebrachten Flossen. Weiterhin wurde ein erster Prototyp der Bus-basierten Elektronik integriert, allerdings bestand sie hauptsächlich aus Entwicklungsboards. Als Controller wurde ein Surveyor SRV-1 Blackfin Kameramodul verwendet, mit dem schon erste Verhalten implementiert wurden, die Rechenleistung allerdings noch zu schwach war [67]. Die fortschreitende Entwicklung eingebetteter Controller führte anschließend zu der Verwendung leistungsstarker ARM CPUs, welche die Implementierung höherwertiger Verhalten ermöglichte. Diese waren aufgrund hauseigener Projekte organisch inspiriert und teilten die Funktionalitäten in verschiedene Einzelteile auf, welche erst kombiniert ein erwünschtes Gesamtverhalten ergaben.

Im Jahr 2013 war die Designphase des Roboters Monsun abgeschlossen und in einem Beitrag auf der ICRA<sup>2</sup> erstmals vorgestellt [MOM13]. Die finale Version des Roboters ist seit dem leicht an der gelben Farbgebung zu erkennen. In ihr wurden alle vormals entwickelten Konzepte umgesetzt, wodurch der Roboter Monsun eine solide Plattform für weitere Entwicklungen bildet.

## 4.2. Wasserdichter Korpus

Mit der wichtigste Part von Monsun ist der druckfeste Korpus, welcher die komplette Elektronik mit zugehörigen Batterien und Peripheriegeräten beinhalten muss, um sie vor den äußeren Einflüssen zu schützen. Dies bedeutet nicht nur den Schutz vor Wasser und Druck in der Tiefe, sondern auch eine Absicherung gegenüber Kollisionen mit anderen Robotern und Hindernissen unter Wasser. Für die Fertigung der Hülle

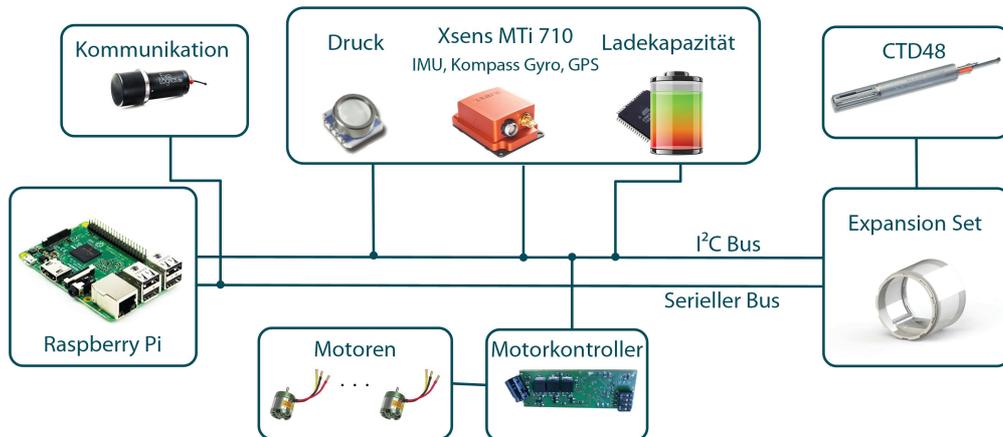
---

<sup>2</sup>ICRA | IEEE International Conference on Robotics and Automation



**Abbildung 4.3.:** Die Hauptbestandteile des wasserdichten Korpus von Monsun . Der Druckkörper wird aus vier glasfaserverstärkten Halbschalen aus Kunststoff (GFK) gebildet, welche mittig fest verbunden werden. Zwei Bajonettringe an der Front und in der Mitte des Roboters dienen als Eingriffspunkt in den Roboter. Seitlich werden jeweils zwei Flossen am Rumpf befestigt, welche zur Stabilität einen Aluminiumkern enthalten. Vorne dient eine Kuppel aus Acrylglas als Sichtmöglichkeit nach außen. Gleichzeitig ist es dem Nutzer durch die Kuppel möglich, anhand von innen angebrachten LEDs den internen Zustand sowie den Ladezustand des Roboters zu ermitteln.

wurde glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) gewählt, welcher sich durch besonders hohe Stabilität, Schlagfestigkeit, sowie Korrosionsbeständigkeit auszeichnet. Durch das integrierte Fasergewebe wird dem Grundstoff ein gewisse Elastizität verliehen, wodurch Kollisionen unbeschadet überstanden werden können. Gleichzeitig ist die Verarbeitung einfach, welches besonders im Hinblick auf Skalierbarkeit und Fertigung größerer Stückzahlen von Vorteil ist. Der Korpus des Roboters wird aus vier GFK Halbschalen mithilfe von H-Profilen fest verklebt, wodurch eine röhrenförmige Form entsteht, welche besonders günstige hydrodynamische Eigenschaften bietet. Die Halbschalen wurden gewählt, da sie einfacher als geformte Hohlkörper zu fertigen sind und präziser aufeinander angepasst werden können. An der Front und in der Mitte des Roboters werden die Bajonettringe aus Aluminium verbaut, welche später einen Zugang zum Inneren des Roboters ermöglichen. Für die Aufnahme der Motoren dienen Flügel an den Seiten des Roboters. Sie bestehen aus Hartschaumkunststoff mit einem innen liegenden Aluminiumkern, da sie bei Kollisionen die meiste Energie aufnehmen und der Kollision standhalten müssen, ohne abzureißen oder die Druckhülle des Roboters zu beschädigen. Die oberen Teile der Flügel werden zusammen mit dem Aluminiumkern fest mit der Hülle des Roboters verklebt und verfügen im Inneren über Kabelkanäle zur Aufnahme der Motorkabel. Um auch im späteren Einsatz an diese Schnittstellen zu gelangen, ist der untere Flügelteil mit dem oberen jeweils verschraubt. Bei der Platzierung wurde darauf geachtet, dass die horizontalen Motoren für die Bewegung in der Ebene im Mittelpunkt des Roboters liegen, um Rotationen auf der Stelle zu ermöglichen,



**Abbildung 4.4.:** Die Hauptkomponenten des Monsun Unterwasserroboters, verbunden über einen gemeinsamen Kommunikations- und Datenbus. Neben einem seriellen Bus wird hauptsächlich der I<sup>2</sup>C Bus verwendet. Als Hauptverarbeitungseinheit dient in der aktuellen Variante ein Raspberry Pi 3 mit beinhaltender Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU. Die für die Fahrt unerlässliche Sensorik, besteht aus einem MS5803-14BA Drucksensor, einer Xsens IMU und einer internen Ladestandsüberwachung. Zur Ansteuerung der Motoren werden sechs Brushless Motorregler verwendet, welche ebenfalls über den I<sup>2</sup>C Bus angeschlossen sind. Zur Kommunikation mit dem Nutzer und anderen Robotern wird ein Unterwassermodem verwendet, welches eine akustische Datenübermittlung ermöglicht. Das Grundsystem kann weiterhin mit mehreren Modulen aus dem Erweiterungspaket, zu dem auch eine CTD-Sonde gehört, erweitert werden.

welche besonders bei der stationären Inspektion benötigt werden. Insgesamt werden hierfür in den Flügeln des Roboters sechs jeweils drei-polige wasserdichte Steckkontakte installiert, um die Motoren an die innere Elektronik anzubinden. Zusätzlich befinden sich in den Flügeln noch zwei vier-polige Steckkontakte, welche direkt an den Kommunikationsbus des Roboters angeschlossen und für externe Anbringung weiterer Sensorik vorgesehen sind. Darüber hinaus wird abschließend am Heck des Roboters ein weiterer fünf-poliger Steckkontakt für eine serielle Datenkommunikation eingefügt.

### 4.3. Elektronik und Komponenten

Eine der größten Herausforderungen beim Bau von Unterwasserrobotern ist die Unterbringung der Elektronik und Komponenten in einer beengten und meist runden Form des Roboterkorpus. Eine weitere Besonderheit des Monsun AUVs ist die kleine Bauform, welche ein ausgeklügeltes Elektronikdesign voraussetzt, um den stark beschränkten Platz bestmöglich auszunutzen und den Anschluss der Peripherie an den Roboter so einfach wie möglich zu machen. Die Abbildung 4.4 illustriert die Hauptkomponenten, welche zum Betrieb des Roboters in der aktuellen Konfiguration benötigt werden. Als Hauptverarbeitungseinheit wird ein Raspberry Pi 3 mit einer Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU verwendet. Dieser ermöglicht die Verwendung eines Linux Betriebssystems mit beinhaltendem ROS

Software Framework bei gleichzeitig sehr geringem Stromverbrauch von maximal 4.7 W unter Vollast. Zur Kommunikation mit der Sensorik und Aktorik des Roboters wird der I<sup>2</sup>C Bus<sup>3</sup> verwendet, wobei der Raspberry Pi als Master der Kommunikation fungiert und aktiv mit der Peripherie kommunizieren kann. Als Antriebseinheiten werden sechs bürstenlose Motoren verwendet, welche mit separaten Motortreibern ausgestattet werden und parallel oder einzeln über den Bus angesprochen werden können. Hierfür wurden im Inneren des Roboters zwei Kabelkanäle geschaffen, welche die Anschlusskabel der Motoren bis zu den mittleren Bajonettringen führen, um sie bei der Integration einfach mit der Elektronik verbinden zu können. Für einen sinnvollen Betrieb des Roboters wird eine minimale Konfiguration an Sensorik benötigt, mit der eine geregelte Fahrt und Positionierung gewährleistet werden kann. Hierfür verwendet das Monsun AUV einen Drucksensor, mit dem sich präzise die Tauchtiefe ermitteln und regeln lässt. Für die Lageregelung werden Gyroskope und ein Kompass verwendet, deren Daten zusammen mit GPS Signalen eine Lokalisation des Roboters ermöglichen. Diese Ansteuerungseinheiten der Sensoren werden mit der Hauptverarbeitungseinheit auf einer gemeinsamen Elektronikplatine vereinigt. Die Abbildung 4.5 zeigt die Anordnung der Komponenten auf dieser sogenannten Hauptplatine. Der Raspberry Pi befindet sich mit der Ladestandsüberwachung an der Front der Platine. Mithilfe farbiger LEDs ist es so von außen über die Kuppel einsehbar, wie der Ladestand der Betriebsakkus ist. Dazugehörig ist noch ein kleiner Piezolausprecher, welcher bei niedrigem Akkustand einen Warnton ausgibt.

Hinter dem Raspberry Pi befinden sich vier PCB Steckplätze, über die verschiedene Sensorik- und Aktorikplatinen in das System integriert werden können. Sie erlauben angeschlossener Hardware den Zugriff auf die internen Kommunikationskanäle des Systems und stellen zusätzlich vier verschiedene Versorgungsspannungen (3.3 V, 5 V, 7.4 V und 12 V) zur Verfügung. Dieses System erhöht nicht nur die Modularität des Gesamtsystems, sondern minimiert auch den benötigten Verkabelungsaufwand, wodurch gleichzeitig die Fehleranfälligkeit gesenkt wird. Die Abbildung 4.5 illustriert auf der rechten Seite die Beschaltung und Ausmaße der Peripherieplatinen. Solange die Buskonfiguration eingehalten wird, können so beliebige Platinen in das System integriert werden, und auch Aktualisierungen sind einfacher durchführbar.

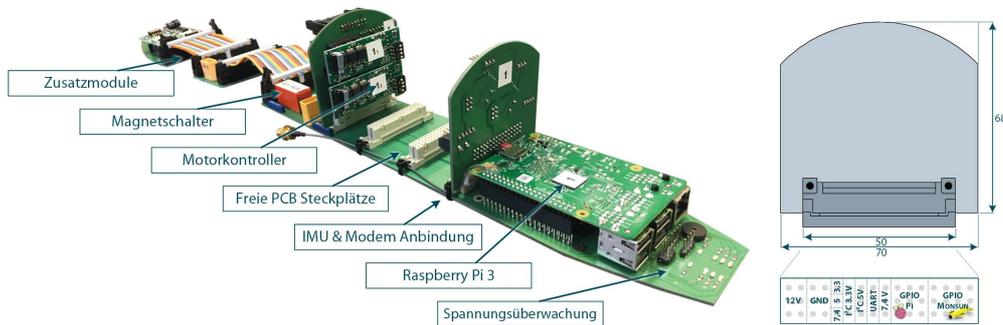
Hinter den PCB Steckplätzen befinden sich Sicherungen und der Hauptschalter des Systems, welcher über Reedschalter<sup>4</sup> magnetisch von außen betätigt werden kann. Dadurch ist eine Inbetriebnahme des Roboters möglich, ohne Zugang zur Elektronik zu haben, welches besonders im maritimen Bereich immer vermieden werden sollte. Den Abschluss der Hauptplatine bildet ein weiterer PCB Steckplatz in einer zweireihigen Ausführung. Über ein Flachbandkabel kann dort eine Verbindung zum Heck des Roboters oder zu einem Erweiterungsmodul aufgebaut werden. Dieses vereinfacht den Prozess beim Bestücken des Roboters mit der Elektronik und dem darauffolgendem wasserdichten Verschluss.

Im Heck des Roboters befindet sich ebenfalls eine Platine, welche zwei Motortreiber, einen Anschluss für den Drucksensor und einen für den wasserdichten Steckkontakt am Heck des Roboters bereitstellt. Außerdem ist genügend Platz vorhanden, um

---

<sup>3</sup>I<sup>2</sup>C, für englisch Inter-Integrated Circuit

<sup>4</sup>Reedschalter sind im Glasrohr eingeschmolzene Kontaktzungen aus einer Eisen-Nickellegierung, die magnetisch betätigt werden.



**Abbildung 4.5.:** Das Bus-basierte Elektronikkonzept des Roboters Monsun. Die Hauptplatine lässt sich in drei Bereiche einteilen: An der Front der Platine befindet sich der Raspberry Pi. Vor ihn platziert ist die interne Ladestandsüberwachung, welche zusätzlich mithilfe farbiger LEDs den Ladestand sichtbar durch die am Bug platzierte Glaskuppel darstellt. Hinter der Hauptverarbeitungseinheit befinden sich vier PCB Steckplätze, von denen in der Grundkonfiguration zwei belegt sind. Die Steckplätze erlauben angeschlossener Hardware den Zugriff auf die internen Kommunikationskanäle des Systems und stellen zusätzlich drei verschiedene Versorgungsspannungen zur Verfügung. Obligatorisch sind in dem System jeweils eine Platine mit den Motortreibern und eine, welche Positionierungssensorik (IMU) und das Unterwassermodem anbindet. Am hinteren Teil der Hauptplatine befindet sich ein Magnetschalter und ein Peripheriestecker zum Anschluss weiterer Platinen mittels eines Flachbandkabels. Illustriert ist hier ein weiteres Zwischenmodul mit einem zusätzlichen PCB Steckplatz, bevor im hinteren Teil die Heckplatine das System abschließt. Auf ihr befinden sich ebenfalls zwei Motortreiber und der Anschluss für den Drucksensor zur Tiefenregelung.

den Hauptakku des Roboters dort unterzubringen. Für die Energieversorgung verwendet ein Monsun AUV aktuell drei verschiedene Lithium Polymer Akkus. Für die Elektronik wird ein 7.4 V Akku mit 2700 mA h verwendet, welcher durch einen 11.1 V Akku mit 5000 mA h für die Motoren unterstützt wird. Das Akustikmodem wird von einem separaten 11.1 V Akku mit 1300 mA h betrieben, um elektronische Interferenzen in der Kommunikationshardware zu unterbinden. Insgesamt kann in dieser Konfiguration eine Missionsdauer von 4 h erreicht werden. Wird nicht über die volle Distanz getaucht gefahren, vergrößert sich diese Zeit noch um ein Vielfaches.

## 4.4. Sensorik und Aktorik

Eine der größten Herausforderungen beim Bau des Monsun Unterwasserroboters ist die Unterbringung der verschiedenen Komponenten in der vergleichsweise kleinen wasserdichten Hülle. Diese müssen nicht nur platzsparend verbaut werden, sondern auch in einem geringen Preisrahmen liegen, um das Ziel eines Roboterschwarms nicht zu gefährden.

Für die Motorik wurden aus diesen Gründen bürstenlose Motoren der Firma Roxxy



**Abbildung 4.6.:** Die Antriebsmotoren des Monsun AUVs mit eigens entwickelten Propellern. Auf einer Narbe sind radial vier Flügelpropeller mit einer Neigung von 30° und einer Steigung von 45° angebracht. Sie sorgen für einen gleichmäßigen Schub in beide Richtungen und besitzen ein ausbalanciertes Verhältnis von Kraft und Umdrehungszahl. Die Propeller werden als 3D-Druck gefertigt und mittels Pressfassung auf den Motorgondeln montiert.

verwendet<sup>5</sup>. Diese für den Flugmodellsport konzipierten Motoren zeichnen sich durch einen besonders kleinen Formfaktor bei gleichzeitig starker Geschwindigkeit von 1300  $U/Min/V$  aus. Die Motoren werden in den Flügeln des Roboters angebracht und für den Unterwassereinsatz entsprechend modifiziert. Die Spulen der radial angeordneten Elektromagneten werden mit einem wasserabweisenden Plastiklack überzogen und die Kugellager gegen korrosionsbeständige Lager aus Kunststoff getauscht. Um eine Schubkraft unter Wasser zu erzeugen, wurden vierblättrige Propeller eigens für den Roboter Monsun entworfen und an die Motoren angepasst (siehe Abbildung 4.6). Für einen gleichmäßigen Schub in beide Richtungen wurden die Propellerblätter symmetrisch radial angeordnet und besitzen eine Neigung von 30°. Als Form wurden Flügelpropeller gewählt, welche mit einer Steigung von 45° auf der Propellernarbe angebracht sind. Dieser Aufbau gewährt einen gleichmäßigen Schub in beide Richtungen und ein ausbalanciertes Verhältnis von Kraft und Umdrehungszahl. Die Propeller werden mithilfe des 3D-Druckverfahrens in einem Stück gefertigt und können direkt auf die Motorgondeln mittels einer Pressfassung montiert werden. Dies minimiert die Kosten sowie den Wartungsaufwand und erleichtert den Austausch defekter Module. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [68] wurden speziell für die Motoren konzipierte Motortreiber entworfen, welche es erlauben, auch geringe Drehzahlen zu fahren und die Regelung des Roboters dadurch vereinfachen. Die Treiber verfügen über ein eigenes I<sup>2</sup>C Interface und können einzeln oder per Broadcast angesprochen werden. Dieses hat den Vorteil, dass beispielsweise die vier vertikalen Motoren über einen einzigen Befehl angesteuert werden und so ohne Zeitversatz starten können. Für die Adaptierbarkeit der Treiber wurden diese mit einem Schalterbaustein bestückt, mit dem sich die jeweilige Slave Adresse ändern lässt. Außerdem kann die Drehrichtung für positive Stellwerte an den jeweiligen Motor angepasst werden. Intern führen die Motortreiber eine Strommessung durch Messung des Spannungsabfalls über einem Messwiderstand durch. Im Fehlerfall

---

<sup>5</sup>Roxy BI Outrunner 2220/20



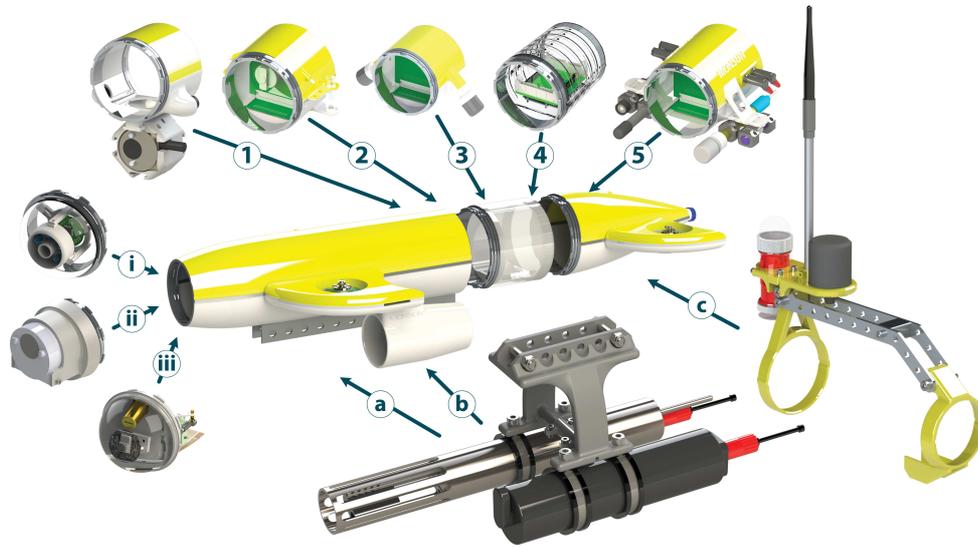
**Abbildung 4.7.:** Grundlegende Positions- und Lagesensorik des Monsun Unterwasserroboters. *links:* Ein MS5803-14BA Miniatur-Drucksensor der Firma TE-Connectivity auf eigener Vorverarbeitungsplatine. Der Sensor wird fest in der Außenhaut des Roboters verklebt und liefert dem System gefilterte Tiefenwerte als I<sup>2</sup>C Slave. *rechts:* Ein XSens MTi-G-710 Gyroskop, Kompass und GPS-Modul welches fest im Roboter verschraubt wird. Es liefert Winkelbeschleunigungen und Ausrichtungen des Roboters auf allen dreidimensionalen Achsen im Raum und besitzt einen GPS Empfänger mit externer Antenne zur Lokalisation des Roboters an der Wasseroberfläche

können so Treiber abgeschaltet werden, bevor ein Schaden der Elektronik verursacht wird. Die Eigenentwicklungen von Propellern und entsprechenden Motortreibern waren aus verschiedenen Gründen notwendig. Die handelsüblich zur Verfügung stehenden Propeller werden hinter den Motorgondeln auf einer Welle platziert, wodurch sich die Bauhöhe des gesamten Unterwassermotors mehr als verdoppelt. Bei Monsun werden die Motoren allerdings direkt in den Flügeln verbaut und sollten nicht über diese heraus ragen. Daher wurden eigene Propeller konzipiert, die direkt auf der Motorgondel mittels einer Pressfassung geschoben werden. Die passenden Motortreiber wurden aus dem Grund entwickelt, da erwerbbar Einheiten für sehr hohe Drehzahlen konzipiert werden und im niedrigen Drehzahlbereich über eine Totzeit verfügen, die eine spezielle Art der Regelung verlangt, welche die Entwicklung behindert hätte.

Für die grundlegenden autonomen Tätigkeiten unter Wasser wird eine stabile Lage- und Tiefenregelung des Roboters benötigt. Für die Ermittlung der Tauchtiefe verwendet der Monsun Unterwasserroboter einen *MS5803-14BA* Drucksensor<sup>6</sup> (siehe Abbildung 4.7). Dieser ist für den Einsatz bis hin zu einer Tiefe von 100 m geeignet und liefert die Tiefe mit einer Auflösung von 2 cm. Der Sensor befindet sich auf einer kleinen Platine mit einem ATmega 168 Mikrocontroller und ist im Heck des Roboters direkt mit der Außenhaut verklebt. Der ATmega wertet den Sensor aus, führt eine Vorverarbeitung mit Temperaturkompensation durch und stellt die gefilterten Werte als I<sup>2</sup>C Slave dem System zur Verfügung. Die Kapselung von Vorverarbeitung und Filterung der Werte führt zu einer Entlastung des Gesamtsystems.

Für die Positions- und Lageregelung verwendet das Monsun AUV einen XSens MTi-G-710 Gyroskop, Kompass und GPS-Modul (siehe Abbildung 4.7). Dieser hochintegrierte Sensor ist das Herzstück des Roboters und vereinigt die wichtigsten Navigationsparameter in einem Gerät. Der XSens liefert Winkelbeschleunigungen

<sup>6</sup>MS5803-14BA Miniatur-Drucksensor der Firma TE-Connectivity



**Abbildung 4.8.:** Das modulare Erweiterungspaket des Monsun Unterwasserroboters unterteilt in drei verschiedene Gerätetypen [MRM16]. Am Bug des Roboters können mithilfe eines kleinen Bajonettrings verschiedene Frontmodule, wie z.B. ein optischer Distanzsensor (i), ein Sonar (ii) oder bildgebende Sensorik (iii) integriert werden. Unterhalb des Roboters befindet sich ein Geräteträger, der es erlaubt, externe Komponenten und Nutzlasten an den Roboter zu befestigen. In diesem Fall werden eine CTD-48 Sonde (a) und ein kommerzielles Unterwassermodem (b) unterhalb angebracht. Zusätzlich kann ein OzeanKit bestehend aus Tragebügel und externen Antennen von außen befestigt werden. In der Mitte des Roboters können ebenfalls mithilfe von Bajonettringen sogenannten Korpusmodule integriert werden. Illustriert sind ein Sonar Modul (1), ein Modul zur Aufnahme von Wasserproben (2), ein internes Unterwassermodem (3), ein Visual-Feedback Modul (4) und ein Environmental Monitoring Modul (5).

und Lagewinkel in allen drei Dimensionen des Raums mit einer Updaterate von 10 kHz bei einer Genauigkeit von  $0.2^\circ$ . Damit können selbst leichte relative Bewegungen des Roboters registriert und die Lage mithilfe der sechs Motoren sehr genau geregelt werden. Für die Bestimmung der Roll-Nick-Gier-Winkeländerungen und Beschleunigungen verwendet dieses sogenannte AHRS (*englisch für Attitude Heading Reference System*) neun interne Einzelsensoren und kombiniert die Werte zu einer gefilterten Positionsangabe. Ausgewertet wird der XSens durch einen eigenen ATmega Mikrocontroller, welche die absoluten Winkel aus den Daten ausliest und dem Roboter zur Verfügung stellt. Eine weitere Besonderheit des Sensors ist die Unterbringung in einem eigenen wasserdichten und geschirmten Gehäuse. Dieses verhindert einen Einfluss umgebender Elektronik auf die eingebauten Magnetometer und Gyroskope, welche besonders im kleinen Innenraum von Monsun auftreten. Eine weitere Schwierigkeit liefert der Roboter durch seine sechs bürstenlosen Motoren, welche für den Antrieb wechselnde Magnetfelder erzeugen. Diese Umstände würden viele andere Kompassmodule unbrauchbar machen.

Zusätzlich beinhaltet der XSens noch einen GPS Sensor, welcher mit einer externen Antenne verwendet werden kann und dadurch die sensorische Bedeutung um einen

weiteren Faktor steigert. Der GPS Sensor hat eine Genauigkeit von 2 m und kann durch die außen oberhalb montierten Antennen auch zur Positionsbestimmung bis zu einer Tiefe von 50 cm eingesetzt werden.

### 4.5. Modulares Erweiterungspaket

Viele kommerzielle Unterwasserroboter ähneln sich in Form und Ausstattung aufgrund der starren wasserdichten Formgebung und dem Anliegen, das Fahrzeug mit möglichst vielen Sensoren auszustatten, um für einen großen Teil an Einsatzmöglichkeiten gewappnet zu sein. Nachteilig sind dabei nicht nur der große Kostenfaktor und die vergrößerten Ausmaße des Roboters, sondern auch die geringe Flexibilität bei der Anpassung an vorher nicht definierte Einsatzszenarien. Der Monsun Roboter wurde aus diesen Gründen so konzipiert, dass er sich auf flexible Art und Weise verändern und anpassen kann [MRM16].

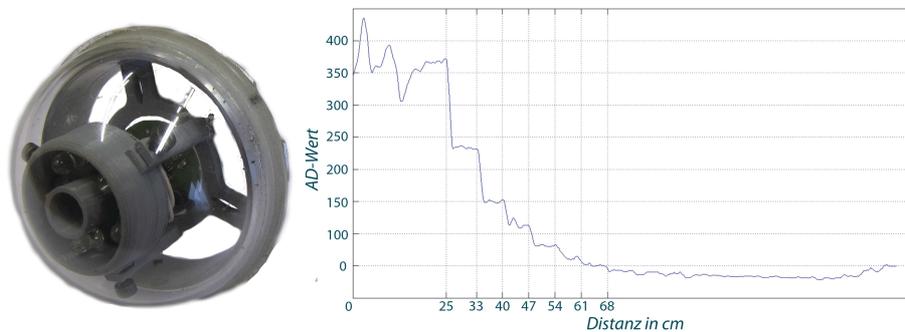
Der Roboter verfügt dafür über drei verschiedene Andockpunkte am Rumpf, über die Module und Funktionalitäten aus einem eigens entwickelten Erweiterungspaket in das System integriert werden können. An der Front des Roboters können kleine Frontmodule eingefügt werden. Diese verbinden sich durch das vorgesehene kleinere Bajonettingpaar mit dem Roboter und erweitern diesen um einige Zusatzsensorik mit geringen Platzbedarf, wie beispielsweise Abstandssensorik und bildgebenden Geräten. Im mittleren Teil des AUVs können mithilfe der großen Bajonettverschlussringe sogenannte Korpusmodule eingefügt werden. Diese erweitern das System um externe Funktionalitäten, welche das Einsatzspektrum des Roboters stark vergrößern. Dabei ist es zusätzlich auch möglich, mehr als nur ein Korpusmodul gleichzeitig zu verwenden, da sie alle untereinander kompatibel sind. Unterhalb des Roboters befindet sich weiterhin ein Geräteträger aus Aluminium, mit dessen Hilfe externe Module und Nutzlasten an den Roboter befestigt werden können, ohne eine interne Verbindung aufbauen zu müssen. Die Abbildung 4.8 verdeutlicht die drei verschiedenen Andockpunkte an dem Roboter und die bisherigen Elemente des Erweiterungspakets, welche im Anschluss genauer beschrieben werden.

#### 4.5.1. Optischer Distanzsensor

Eine wichtige Voraussetzung für Roboterautonomie ist die sensorische Fähigkeit des Systems, sich der Umgebung bewusst zu sein und mit dieser zu interagieren. Dieses beginnt bei einer einfachen Hindernisdetektion und endet bei der gegenseitigen Erkennung und Unterscheidung anderer Roboter und Geräte im Einsatzgebiet. Eine grundlegende Fähigkeit bei der autonomen Fahrt ist die Kollisionsvermeidung von Hindernissen, welches zu den elementaren Roboterverhalten gezählt wird. An Land werden hierfür vorwiegend Ultraschall- und Infrarotsensoren verwendet, welche Hindernisse schon in einer vielfachen Entfernung der eigentlichen Robotergröße erkennen lassen und dem Roboter genügend Zeit für eine Kollisionsvermeidung bieten. Kombiniert wird dieses heutzutage oft mit weiterer Sensorik, zur großflächigen Kartographierung der Umgebung des Roboters, um in einem hybrid

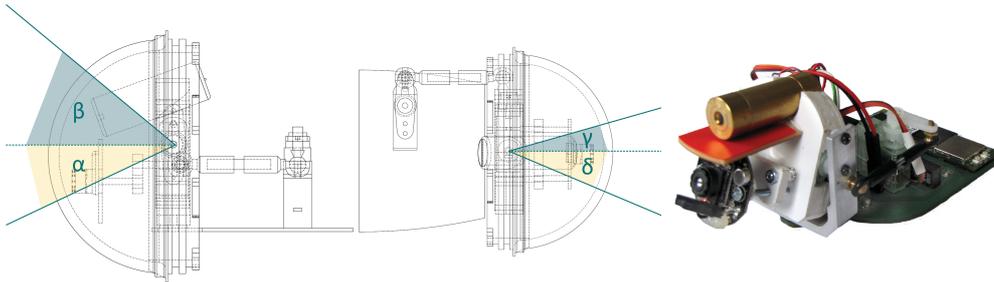
reaktiv/deliberatives Roboterparadigma die Fahrt zu planen. Dabei dienen hochauflösende Sensoren wie 2D-Laserscanner zur Erzeugung einer sogenannten Weltkarte und die reaktive Sensorik unterbricht das geplante Verhalten nur sporadisch zur Vermeidung unvorhergesehener Kollisionen, welche in der Planungsphase nicht berücksichtigt werden konnten. Im Bereich der Unterwasserrobotik wird versucht, auf diese Erfahrungen zurückzugreifen, allerdings unterscheiden sich die sensorischen Fähigkeiten von AUVs grundlegend von den an Land betriebenen Fahrzeugen. So kann Infrarotlicht im Wasser aufgrund der absorbierenden Eigenschaften nicht verwendet werden. Dieses trifft auch auf Laserscanner und 3D Kameras zu, welche heutzutage immer universeller eingesetzt werden.

Für den Monsun Roboter wurde eine Kombination mehrerer Sensoren gewählt,



**Abbildung 4.9.:** Optischer Distanzsensor als Frontmodul des Monsun Unterwasserroboters bestehend aus einem Fotowiderstand und fünf kreisförmig angeordneten Leuchtdioden. Unter der Voraussetzung von guten Lichtverhältnissen kann ein Hindernis in einer Entfernung von bis zu 68 cm detektiert werden.

um ähnliche Verhalten wie die der Landroboter zu ermöglichen. Den Anfang macht ein optischer Distanzsensor, welcher als Frontmodul vorne am Roboter montiert werden kann. Die Abbildung 4.9 zeigt den Sensor in der standardmäßig verwendeten Acrylglocke des Roboters. Er wurde speziell für Monsun angepasst und entworfen und fügt sich passend in das Gesamtkonzept mit ein. Verwendet werden ein Fotowiderstand zur Messung der Lichtstärke und fünf pulsierende blaue Leuchtdioden, montiert in einem lichtdichten Kranz aus dem 3D-Drucker. Die LEDs pulsieren bei 1 Hz und ein angeschlossener ATmega48 Mikrokontroller ermittelt über eine AD-Wandlung am Fotowiderstand die gemessene Lichtintensität. Das zwischenzeitliche Ausschalten der LEDs dient zur Hintergrundlicht-Kompensation. Dadurch werden falsche Entfernungswerte bei spontanen Lichteinfällen beispielsweise durch die Sonne kompensiert. Mithilfe dieses günstigen Aufbaus kann im klaren Wasser ein Hindernis in einer Entfernung von maximal 68 cm detektiert werden, wodurch eine Kollision sicher abgewendet werden kann. Mithilfe dieses Sensors wurde ein reaktives Ausweich-Verhalten implementiert, mit dem ein Monsun Roboter auf festgelegter Tiefe von 1 m einen Pool flächendeckend traversierte und so erste Vorarbeiten für Unterwassererkundungen und Suchaufgaben erledigen konnte.

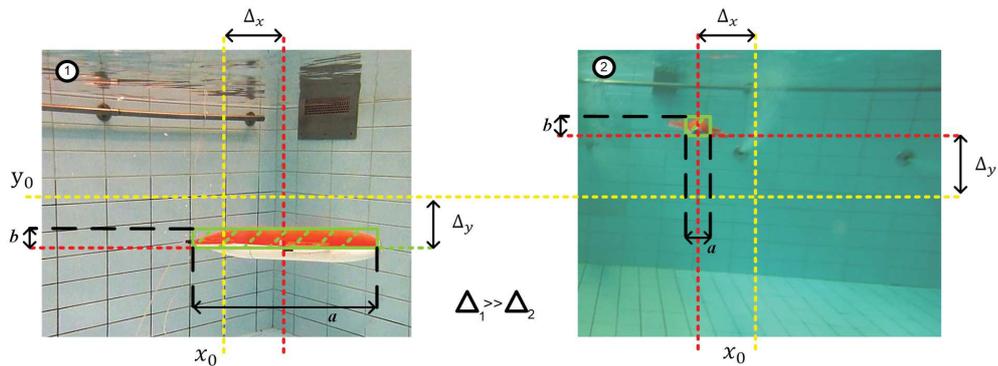


**Abbildung 4.10.:** Die bildgebende Sensorik eines Monsun Unterwasserroboters vereint eine 1080p Webcam mit einem Linienlaser auf einer Schwenk-/Neige-Einheit. Mithilfe zweier Servomotoren können Kamera und Linienlaser in der vertikalen um  $85^\circ$  Grad ( $\alpha=37^\circ$ ,  $\beta=48^\circ$ ) und in der horizontalen um  $38^\circ$  Grad ( $\gamma=16^\circ$ ,  $\delta=22^\circ$ ) bewegt werden. Mit dem Aufnahmewinkel der Kamera kann so der komplette Bereich vor dem Roboter überblickt und untersuchte Gegenstände vor ihm einfacher fokussiert werden, da keine Bewegung des AUVs von Nöten ist. Der Linienlaser dient gleichzeitig als Distanzsensoren, mit dessen Hilfe ein Objekt in maximal 1 m Entfernung erkannt werden kann. Um den Prozessor des Roboters zu schonen, verfügt die Einheit über einen eigenen Gumstix Controller, welcher die rechenaufwendige Bildverarbeitung und Steuerung der Servomotoren übernimmt.

#### 4.5.2. Bildgebende Sensorik

Die Fähigkeit von Robotern, ihre Umwelt wahrzunehmen und nicht mit Hindernissen und anderen Individuen zu kollidieren, bildet die unterste Ebene von sogenannter Schwarmintelligenz, da eine Möglichkeit der gegenseitigen Wahrnehmung geschaffen wurde. Für höherwertige Verhalten ist es unabdingbar, dass sich die Individuen zusätzlich gegenseitig erkennen, um damit eine Interaktion möglich zu machen. Dabei ist es wie in der Natur ausreichend, wenn sich diese sensorischen Fähigkeiten auf den Nahbereich beschränken. So können Stare in einem Vogelschwarm nur bis zu sechs Artgenossen in ihrer näheren Umgebung gleichzeitig erfassen, selbst wenn der Schwarm aus mehreren hundert Individuen besteht. Allerdings reicht dies für Formations- und Folgeverhalten vollkommen aus [69].

Für den Monsun Unterwasserroboter wurde ausgehend davon eine bildgebende Sensorik entworfen, welche in der Acrylglaskuppel an der Front integriert werden kann. Als Besonderheit wurde eine HD Webcam auf einer miniaturisierten Schwenk-/Neige-Einheit montiert und direkt hinter der Kuppel platziert. Die Abbildung 4.10 illustriert den Sensor als fertiges Modul. Mithilfe zweier Servomotoren kann die Kamera in der horizontalen um  $38^\circ$  und in der vertikalen um  $85^\circ$  bewegt werden, was zusammen mit dem regulären Aufnahmebereich der Kamera zu einem halbkugelförmigen Blickbereich vor dem Roboter führt. Das Design ist inspiriert von den beweglichen Augen der Natur, welche den Vorteil bieten, dass Gegenstände mit den Augenmuskeln leichter fokussiert und im Sehfeld gehalten werden können, ohne dass sich der Körper des Roboters selber bewegen muss. Damit können gleichförmige Bewegungsmuster unter Wasser erzeugt, sowie Strömungen und Wellen ausgeglichen werden. Dieses ist besonders bei der Unterwasserinspektion von großem Vorteil, wenn der Roboter vor Gegenständen stationär verharren und



**Abbildung 4.11.:** Einfaches Folgeverhalten basierend auf einer Farberkennung zusammenhängender Blöcke, kurz Blob-Erkennung. Abhängig von der Position des Blobs im Bild, werden die Fahrtregler angepasst, um dem erkannten Roboter zu folgen. Gleichzeitig liefern die Ausmaße des Blobs Informationen über den erkannten Monsun. So lässt sich anhand der Höhe  $b$  die Entfernung zum Roboter und am Verhältnis von Breite und Höhe  $\Delta = \frac{a}{b}$  die Lage bestimmen.

Unterwasseraufnahmen eines Punktes aufnehmen soll.

Als Anwendungsfall der bildgebenden Sensorik wurde bereits mit der zweiten Monsun Generation ein Folgeverhalten implementiert [OMA<sup>+</sup>12]. Die Abbildung 4.11 zeigt Aufnahmen aus einem Pool mit illustrierten Berechnungsgrundlagen. Gelangt ein anderer Monsun in den Aufnahmebereich der Kamera, erkennt ihn ein Algorithmus anhand seiner speziellen Farbwerte. Wie bei Fischen in der Natur versuchen die Roboter sich reflexartig zu folgen. Um dies umzusetzen, versuchen die Regler des Roboters den erkannten Farblob in das Zentrum des Bildes zu verschieben. Dafür werden die Differenzen zwischen dem Bildzentrum und dem Blobzentrum  $\Delta_x$  und  $\Delta_y$  berechnet. Um einen gleichmäßigen Abstand zu halten wird die Höhe  $b$  verwendet, um Aussagen über die Entfernung gewinnen zu können. Das Verhältnis von Länge  $a$  und Höhe  $b$  des Blobs liefert weiterhin Aufschluss über die Lage der Roboter zueinander.

$$\frac{a}{b} = \Delta = \begin{cases} \max, & \text{wenn } M_1 \perp M_2 \\ \min, & \text{wenn } M_1 \parallel M_2 \end{cases} \quad (4.1)$$

Befindet sich der sogenannte Verfolger Monsun  $M_2$  orthogonal zur Lage des vor ihm befindlichen Roboters  $M_1$ , nähert sich die Ausdehnung des Blobs  $\Delta$  seinem Maximum. Für den Fall, dass sich die Roboter direkt hintereinander parallel folgen, nähert sich dieser Wert seinem Minimum. Daher kann die Ausdehnung auch als Beschleunigungsfaktor für die Vorwärtsgeschwindigkeit  $v_f$  und Rotationsgeschwindigkeit  $v_r$  verwendet werden.

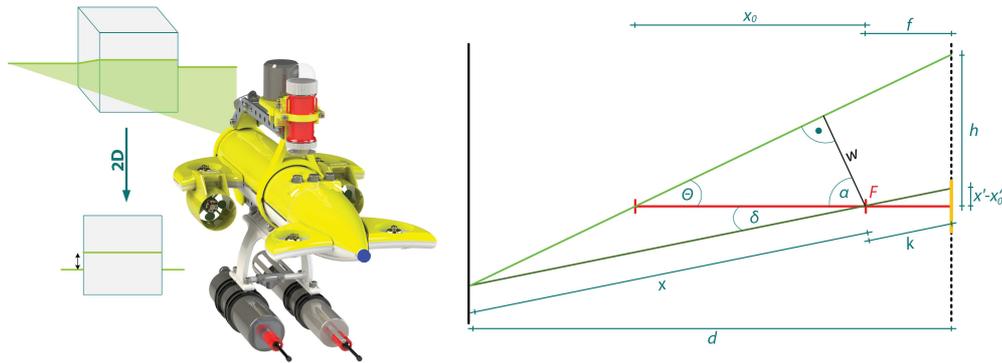
$$\Delta \sim v_r \sim \frac{1}{v_f} \quad (4.2)$$

Die Gleichung 4.2 zeigt die Relationen zwischen den Ausmaßen des erkannten Roboters und den damit verbundenen Geschwindigkeiten für das Folgeverhalten, wenn sie sich auf der selben Tiefe ohne eingestellten Neigungswinkel befinden. Sind zwei Monsun orthogonal zueinander in einer bestimmten Entfernung ausgerichtet,

benötigt der Verfolger eine hohe Rotationsgeschwindigkeit  $v_r$  und eine niedrige Vorwärtsgeschwindigkeit  $v_f$  um zu verhindern, dass der zu folgende Roboter aus dem Sichtfeld der Kamera gerät. Soll allerdings in einer Linienformation gefahren werden, muss dem führenden Roboter mit maximaler Geschwindigkeit gefolgt werden. Die Rotationsgeschwindigkeit hat hierfür einen minimalen Einfluss.

Für die Bildverarbeitung wird neben verschiedenen Bibliotheken des *Robot Operating Systems* auf die *OpenCV* Bildverarbeitungsbibliothek zurückgegriffen. Um als eigenständiges Modul zu fungieren und die Hauptverarbeitungseinheit nicht mit der komplexen und rechenaufwendigen Bildverarbeitung zu belasten, wurde die bildgebende Sensorik mit einem eigenen Controller ausgestattet. Ein 720 MHz Overo® Fire COM Gumstix Modul dient als eigenständige Verarbeitungseinheit und stellte dem Gesamtsystem aggregierte Daten über die Bildverarbeitung zur Verfügung, welche bei Bedarf abgerufen werden können.

Die in einem Frontmodul untergebrachte bildgebende Sensorik ermöglicht dem Roboter die Durchführung verschiedenster Aufgaben der Unterwasserinspektion. So können nicht nur Gegenstände verfolgt und registriert werden, sondern die AUVs können auch für Untersuchungen von Schiffsrümpfen und Hafenanlagen verwendet werden. Dabei dienen die aufgezeichneten Bilder als Grundlage für viele Erkenntnisse, die während der anschließenden Missionsauswertung erlangt werden. Der Roboter ist allerdings so konzipiert, dass nur jeweils ein spezielles Frontmodul verwendet werden kann. Dadurch ist es beispielsweise nicht möglich, bei Verwendung einer Kamera gleichzeitig den optischen Distanzsensor zu integrieren. Um diesen Nachteil zu überwinden, wurde das Modul für die bildgebende Sensorik um einen Linienlaser erweitert, um mithilfe des Lichtschnittverfahrens eine Möglichkeit der Entfernungsbestimmung bei gleichzeitiger Bildaufnahme zu schaffen. In einer Bachelorarbeit wurden hierfür die notwendigen Parameter ermittelt, um eine Distanzmessung in der Kuppel des Monsun AUVs durch das Lichtschnittverfahren durchzuführen [Lin15]. Die Abbildung 4.12 illustriert das Prinzip des Lichtschnittverfahrens in Monsun und die zugrundeliegende Triangulation als Schaubild. Über einer waagrecht positionierten Kamera wird hierfür mit einem Abstand  $h$  ein Linienlaser in einem Winkel  $\theta$  positioniert. Das Verhältnis von Abstand und Winkel bestimmt im späteren Verlauf die maximale Reichweite und die Auflösung der durchgeführten Distanzmessung. Trifft der ausgestrahlte Laserstrahl nun auf ein vor dem Roboter befindliches Objekt, wird dieser in einem anderen Winkel reflektiert als der Teil des Laserstrahls, der nicht auf das Objekt getroffen ist. In einem 2D-Kamerabild ist dieses leicht an einem Höhenversatz der aufgezeichneten Linie zu erkennen. Anhand der unterschiedlichen Höhen der Laserstrahlen und den Kenntnissen über die Kameraparameter lässt sich dadurch die Entfernung zu dem Objekt berechnen und die Bilder wurden um einen Informationsgehalt über den Abstand von Objekten angereichert. Durch die Breite des Laserstrahls können weiterführend auch ganze Oberflächenprofile aufgenommen werden, um Unterschiede in der Beschaffenheit ganzer Bereiche aufnehmen zu können.



**Abbildung 4.12.:** *links:* Die Methodik des Lichtschnittverfahrens. Der in der Front des Roboters montierte Laser strahlt eine Linie aus. Trifft dieser Laserstrahl auf ein Objekt, kann die Kamera den Höhenversatz der reflektierten Linie messen und daraus den Abstand kalkulierbar machen. *rechts:* Die Triangulation des Lichtschnittverfahrens. Der von rechts kommende grüne Laserstrahl wird in einer Entfernung  $d$  von einem Objekt reflektiert und trifft auf den Bildsensor der Kamera, welcher in orange dargestellt ist. Der Linienlaser und die Kamera sind in einem Winkel  $\theta$  und mit einem Abstand  $h$  zueinander orientiert. Mithilfe einiger Hilfswinkel und Abstände kann die Entfernung zum Objekt basierend auf dem Modell einer Lochkamera errechnet werden [Lin15].

Als Grundlage für die Berechnung der Triangulation werden als feste Parameter der Abstand von Kamera und Linienlaser  $h$ , sowie der Winkel  $\theta$  zwischen beiden verwendet. Weiterhin werden die Brennweite der Kamera  $f$  und der Mittelpunkt der Kameraebene  $x'_0$  für die Distanzermittlung benötigt. Aus dem aufgenommenen Bild lässt sich zudem einfach die vertikale Position des Laserstrahls auf der Kameraebene  $x'$  bestimmen. Um den Abstand  $d$  zum Objekt errechnen zu können, werden einige Hilfsgeraden und Winkel für die Konstruktion benötigt.

$$\begin{aligned}
 \tan \theta &= \frac{h}{x_0 + f} \\
 x_0 &= \frac{h}{\tan \theta} - f \\
 \tan \theta &= \frac{w}{x_0} \\
 w &= \tan \theta \cdot x_0 \\
 w &= \tan \theta \cdot \left( \frac{h}{\tan \theta} - f \right) = h - \tan \theta \cdot f
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Die Gleichungen 4.3 zeigen die Berechnung der Strecke  $w$ , welche zusammen mit den beiden Hilfswinkel  $\alpha$  und  $\delta$  aus den Gleichungen 4.4 für der Ermittlung der Länge des reflektierten Laserstrahls  $x$  bis zum Brennpunkt  $F$  benötigt werden.

$$\begin{aligned}
 \tan \delta &= \frac{x' - x'_0}{f} \\
 \tan \alpha &= \frac{x_0}{w}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Unter Verwendung des Additionstheorems für den Tangens und der Verwendung der vorher zusammengetragenen Hilfsgeraden und Winkel kann eine Gleichung für die Berechnung der Länge des reflektierten Laserstrahls errechnet werden.

$$\begin{aligned}
 x &= w \cdot \tan(\alpha + \delta) \\
 x &= w \cdot \frac{\tan \alpha + \tan \delta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \delta} \\
 x &= w \cdot \frac{\frac{x_0}{w} + \frac{x' - x'_0}{f}}{1 - \frac{x_0}{w} \cdot \frac{x' - x'_0}{f}} \\
 x &= w \cdot \frac{\frac{1}{\tan \theta} + \frac{x' - x'_0}{f}}{1 - \frac{1}{\tan \theta} \cdot \frac{x' - x'_0}{f}}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Mithilfe der Gleichungen 4.5 ist die Strecke des Laserstrahls vom Objekt bis zum Brennpunkt bekannt. Um jetzt die endgültige Entfernung  $d$  des Roboters zum Objekt berechnen zu können, wird noch die Länge des Laserstrahls vom Brennpunkt  $F$  bis zur Bildebene der Kamera benötigt, welche sich aus der Gleichung 4.6 ergibt.

$$k = \sqrt{f^2 + (x' - x'_0)^2} \tag{4.6}$$

Führt man die Ergebnisse aller Berechnungsschritte zusammen, erhält man die Gleichung für die Distanzberechnung eines Objekts in Front des Roboters mithilfe des Lichtschnittverfahrens:

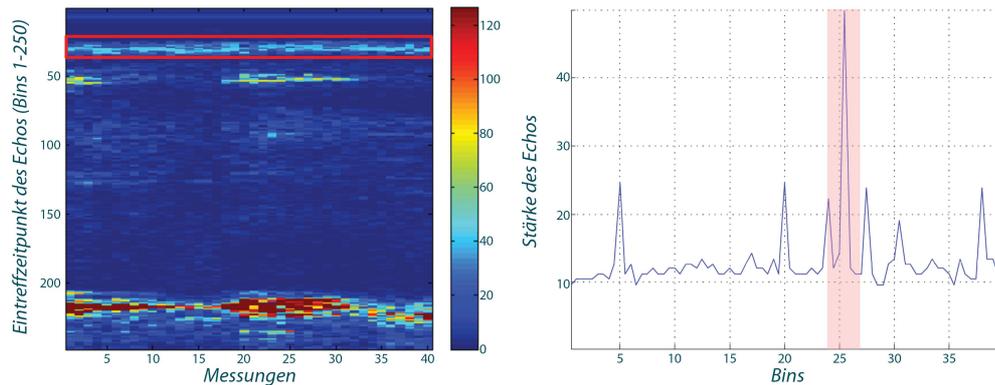
$$d = (x + k) \cdot \cos \theta \tag{4.7}$$

Bei der Wahl der beeinflussbaren Parameter  $h$  und  $\theta$  muss grundsätzlich ein Kompromiss zwischen Auflösung und Reichweite der Messung getroffen werden, welche in einem engen Verhältnis zueinander stehen. Verwendet wird im System ein Winkel von  $\theta=5^\circ$  bei einem Abstand  $h=50$  mm, welches eine Distanzmessung bis zu 2.5 m ermöglicht.

### 4.5.3. Sonare und Echo-Sounder

Der optische Distanzsensor und die bildgebende Sensorik wurden direkt auf den Roboter Monsun entwickelt und angepasst, sie zeichnen sich auch durch eine platzsparende Integration bei gleichzeitig geringen Kosten aus. Eine zuverlässige Benutzung ist allerdings an gute äußerliche Bedingungen geknüpft. So können bei besonders trüben Sichtverhältnissen unter Wasser keine Kameras mehr verwendet werden, weil der hohe Anteil an Schwebeteilchen im Wasser die Sichtweite und Erkennbarkeit sehr stark einschränkt. Für solche Szenarien werden seit vielen Jahren akustisch basierte Distanzsensoren, bspw. Sonare und Echolote verwendet. Diese ermitteln durch Laufzeitmessungen von kegelförmig ausgesendeten Schallimpulsen den Abstand zum Boden oder anderen reflektierenden Objekten im Wasser. Die Entfernung  $d$  zum Objekt lässt sich somit wie folgt berechnen:

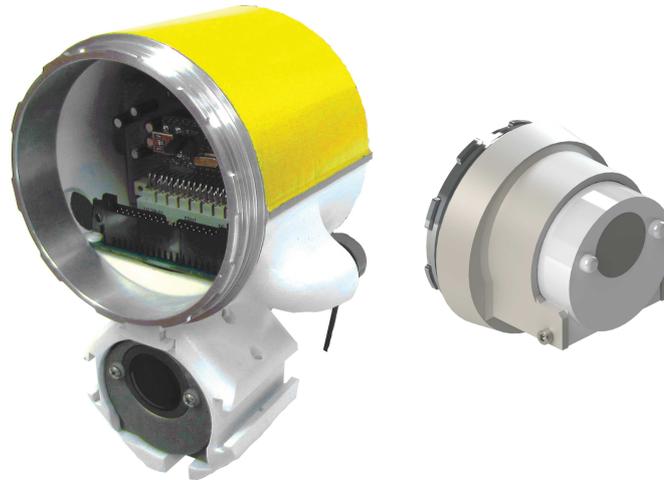
$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \tag{4.8}$$



**Abbildung 4.13.:** Aufgenommene Daten mit dem Echo-Sounder. Dieser war auf eine maximale Reichweite von 10 m eingestellt. Die Auflösung ist abhängig von der verwendeten Anzahl an Bins. In diesem Fall wurden 250 Bins verwendet, womit ein Bin die Stärke des Echos auf einem Abschnitt von  $10m \div 250 = 0.04m$  repräsentiert. *links:* Rohdaten einer Sonarmessung für einen Zeitraum von 20 s, dabei illustriert die Farbe die Stärke des gemessenen Echos. Die Daten wurden in einem Pool in einem Abstand von 100 cm vor einer Wand aufgenommen. Das erste starke Echo bei Bin 25 belegt damit die gemessene Entfernung von 100 cm. Die später eintreffenden Echos, besonders im Bereich von Bin 200 werden ignoriert, da es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um Reflektionen handelt. *rechts:* Eine einzelne Sonarmessung der Reihe, welche die Stärke des Echos den Bins gegenüberstellt. [Ham12].

mit  $\Delta t$  als gemessene Zeit zwischen Aussendung und Empfang des Echos. Multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  ergibt sich die Distanz, wobei es wichtig ist, die lokale Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls vorher zu ermitteln. Diese hängt von den lokalen Temperaturen, dem Druck und dem Salzgehalt des Gewässers ab und befindet sich in einem Intervall von  $1400$  bis  $1570 \text{ m s}^{-1}$ . In typischen Gewässern wie bspw. ein Binnensee mit 10m Wassertiefe kann von etwa  $1500 \text{ m s}^{-1}$  ausgegangen werden [70].

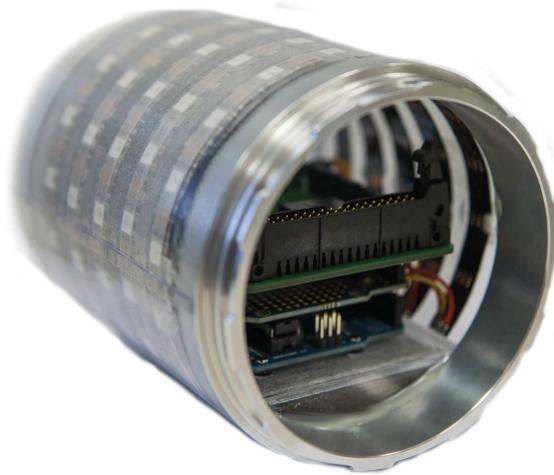
Für die Aussendung des Schallsignals werden keramische Resonatoren verwendet, welche ihre Form je nach angelegter Spannung leicht ändern. Dadurch können elektronische Wechsellspannungen des Schallsignals in mechanische Schwingungen überführt und Schallimpulse ausgesandt werden. Da dieser Effekt auch umgekehrt auftritt, werden die Resonatoren oftmals gleichzeitig als Schallgeber und Empfänger verwendet. Vor der Integration akustischer Distanzsensoren wurden diese in vorherigen Projekten genauer untersucht und getestet. So diente neben einem  $360^\circ$  Scanning Sonar ein Echosounder zur Wanddetektion am Roboter HANSE [FHK<sup>+</sup>12]. In der Bachelorarbeit von Bent Marten Hamann wurde weiterführend die Integration des Echosounders in einen kleinen Unterwasserroboter eingeleitet und erste autonome Verhalten mit diesem umgesetzt [Ham12]. Die in der Abbildung 4.13 abgebildeten Daten eines Echosounders wurden dafür mithilfe eines ATmega Mikrocontrollers eingelesen und ausgewertet. Um aus dem verrauschten Signal eine zuverlässige Distanzangabe zu einem Hindernis zu erhalten, werden die Daten mit einem 10-fachen Mittelwertfilter geglättet. Aus diesen Daten wird ein Treshhold abhängig des maximalen Soundsignals errechnet, welcher beim erstmaligen



**Abbildung 4.14.:** Echosounder Module des Monsun Unterwasserroboters. *links:* Erweiterungsmodul mit unter dem Roboter angebrachtem Sonar. Hierbei kann die Ausrichtung des Schallkopfs beliebig angepasst werden, um auch den Abstand zum Boden oder seitlich zum Roboter zu messen. *rechts:* Frontmodul mit Echosounder zur Hindernisdetektion vor dem Roboter.

Überschreiten als Detektion einer Wand gewertet werden kann. Nachdem die Funktionsweise des Sonars hergestellt wurde, konnten zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Roboter Monsun weitere Experimente durchgeführt werden. Das Kapitel 5.5 liefert die Ergebnisse eines Wandfolgeverhaltens. Dabei diente der Echosounder zur seitlichen Abstandsbestimmung mit einer maximalen Reichweite von 10 m. Die Genauigkeit bei stehendem Roboter beträgt 4 cm.

Die Abbildung 4.14 illustriert die Integration der Sensorik in den Roboter Monsun, welches auf zwei verschiedene Arten möglich ist. Für die Hindernisdetektion und Orientierung unter Wasser kann ein Sonarkopf als Frontmodul in den Roboter integriert werden. Dieses hat den Vorteil, dass keine überstehenden Teile im Schallbereich des Sonars vorhanden sind und Hindernisse im Bereich von 0.2 m bis 50 m direkt erkannt werden. Gleichzeitig muss somit aber auch auf optische Sensorik verzichtet werden. Möchte der Nutzer beide Verfahren verwenden, um eine akustische Hindernisdetektion mit gleichzeitiger Bildaufnahme durchzuführen, kann das Sonar-Erweiterungsmodul verwendet werden, welches in der Mitte des Roboters integriert wird. Unter diesem Modul kann der Sonarkopf in unterschiedlichen Richtungen montiert werden. So ist es vorrangig möglich, mit einem nach unten gerichteten Winkel von  $8^\circ$  eine Abstandsmessung nach vorne gerichtet zu erhalten. Der Winkel von  $8^\circ$  ergibt sich aus der Abstrahlcharakteristik des Sonars, da sonst der eigenen Roboterkörper im Signal auftauchen würde. Weiterhin kann der ganze Sonarkopf auch nach unten zeigen, um eine Tiefenmessung bis zum Grund durchzuführen [71]. Für ein Wandfolgeverhalten oder die Inspektion von Schiffsrümpfen kann der Kopf auch zur Entfernungsmessung seitlich zu Monsun positioniert werden.



**Abbildung 4.15.:** Das Visuelle Feedback Modul des Monsun Unterwasserroboters bestückt mit 65 RGB-LEDs in einem transparenten Gehäuse. Neben 256 Farben können diverse Muster und Hinweise über die LEDs ausgegeben werden und wichtige Informationen für den Nutzer bereithalten. Gleichzeitig können sich die Roboter anhand unterschiedlicher Farben unterscheiden. Eine weitere Eigenschaft ist die Integration eines kommerziellen Arduino UNO zur Verwendung weiterer Arduino Shields.

#### 4.5.4. Visuelles Feedback

Mithilfe der bereits vorgestellten Erweiterungsmodule kann ein Monsun AUV autonome Fahrten unter Wasser durchführen und sich in seiner Umgebung zurechtfinden. Dabei ist besonders im Bereich der Unterwasserrobotik eine fehlerfreie und robuste Programmierung von Nöten, da die Interaktionsmöglichkeiten mit den Robotern begrenzt sind. In vielen Fällen ist es nicht ersichtlich, in welchem Zustand sich der betrachtete Roboter befindet, oder ob Probleme und Fehler auftreten. Aus diesem Grund wurde für Monsun das Prinzip von außen sichtbaren LEDs des Roboters SMART-E in einem eigenen Modul übernommen und verbessert [MEOM13].

Dieses als Visuelles Feedback Modul bezeichnete Erweiterungsmodul wird mithilfe der bekannten Bajonettinge im mittleren Teil als Verlängerung des Rumpfs integriert und wurde aus transparentem Kunststoff im Rahmen einer Bachelorarbeit gefertigt [Tra15]. Von innen wurden symmetrische Fassungen für RGB LEDs vorgesehen, welche insgesamt Platz für 65 LEDs bieten. Diese sind in einer  $5 \cdot 13$  Matrix angeordnet und erlauben eine omnidirektionale Abstrahlung von Licht. In der aktuellen Konfiguration können 256 Farben emittiert werden, wobei besonders auf die Absorptionscharakteristiken des Wassers geachtet wurde. Für den blauen Bereich wird Licht mit 465 nm ausgesandt und für grünes Licht eine mit einer entsprechenden Wellenlänge 525 nm gearbeitet, da diese eine besonders große Sichtweite des Lichts ermöglichen [72].

Um die Modularität des Gesamtsystems zu erhöhen, wurde das Modul mit einem Arduino Uno<sup>7</sup> als zentrale Steuereinheit ausgestattet, welches sich in das Gesamt-

<sup>7</sup>Arduino ist eine kommerzielle aus Soft- und Hardware bestehende Physical-Computing-Plattform (<https://www.arduino.cc/>)

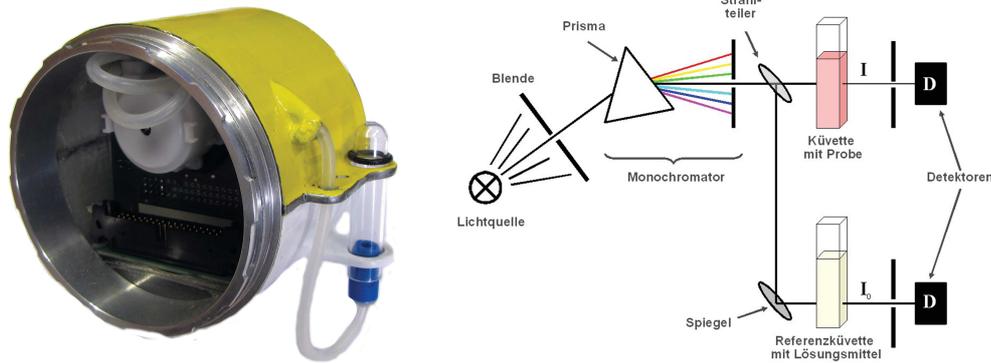
system des Roboters einfügt. Dadurch wurde eine zusätzliche interne Schnittstelle im Roboter geschaffen, um Zugriff auf die große Anzahl an bereits vorhandenen sogenannten Arduino Shields zu erhalten. Es ist sogar möglich, die komplette Steuerung des Roboters über den Arduino laufen zu lassen, sofern keine höheren Verhalten durchgeführt werden sollen.

Die Integration eines eigenen Controllers für die Ansteuerung der LED Matrix erlaubt eine hohe Flexibilität und viele Anwendungsmöglichkeiten. So können die verschiedenen Farben eine interne Zustandskodierung repräsentieren, um den Nutzer von außen einen Einblick in autonome Abläufe des Roboters zu ermöglichen. Eine rote Farbe des Roboters repräsentiert in diesem Fall einen Fehlerfall, bei dem der Roboter geborgen werden sollte. Gleichmaßen kann eine andere Farbe für das erfolgreiche Absolvieren eines Zwischenschritts genutzt werden. Ebenfalls wurde implementiert, dass der Ladezustand der Akkus als visuelle Darstellung von außen sichtbar ist. Diese Anwendungen können durch mehrere Blinkmuster noch erweitert werden und erlauben so ähnlich dem Morsealphabet eine rudimentäre Kommunikation mit dem Nutzer.

Bedenkt man die Anwendungen der Roboter im Bereich der Schwarmrobotik, können verschiedene Farben dazu genutzt werden, um die Roboter visuell voneinander unterschieden zu können. Bei Folgeverhalten kann so einfach aus mehreren Robotern algorithmisch der Anführer des Schwarms erkannt werden, wenn sich gleichzeitig mehrere AUVs im Blickfeld befinden. Das visuelle Feedback dient somit nicht nur als Informationsquelle für interne Zustände des Roboters, sondern auch als Unterscheidungsmerkmal und Kommunikationsschnittstelle zwischen den Robotern und zum Nutzer. Einschränkungen bei der Benutzung des Moduls ergeben sich vor allem durch die verschiedenen Trübungen des Wassers. So wurde das Modul in einem Pool bei klarem Wasser getestet, in welchem die verschiedenen Grundfarben noch aus 10 m klar unterscheidbar waren. In natürlichen Gewässern ist die Nutzbarkeit eng an die verwendete Kamera und die generelle Sichttiefe unter Wasser gekoppelt.

### 4.5.5. Wasserproben Extraktion

Die bisher vorgestellten Bestandteile des Erweiterungssets des Unterwasserroboters Monsun dienen hauptsächlich dazu, den Roboter mit zusätzlichen Fähigkeiten für seine autonome Fahrt auszustatten. So kann mit Hilfe von Abstandssensorik und Kameras die Umgebung des Roboters erfasst und aufgenommen werden. Dieses dient nicht nur der Orientierung und Hindernisvermeidung bei der autonomen Fahrt, sondern auch wichtige Informationen für das Umweltmonitoring, bspw. Untergrundprofile und Inspektionsdaten können damit gewonnen werden. Möchte man den Zustand von Gewässern qualitativ nach den Richtlinien aus Kapitel 3 ermitteln, ist es jedoch notwendig, den Roboter mit externer Sensorik auszustatten, um den dort gestellten Ansprüchen zu genügen. Dabei ist es primär unerheblich, ob die Daten online vor Ort gewonnen werden, oder sich in einer späteren Auswertung ergeben. In Bachelorarbeit von Kolja Mayer [Mai14] wurde ein erster Ansatz unternommen, um eins der größten Probleme des Umweltmonitorings zu lösen, nämlich die periodische Sammlung von Wasserproben an unterschiedlichen Stellen. Die meist händisch unternommenen Sammlungen von Proben geraten nicht nur aufgrund der Masse an



**Abbildung 4.16.:** links: Das Erweiterungsmodul zur Wasserprobenextraktion des Monsun AUVs. Über eine intern angebrachte Schlauchpumpe können Wasserproben mit einem Inhalt von 5 ml an gewünschten Positionen aufgenommen werden. rechts: Das Funktionsprinzip eines Photometers, mit dessen Hilfe die mitgebrachten Proben auf Konzentration bestimmter Bestandteile untersucht werden können [73, Mai14].

Daten an ihre Grenze, auch ist es ohne weiteren großen Aufwand auch nicht möglich, Proben an schwer zu erreichenden Stellen zu extrahieren. Um diese Schwierigkeiten anzugehen, wurde für den Roboter Monsun ein Erweiterungsmodul zur Aufnahme von Wasserproben entworfen und an den Roboter angepasst [Mai14]. Das Modul kann in der Mitte des Roboters über die Bajonettringe integriert werden und verfügt über eine eigene Schlauchpumpe für den Wassertransport (siehe Abbildung 4.16 links). Die Elektronik enthält einen eigens entworfenen Motortreiber und einen ATmega 168 Controller, welcher als I<sup>2</sup>C Slave fungiert und vom Gesamtsystem zur Sammlung von Wasserproben angewiesen wird. An den Seiten des Moduls befinden sich die Zu- und Abläufe der Schlauchpumpe, welche wahlweise über Dichtungsringe an Reagenzgläser angeschlossen werden können. Für die Proben werden Reagenzgläser mit einem Fassungsvermögen von 5 ml verwendet, welche seitlich in vorgesehenen Ladebuchten montiert sind und leicht entnommen werden können. Um keinen Überdruck in den Reagenzgläsern zu erzeugen, werden diese vor dem Einsatz mit destilliertem Wasser gefüllt. Im Einsatzgebiet entleert das Modul vor der Probenentnahme erst die Behältnisse, bevor die eigentliche Probe aufgenommen werden kann und zum Entnahmepunkt des Roboters gefahren wird. Dort kann die Probe entnommen und weitere Reagenzgläser zur mehrmaligen Probenentnahme montiert werden.

Ein weitverbreitetes und oft verwendetes Verfahren zur nachträglichen Untersuchung der gesammelten Proben an Land ist die Spektralphotometrie, mit dessen Hilfe die Proben auf Vorhandensein organischer Verbindungen überprüft werden können. Das Prinzip dabei ist, Rückschlüsse über die Konzentration der enthaltenen Moleküle der Wasserprobe zu erhalten, indem die Abschwächung eines auf die Probe entsandten Lichtstrahls gemessen wird. Die Abbildung 4.16 illustriert auf der rechten Seite das Prinzip der Spektralphotometrie in einem Schaubild. Das Grundprinzip ist dabei die gleichzeitige Bestrahlung einer Probe und einer Referenzküvette, in der der zu

untersuchende Stoff konzentriert gelöst ist. Für die Bestrahlung wird mithilfe von Prismen und Strahlteilern in einem Monochromator ein gebündelter Lichtstrahl einer stoffspezifischen Wellenlänge erzeugt. Dieses Licht wird dann gleichzeitig auf beide Proben gesendet und am Ende mithilfe zweier Detektoren aufgefangen. Anhand der Abschwächungen der Lichtintensität kann dann die Konzentration des untersuchten Stoffes in der Originalprobe ermittelt werden [73].

### 4.5.6. Umweltsensorik

Die Auswertung gesammelter Proben unter Laborbedingungen liefert die Vorteile, dass die Messergebnisse sehr genau und bereits mithilfe sehr kleiner Proben genommen werden können. Allerdings gibt es auch viele relevante Parameter, welche vor Ort gemessen werden müssen, da sie flüchtig sind oder sich in kurzen Zeitabständen ändern. Für beispielsweise Temperaturprofile ist es unabdingbar, dass die Messgeräte in-situ eingebracht werden, um auch punktgenau die Daten an exakten Zeitpunkten zu erfassen.

Das Kapitel 3 berichtete bereits über die Expedition Uhrwerk Ozean, welche das Ziel hatte, Unterwasserwirbel zu entdecken und erstmalig vor Ort zu vermessen. Hierfür wurden Messgeräte benötigt, welche in den Wirbel eingebracht wurden und dort Daten sammeln konnten. Der Roboter Monsun diente im Rahmen dieser Expedition als Geräteträger einer kommerziellen Multiparameter CTD48 Speichersonde (siehe Abbildung 3.8), welche vom Roboter autonom in das Messgebiet transportiert wurde und die Umweltdaten gleichzeitig mit GPS und Tiefeninformationen anreichern konnte. Die verwendete CTD Sonde besitzt eine interne Batterie und speichert die gemessenen Sensordaten in einstellbaren Zeitintervallen auf einem internen nicht-flüchtigen FLASH Speicher. Der Datenspeicher der Sonde ist ausreichend, um die Messdaten eines ganzen Tages speichern zu können. Die Daten können nach der Mission über eine serielle Datenverbindung ausgewertet werden. Dabei werden sie mithilfe von UTC Zeitstempeln mit den Positionsdaten des Roboters zusammengefügt.

Auf diese Weise konnten wichtige Informationen über die internen Zustände und Dynamiken innerhalb eines Unterwasserwirbels gemessen werden. Allerdings beinhaltet diese Messstrategie einen Nachteil, da nicht direkt auf die Sensordaten zugegriffen werden kann, um beispielsweise eine gefundenen Anomalie zu folgen. Aus diesem Grund wurde parallel an einer weiteren Möglichkeit geforscht, um den Roboter Monsun mit diverser Umweltsensorik auszustatten.

Die Abbildung 4.17 illustriert die Bestandteile des eigens für das Monsun AUV entworfene Environmental Monitoring Modul, welches einer Reihe von Messsonden in einem Erweiterungsmodul des Roboters integriert und zusammenfasst. Als Sensorik wurden kommerziell erhältliche analoge Messsonden für die Parameter Leitfähigkeit, Temperatur, Anteil an gelöstem Sauerstoff und dem pH-Wert der Firma Atlas Scientific<sup>8</sup> verwendet. Das eigens hierfür entworfene Zwischenmodul kann

---

<sup>8</sup>Atlas Scientific - Environmental Robotics (<https://www.atlas-scientific.com/>)



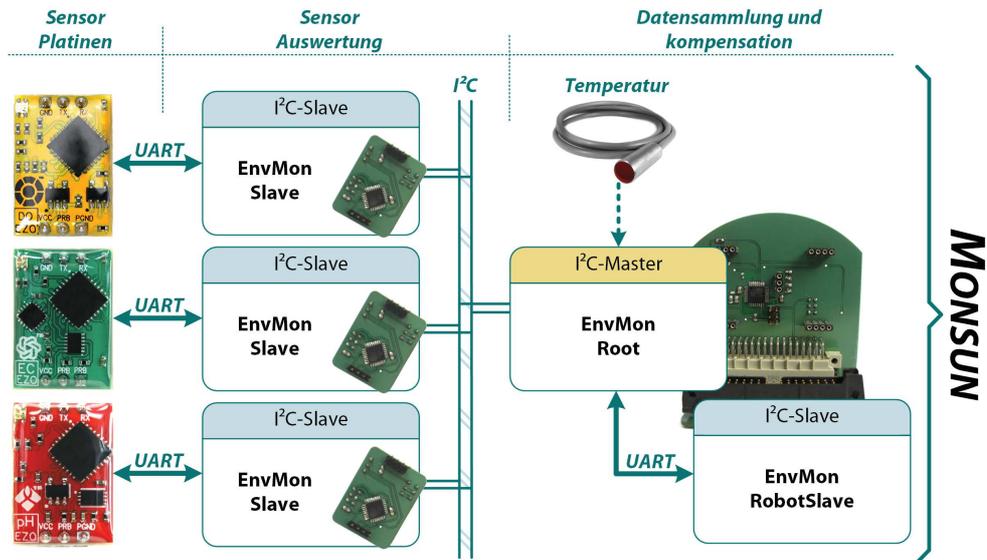
**Abbildung 4.17.:** Das Environmental Monitoring Modul des Monsun Unterwasserroboters. Als eigenständiges Zwischenmodul vereint es drei analoge Messsonden für Leitfähigkeit, pH-Wert und gelöstem Sauerstoff (*mitte*) in einem wasserdichten Gehäuse, welches über Bajonettringe im mittleren Teil des Roboters integriert wird (*rechts*). Mithilfe einer selbst entwickelten Elektronik (*links*) werden die Daten aller Messsonden zusammengeführt und aggregiert an den Roboter weitergegeben. Ein ebenfalls verbauter Temperatursensor wird für Temperaturkompensationen und einzelnen Sensoren verwendet, um die Genauigkeit der Messwerte weiter zu steigern. Hilfestellungen beim Entwurf wurden durch eine Bachelorarbeit von Frau Kim Scharringhausen gegeben [Sch15].

mit den bekannten Bajonettringen in der Mitte des Roboters integriert werden und besitzt seitlich ausgestellte Befestigungsflügel für die Sondenträger. Die Sonden werden an der Seite unterhalb des Motorenschubs in Fahrtrichtung montiert und mithilfe von miniaturisierten wasserdichten Steckkontakten seitlich mit der Elektronik des Moduls verbunden.

Im Inneren des Moduls ist die komplette Elektronik zur Auswertung der Sonden untergebracht und über den Kommunikationsbus mit dem Rest des Systems verbunden. Die Elektronik ist in drei verschiedene Ebenen unterteilt, welche zuerst die Sonden auslesen, die Daten dann sammeln und untereinander austauschen, um das Ganze dann an des System weiterzugeben, damit dieses während der autonomen Fahrt mit den Umweltdaten planen kann.

Zum Auslesen der analogen Messsonden werden diese mit jeweils individuellen Schaltungen verbunden, welche auf die speziellen Sonden kalibriert wurden, und farblich unterschiedlich codiert sind (siehe Abbildung 4.17 *links*). Dort werden die analogen Datenströme digitalisiert und die Messwerte über ein serielles Interface zur Verfügung gestellt. Über ein Kommunikationsprotokoll können neben den einzelnen Messungen auch Einstellungen der Sonden vorgenommen und interne Kompensationsberechnungen durchgeführt werden. So liefert die Kenntnis über vorherrschende Temperaturen und den Wasserdruck eine exaktere Messung der elektronischen Leitfähigkeit an der Messstelle.

Zur Auswertung dieser Sensorplatinen wurden modulare sogenannte Environmental Monitoring Slave (*EnvMon-Slave*) Platinen entwickelt, welche über einen eigenen



**Abbildung 4.18.:** Das Environmental Monitoring Modul ist in unterschiedliche Funktionsebenen aufgeteilt, um die Sensordaten ausgewertet und aggregiert an den Roboter weiterzugeben. Auf der linken Seite sind die Sensorplatinen illustriert, welche die analogen Messsonden auslesen und die Daten seriell zur Verfügung stellen. Die Auswertung der Daten erfolgt in der mittleren Ebene auf den Slave Platinen, welche über einen internen I<sup>2</sup>C Bus miteinander verbunden sind. Diese Platinen sind nebeneinander auf der Hauptplatine des Moduls angeordnet. Dort werden die einzelnen Daten gesammelt, und Kompensationsdaten zwischen den Slaves ausgetauscht, da beispielsweise die Genauigkeit der Sauerstoffsonde steigt, sofern diese Informationen über die Temperatur und die Tiefe hat, welche sie eigenständig nicht ermitteln kann. Über eine weitere serielle Datenverbindung werden die finalen Daten dann an den RobotSlave übermittelt, welches als I<sup>2</sup>C Slave an den Hauptkommunikationsbus des Roboters angeschlossen ist und so vom System ausgelesen werden kann.

ATmega168 Mikrocontroller verfügen und die serielle Verbindung zu den Sonden aufbauen. Zum Austausch der Sensordaten befinden sich alle EnvMon-Slave Platinen an einem eigenen internen I<sup>2</sup>C Bus, um über diesen Daten zwischen den einzelnen Sonden auszutauschen. Eine Aufteilung auf mehrere ATmegas war in diesem Fall notwendig, da die Mikrocontroller jeweils nur über eine serielle Schnittstelle verfügen. Der genauen Aufbau der Elektronik ist in Abbildung 4.18 illustriert. Die interne Sammlung der Messdaten übernimmt ein weiterer ATmega, im folgenden bezeichnet als *EnvMon-Root*, welcher auf der Hauptplatine des Moduls untergebracht ist. Auf diese werden die einzelnen EnvMon-Slaves mit beinhaltenden Sensor-Platinen über Steckkontakte platziert, wodurch der EnvMon-Root eine Verbindung zu den Slaves über den internen I<sup>2</sup>C Bus aufbauen kann. Zusätzlich zu den Daten der angeschlossenen Messsonden, ist an der Hauptplatine des Moduls ein analoger Temperatursensor angeschlossen, welcher über den internen AD-Wandler des EnvMon-Root ausgelesen wird. Dadurch verfügt er über alle Messdaten und kann diese unter den Sonden für verschiedenste Kompensationsschritte übermitteln. Weiterhin nimmt er eine geringfügige Mittelwertfilterung vor aggregiert die Daten zu einem gemeinsamen Datenpaket, welches an den ATmega des EnvMon-



**Abbildung 4.19.:** S2CM 18/34 Mini Modem der Firma Evologics

RobotSlave per serieller Schnittstelle weitergeleitet wird. Dort wird das Datenpaket in seine Einzelwerte zerlegt und dem Kontrollsystem des Roboters über den Hauptkommunikationsbus in mehreren I<sup>2</sup>C Registern zur Verfügung gestellt.

#### 4.5.7. Unterwasserkommunikation

Viele der vorgestellten Erweiterungen und Verbesserungen des Roboters Monsun dienen dazu, das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten zu vergrößern und dem Nutzer ein flexibles AUV zur Verfügung zu stellen. Zur Komplettierung des Alleinstellungsmerkmals von Monsun als schwarmfähiger Unterwasserroboter wird allerdings noch eine Möglichkeit der Unterwasserkommunikation benötigt, welche für die Organisation eines Schwarms unter Wasser alternativlos ist. Bedingt durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Wasser und Luft unterscheidet sich diese Art der Kommunikation stark zu den bekannten Kommunikationsverfahren, bei denen heutzutage hauptsächlich elektromagnetische Wellen (EM) für die drahtlose Kommunikation verwendet werden. Diese EM Wellen sind einfach zu erzeugen, können weite Entfernungen zurücklegen und durchdringen beispielsweise sogar Hindernisse aus Stein. Hochfrequente Signale werden allerdings vom Wasser so stark absorbiert, dass eine Kommunikation kaum möglich ist. Verringert man die Frequenz der Signale, müssen allerdings auch die Empfangsantennen sehr lang werden. So besitzen Frequenzen im Bereich von 15-20 kHz Wellenlängen von 5-20 km, was es sehr unpraktikabel für den Unterwasserbereich macht [74]. Diese Effekte verstärken sich leider noch, betrachtet man die Einsatzgebiete von Monsun genauer. Der Roboter wurde konzipiert, um in flachen Gewässern und auch der offenen See bestehen zu können. Dieses impliziert allerdings oftmals wechselnde Bedingungen, beispielsweise wechselhafte Temperaturen, Salzgehalte und Druckverhältnisse. Alles Parameter, welche die elektromagnetische Kommunikation stark dämpfen.

Eine weitere Möglichkeit für den Datenaustausch zwischen den Robotern bietet die optische Kommunikation, welche ebenfalls auf elektromagnetischen Wellen beruht, allerdings mit Wellenlängen zwischen 400 nm (blaues Licht) und etwa 700 nm (rotes Licht). Diese Art der Kommunikation ermöglicht eine hohe Bandbreite bei geringem Rauschverhältnis und ist nicht nur an Lichtwellenleiter gebunden. Mithilfe fokussierter Laserstrahlen kann eine Kommunikation ebenfalls drahtlos erfolgen. Im Falle eines Einsatzes unter Wasser treten allerdings viele Fehlerfaktoren auf, welche die optische Kommunikation für Monsun ausschließen. Nicht

nur, dass Sender und Empfänger perfekt aufeinander ausgerichtet sein müssen, was bei den verschiedenen Strömungen und der gleichzeitig agilen Fahrweise der Roboter schwer umzusetzen ist, beeinträchtigen die Wasserverhältnisse die Kommunikation ebenfalls stark. So führt ein hoher Anteil an Schwebeteilchen, welcher in flachen Binnengewässern und in Häfen besonders hoch ist, zu einer starken Streuung und Absorption der Lichtsignale. Um diese Effekte zu minimieren, ist ein hoher Energiebedarf von Nöten, welcher allerdings auf einem autonomen Unterwasserroboter nicht geliefert werden kann. Ein weiterer Nachteil der optischen Kommunikation ist die kurze Reichweite verglichen mit akustischen Methoden.

Im Bereich der maritimen Robotik hat sich daher die akustische Kommunikation als vielversprechendste Variante zur drahtlosen Datenübermittlung heraus kristallisiert. Schallwellen werden nur gering vom umgebenden Wasser absorbiert und halten ihre Energie somit über weite Entfernungen. Für das Senden und Empfangen werden Piezokristalle in akustischen Wandlern verwendet, welche um ein Vielfaches kleiner gestaltet werden können, als die oben erwähnten Radioantennen der EM-Wellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen ist abhängig vom Salzgehalt und der Temperatur, kann aber mit ca.  $1500 \text{ m s}^{-1}$  bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  angegeben werden. Allerdings gibt es auch bei der akustischen Kommunikation Limitierungen und Problemfälle, die den Gebrauch schwierig gestaltet. So gibt es viele Echo- und Reflektionseffekte, die zu Fehlerfällen führen können. Außerdem führt die geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale bei gleichzeitig mobilen Kommunikationspartnern zu Problemen beim Auftritt des Dopplereffekts. Um diese Phänomene zu minimieren, bedienen sich sogenannte Akustikmodems den Prinzipien von Walen und Delfinen aus der Natur, welche für die Kommunikation die Frequenz ihrer Kommunikation ändern, um möglichst die negativen Effekte des Wassers zu minimieren.

In einer gemeinschaftlichen Arbeit am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck und weiterführend an der TU Hamburg-Harburg befindet sich seit dem Jahr 2011 ein miniaturisiertes Akustikmodem in der Entwicklung [67]. Dieses ist speziell an den Monsun Roboter angepasst und kann unterhalb des Roboters am Geräteträger befestigt werden. Das Modem verfügt über einen eigenen 12 V Akku und verbraucht im Ruhezustand nur 500 mW. Der aktuelle Prototyp ist in der Lage, mit einer Datenrate von  $780 \text{ bit s}^{-1}$  im Frequenzband von 50-57 kHz zu kommunizieren und unterstützt Distanzmessungen zwischen den Modems über eine Signallaufzeitanalyse [75, 76]. Da sich das Modem allerdings noch in der Entwicklungsphase befindet und der Roboter bereits an Einsätzen unter realen Bedingungen verwendet wird, wurde als Übergangslösung auf ein kommerzielles Unterwassermodem der Firma Evologics<sup>9</sup> zurückgegriffen. Die Abbildung 4.19 illustriert das verwendete S2CM 18/34 Mini Modem. Dieses kann bis in einer Tiefe von 200 m operieren und dabei über eine Entfernung von maximal 3500 m kommunizieren. Im namensgebenden Frequenzband von 18-34 kHz wird eine Datenrate von  $13.9 \text{ kbit s}^{-1}$  erreicht. Um diese hohe Leistung zu genießen, benötigt das Evologics Modem allerdings einen erheblichen Platzbedarf und

---

<sup>9</sup>EvoLogics GmbH, Berlin: <https://www.evologics.de/>

ist mit den Ausmaßen von  $\varnothing 63 \text{ mm} \times 235 \text{ mm}$  nahezu halb so groß wie der Monsun Roboter selbst. Da es so nicht im Roboter integriert werden kann, wird es mithilfe eines kombinierten Geräteträgers zusammen mit der CTD Sonde unterhalb von Monsun installiert (siehe Abbildung 4.8). Dort wird ebenfalls der Transducer an einem frei positionierbarem Gestänge befestigt, sodass genügend Abstand zwischen dem Schallkopf und der Wasseroberfläche geschaffen wird. Ist dieser Abstand zu gering, kommt es bei der Kommunikation zu häufig auftretenden Fehlern, da die Reflexionen an der Oberfläche zur Auslöschung der Schallsignale führen. Weiterhin ist die hohe Anzahl an Luftbläschen durch den Wellengang ebenfalls hinderlich für eine reibungslose akustische Kommunikation. Da das Modem eine Sendeleistung von maximal 55 W erreichen kann, wird im Roboter ein weiterer Akku verbaut, der nur für das Modem verwendet wird, um keinen Leistungsverlust des Roboters in Kauf zu nehmen. Die interne Kommunikation mit dem Evologics Modem übernimmt ein ATemga328 Mikrocontroller auf einer eigens angefertigten Platine, welcher mithilfe eines seriellen Protokolls die Ansteuerung und Auswertung des Akustikmodems übernimmt. Diese werden über ein serielles Interface mit AT-Kommandos angesteuert. Da es sich hierbei um ein menschenlesbares Protokoll im ASCII Format handelt, werden vom Mikrocontroller verschiedenste Parsing-Routinen durchlaufen, um schlussendlich an die relevanten Werte zu gelangen. Dabei sichert er die empfangenen Daten in verschiedenen I<sup>2</sup>C Registern, welche vom Hauptcontroller des Roboters ausgewertet werden, was die Steuerung des Schwarms erst möglich macht.

### 4.5.8. Verstärkungen für offene Gewässer

Das Grundkonzept des Roboters ermöglicht agile und flexible Verhalten in Binnengewässern und küstennahen Gebieten. Um die Einsatzmöglichkeiten von Monsun aber nicht kategorisch zu limitieren, verfügt das Erweiterungspaket ebenfalls über modulare Komponenten, welche einen Einsatz auf offenen Gewässern ermöglichen und den Roboter an die rauen Umgebungen anpassen. Die Abbildung 4.20 illustriert die Hauptkomponenten des sogenannten Ozean-Kits, welches sich aus zwei wesentlichen Bestandteilen zusammensetzt. Dazu zählt auf der einen Seite ein Interface-Modul, welches mittig im AUV mithilfe der Bajonettringe platziert wird und Schnittstellen für diverse Geräte außerhalb des Roboters zur Verfügung stellt. Auf der anderen Seite dient eine externe Antennen- und Haltevorrichtung bestehend aus außen anzubringenden Aluminiumverstärkungen zur Erhöhung der Robustheit unter den vorherrschenden schwierigen äußeren Bedingungen. Besonders das Aussetzen und die Bergung der Roboter auf offener See unterscheiden sich stark von ruhigen Binnengewässern. Dank der kleinen und leichten Bauform kann der Einsatz dort leicht händisch vom Ufer aus gestartet werden und die Roboter kehren nach erfolgreicher Mission wieder zum Ausgangspunkt zurück, was bei geringen Strömungen problemlos möglich ist. Auf offener See ist dies alleine schon durch die Bauhöhe der begleitenden Schiffe und dem Wellengang kaum möglich und für das bedienende Personal ebenfalls gefährlich, so dicht an der Kante des Bootes mit einem Monsun zu hantieren. Gleichzeitig besteht immer die Gefahr einer Kollision mit dem Schiff, welche im schlimmsten Fall zum Verlust des Roboters und seiner Daten führen



**Abbildung 4.20.:** Das Ozean-Kit des Unterwasserroboters Monsun bestehend aus einer externen Antennen- und Haltevorrichtung *links* und einem Interface-Modul *rechts*. Das mittig über die Bajonettinge zu platzierende Modul stellt mehrere Schnittstellen für externe Geräte nach außen hin zu Verfügung, wodurch beispielsweise eine CTD-Sonde oder das Modem an den Roboter angeschlossen werden können. Die Antennen- und Haltevorrichtung wird direkt am Rumpf platziert und bietet neben einem Aluminiumbügel für erleichtertes Aussetzen und Bergen des Roboters auch einen Antennenturm, um die Erreichbarkeit von GPS und WiFi bei höherem Wellengang zu gewährleisten.

kann. Um diese Problematik zu beheben, kann bei Bedarf ein Aluminiumbügel am Hauptteil von Monsun montiert werden, welcher auf den Rumpf aufgesetzt wird und bündig mit der Hülle abschließt. Der Bügel befindet sich bei aufgetauchter Fahrt über der Wasseroberfläche, wodurch es möglich ist, den Roboter mithilfe eines Bootshakens aus sicherer Entfernung auszusetzen und zu bergen. Gleichzeitig dient er zur Versteifung des Rumpfs und erhöht somit die Sicherheit bei eventuellen Kollisionen mit Schiffen und anderen Hindernissen.

Der Einsatz auf offener See offenbart allerdings noch weitere Schwierigkeiten. So führt der höhere Wellengang dazu, dass die Sichtbarkeit von Monsun auf größere Entfernung stark begrenzt ist. Weiterhin führt das Überspülen des Roboters zu einer Beeinträchtigung der drahtlosen Kommunikation mit dem Einsatzboot bis hin zum Verlust der Satellitenverbindung des GPS Moduls. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde der montierte Aluminiumbügel um einen mittig platzierten Antennenturm erweitert, welcher die Anbringung der nach außen geführten WiFi Antenne und der externen GPS Antenne 50 cm über dem Roboter ermöglicht. Außerdem wurde im Turm ein autark betriebenes Blitzlicht integriert, welches die Sichtbarkeit des Roboters stark erhöht.

Um die nach außen geführten Antennen mit der internen Elektronik zu verbinden,



**Abbildung 4.21.:** Die Aktuelle Konfiguration des Monsun AUVs aus dem Sommer 2018. Der Roboter ist ausgestattet mit dem verstärkten Ozean-Kit, welches die verlängerten Antennen und das Interface-Modul beinhaltet. Der Geräteträger unter dem Rumpf des Roboters dient zur Aufnahme der CTD48 Sonde und des Akustikmodems. Zur Hindernisvermeidung ist in der Kuppel der optische Distanzsensor verbaut.

können zwei Anschlüsse des bereits erwähnten Interface-Moduls verwendet werden. Dieses bietet weiterhin Anschlussmöglichkeiten für die extern verwendete CTD-Sonde und das Unterwassermodem. Weiterhin dient der zusätzlich im Roboter befindliche Platz zur Unterbringung eines weiteren Akkus für das Modem, um die elektronisch übertragenen Störungen auf den Signalleitungen zu minimieren.

#### 4.5.9. Aktuelle Konfiguration

Die vorangegangenen Kapitel dienen dazu, einen Überblick über den Roboter Monsun zu geben. Die hohe Vielfältigkeit und Modularität findet sich in allen Komponenten des AUVS wieder und ermöglichte bereits einen mehrwöchigen Einsatz als Teil der internationalen Forschungsmission Uhrwerk Ozean im Jahr 2016. Die aktuelle Konfiguration des Roboters ist eine Weiterentwicklung des damaligen Stands in vielen Einzelheiten zur Erhöhung der Laufzeit und Robustheit. Die Abbildung 4.21 zeigt ein Foto eines Monsun AUVS, aufgenommen im Sommer 2018. Der Roboter ist komplett ausgestattet und mit dem Ozean-Kit, bestehend aus der Antennen- und Haltevorrichtung am Rumpf des Roboters zusammen mit dem Interface-Modul, erweitert. Der Geräteträger unterhalb des Roboters ist montiert und dient zur Aufnahme der CTD48 Multiparameter-Sonde und dem Evologics Akustikmodem. Die Kuppel des Roboters ist mit dem optischen Distanzsensor zur Hindernisvermeidung bestückt. Die Funkantennen für WiFi und GPS befinden sich am Aluminiumbügel oberhalb des Rumpfes des Roboters und ermöglichen einen guten Empfang auch bei rauer See. In dieser Konfiguration ist stehen aktuell 3 Monsun AUVS zur Verfügung und dienen der Erforschung von Schwarmalgorithmen basierend auf akustischer Kommunikation der einzelnen Mitglieder des Schwarms. Die Anzahl der Roboter kann innerhalb kürzester auf 5 aufgestockt werden, da alle benötigten Teile zur Verfügung stehen. Die nachfolgende Tabelle 4.1 liefert weiterhin die wichtigsten technischen Kenndaten der aktuellen Konfiguration von Monsun .

<b>Technische Kenndaten des Monsun AUVS</b>	
Länge des vorderen Rumpfs	40 cm
Länge des Hecks	20 cm
Länge der Zwischenmodule	7-11 cm
Kombinierte Länge des Roboters	70 cm
Breite des Roboters mit Flügeln	30 cm
Durchmesser des Rumpfs	10 cm
Höhe des Geräteträgers	20 cm
Gewicht des Roboters	7 kg
Akkukapazität	8 mA h
Betriebsdauer	5 h
Geschwindigkeit	2 kn
Getestete Tauchtiefe	20 m
Anzahl Erweiterungsmodule (optional)	9

**Tabelle 4.1.:** Technische Kenndaten des Monsun Unterwasserroboters in seiner aktuellen Konfiguration.

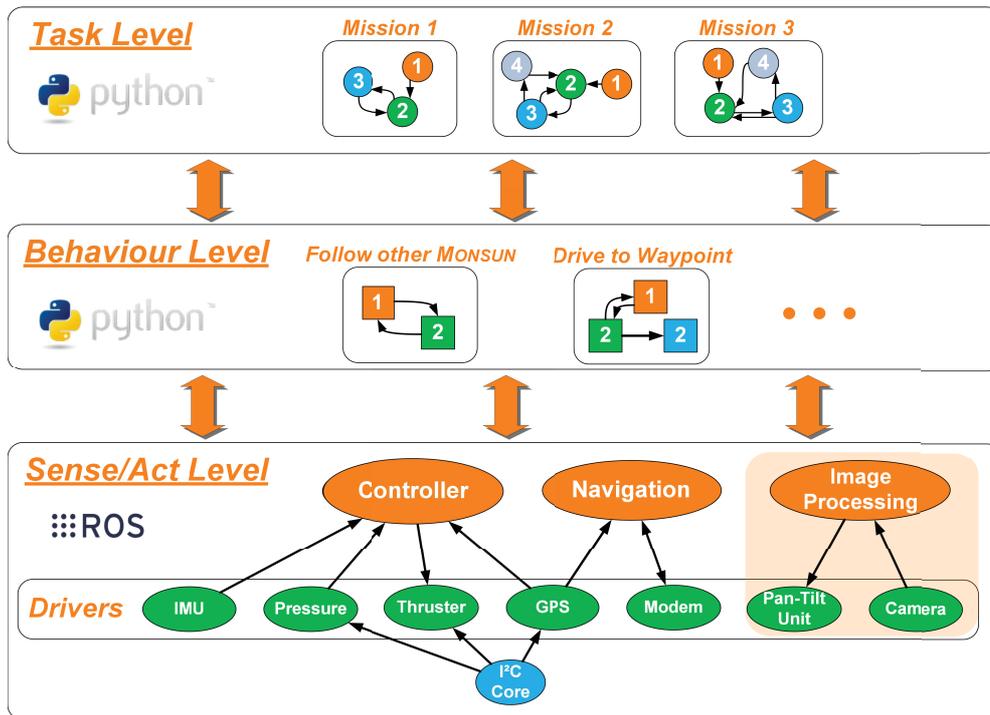
## 4.6. Kontrollsoftware

Der Entwurf und die Entwicklung eines autonomen Roboters stützt sich immer auf zwei feste Säulen, welche nur im Gleichgewicht eine reibungslose Funktionsweise des Systems ermöglichen: eine robuste Hardwareplattform, welche den Anforderungen in der realen Welt standhält und eine Kontrollsoftware, die dem Roboter Intelligenz und die Fähigkeiten liefert, seine angedachten Aufgaben zu erfüllen. Die Softwarearchitektur von Monsun ist hierarchisch strukturiert und ebenfalls nach den Prinzipien der Modularität und Adaptierbarkeit entwickelt worden. Als Basis für die Kontrollsoftware wurde das frei verfügbare *Robot Operating System (ROS)*<sup>10</sup> verwendet. Dieses Softwareframework wurde vorrangig für die Entwicklung von autonomen Robotern entworfen und liefert diverse Funktionalitäten, wie z.B. Hardwaretreiber und -Abstraktion, Paketverwaltung und Kommunikation zwischen Programmen und Programmteilen. ROS besteht aus Programmteilen, sogenannte *Nodes*, *Packages* und *Stacks*. Packages können Nodes, Bibliotheken, Konfigurationsdateien oder beliebig andere nützliche Dateien enthalten. Stacks wiederum bestehen aus mehreren Packages und sollen eine minimale Ansammlung an Quellcode enthalten, welcher direkt verwendet werden kann. Nodes werden hauptsächlich in C++, Python oder auch Lisp programmiert und enthalten die eigentlichen Funktionalitäten. Der ROS Master fügt die Nodes zusammen, wodurch diese untereinander Messages austauschen und Services nutzen können. Das Austauschen von Nachrichten funktioniert über das Publish- und Subscribe-Prinzip. Ein Node veröffentlicht eine Message über ein eindeutiges Topic. Alle Nodes, die dieses Topic abonniert haben, erhalten eigenständig die Message. Services können zusätzlich von Nodes bereitgestellt und anschließend von anderen Nodes verwendet werden.

Die Software von Monsun kann in drei verschiedene Ebenen eingeteilt werden: dem *Sense/Act Level*, dem *Behaviour Level* und dem *Task Level* (siehe Abbildung 4.22). Die Tasks definieren eigenständige Robotermissionen und befinden sich auf der höchsten Abstraktionsebene der Softwarearchitektur. Sie haben Zugang zu den elementaren Roboterdaten, wie zum Beispiel der aktuellen Zeit und zu den Informationen, welche vom darunter befindlichen *Behaviour Level* geliefert werden. Die Missionen werden mithilfe der unabhängigen Python Bibliothek *SMACH* als endliche Zustandsautomaten definiert. Diese Programmbibliothek liefert einfache Syntax und Visualisierungsmöglichkeiten der Zustandsautomaten, den beinhaltenden Transitionen und dem Datenfluss. Die Automaten können weiterhin hierarchisch in Containern organisiert werden und ermöglichen dadurch die Verwaltung von komplexen Robotermissionen. Diese können Tasks wie das Abtauchen auf Missionstiefe, gefolgt von einer Suche nach einem Objekt mit beinhaltender Inspektion und der Rückkehr zum Startpunkt enthalten. Abhängig vom erhaltenem Feedback während der Mission kann zuverlässig in einen anderen Zustand gewechselt werden, beispielsweise wenn ein Objekt an einem Ort nicht gefunden werden kann, und der Roboter an anderer Stelle erneut beginnen soll. Weiterhin beinhalten alle Zustände der Missionen einen sogenannten Fehlerzustand, welcher im Notfall das Auftauchen

---

<sup>10</sup><http://www.ros.org/>



**Abbildung 4.22.:** Die ROS-basierte Softwarearchitektur des Mونسون Unterwasserroboters aufgeteilt in drei hierarchische Ebenen: dem *Sense/Act Level*, dem *Behaviour Level* und dem *Task Level*. Auf der untersten Ebene sind die Gerätetreiber und spezifischen Grundfunktionalitäten, sowie Positions- und Fahrtregler implementiert. Auf diese Fähigkeiten wird in der mittleren Ebene für die Implementierung von spezifischen Verhalten, wie das Fahren zu einem vorgegebenem Wegpunkt zugriffen, bevor auf der höchsten Abstraktionsebene ganze Missionen als Abfolge von Verhalten in endlichen Automaten definiert werden [MEIM14].

des Roboters verursachen kann. Dieses erhöht die Sicherheit des Gesamtsystems und verhindert den Verlust von Robotern.

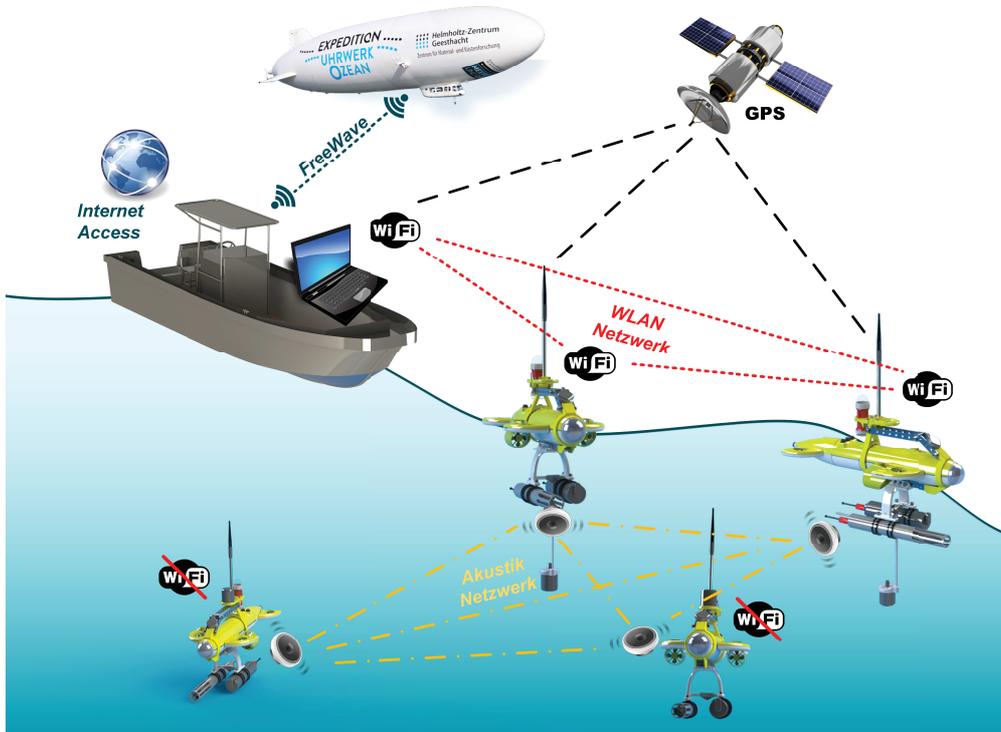
Auf der mittleren Abstraktionsebene der Softwarearchitektur befindet sich das *Behaviour Level*. Auf dieser Ebene werden die Elementarverhalten des Roboters Mونسون implementiert, welche auf der einen Hand ganz simpel sein können, wie zum Beispiel einfache Fahrt- oder Tauchmanöver, aber auf der anderen Hand auch sehr komplex, wie das Navigieren zu einem bestimmten Objekt im Einsatzgebiet. Als Darstellung werden ebenfalls *SMACH* basierte endliche Zustandsautomaten verwendet, mit dem Unterschied, dass diese Abstraktionsebene direkt auf die Sensorik und Aktorik des Roboters zugreifen kann und damit die eigentliche Steuerung des Roboters übernimmt. Dem Navigationsverhalten wird beispielsweise eine neue Zielposition von der Steuereinheit übermittelt. Dieses führt dazu, dass im ersten Schritt die aktuelle Position des Roboters mithilfe von XSens und GPS ermittelt wird, gefolgt von einem iterativen Prozess, welcher die Ausrichtung des Roboters durch Ansteuerung der Motoren ändert und mit einer vorwärts gerichteten Kraft zum Ziel navigiert.

Die unterste Ebene der Kontrollsoftware wird als *Sense/Act Level* bezeichnet und

bildet die ROS-basierte Schnittstelle zur Hardware des Roboters. Die Ebene ist in vier Kategorien unterteilt: den Hardwaretreibern, den Fahrtreglern, der Navigation und der Bildverarbeitung. Die Treiber interagieren mit der Peripherie des Roboters über den gemeinsamen I<sup>2</sup>C-Bus. Da allerdings nicht alle Sensoren über ein solches Interface verfügen, wurden in diesen Fällen ATmega168 Mikrocontroller als Zwischenstation verwendet, welche eine Übersetzung verschiedener Kommunikationsarten ermöglichen und gleichzeitig erste Datenauswertungen vornehmen. So wird beispielsweise der XSens Positions- und Lagesensor über eine serielle UART-Schnittstelle von einem ATmega ausgelesen, welcher die Daten dann in verschiedenen I<sup>2</sup>C-Registern bereitlegt und der Kontrollsoftware in Form eines ROS-Nodes zur Verfügung stellt. Dieser liest die Daten in bevorzugter Datenrate aus und veröffentlicht sie über eine ROS-Message im System. Da sich allerdings viele Geräte an dem gemeinsamen I<sup>2</sup>C Kommunikationsbus befinden, wird eine Regulierung des exklusiven Zugriffs auf den Bus benötigt, damit es zu keinen Konflikte kommt. Hierfür würde ein sogenannter I<sup>2</sup>C-Core implementiert, welcher den Zugriff der Geräte auf den Bus administriert. Über ein Mutex-basiertes System erlaubt der Core einem Kommunikationsteilnehmer den exklusiven Zugriff auf den Bus zu einem bestimmten Zeitpunkt. In dem Fall, dass mehrere Teilnehmer kommunizieren wollen, werden die Anfragen in einer FIFO-Queue vom Core gesammelt und nacheinander abgearbeitet. Im Fehlerfall erkennt der Core zusätzlich eine ansteigende Anzahl an Anfragen in seiner Queue und beginnt damit, Gegenmaßnahmen zu ergreifen, indem kurzzeitig essentielle Anfragen wie Fahrtregler priorisiert werden, um Fehlfunktionen oder sogar einen Verlust des Roboters zu verhindern.

Die bildgebende Sensorik (siehe Kapitel 4.5.2) ist in einem eigenen Modul integriert und die Software gilt als exklusiver und eigenständiger Zweig der untersten Softwareebene. Aufgrund der hohen Rechenlast der Objekterkennung wird eine eigene Recheneinheit benötigt, die ihre auswertbaren Daten mithilfe einer seriellen Schnittstelle direkt an die Kontrolleinheit des Roboters zur Verfügung stellt. Dieses ist aufgrund der Datenrate nicht über den gemeinsamen Datenbus möglich. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der untersten Softwareebene ist die Navigation und Lokalisation. Diese wird mithilfe der Informationen von Akustikmodem und anderer sensorischer Daten von GPS und IMU eigenständig in einem Node durchgeführt. Als Ergebnis werden die Positionsdaten auf eigenen Topics dem System zur Verfügung gestellt.

Der wichtigste Teil des *Sense/Act Levels* sind die unter dem Punkt Controller befindlichen Fahrt- und Positionsregler. Der Controller empfängt die Fahrtkommandos, wie die gewünschten Tiefe und Richtung und sendet ausgehend davon direkte Befehle an die Thruster von Monsun. Die Motorstellwerte werden dabei von vier unabhängigen PID-Reglern errechnet, welche das komplette Fahrverhalten des Roboters regeln. Geregelt wird neben der Tiefe noch die Lage des Roboters über die sogenannten Yaw-Pitch-Roll Winkel, die jeweils einen eigenen Regler besitzen.



**Abbildung 4.23.:** Die verschiedenen Kommunikationsebenen des Monsoon Schwarms während einer Mission. Der Benutzer plant die Ausführung von einem Boot in der Nähe des Schwarms. Die aufgetauchten Roboter an der Oberfläche befinden sich in einem WLAN Netzwerk mit dem PC des Nutzers. Gleichzeitig besitzen diese Einheiten des Schwarms eine gültige GPS Position. Die AUVs untereinander kommunizieren auch im getauchten Zustand über ein akustisches Netzwerk. Vom Boot aus können die gesammelten Daten direkt über eine Internetschnittstelle versendet werden. Während der Expedition Uhrwerk Ozean bestand zusätzlich eine FreeWave Funkverbindung zum Zeppelein, mit dessen Hilfe die Infrarotdaten der Hyperspektralkameras übermittelt wurden.

## 4.7. Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten

Der Einsatz eines Roboterschwarms erfordert ein hohes Maß der Kommunikation und Koordination der einzelnen Einheiten in Verbindung mit dem Nutzer, welcher die Mission steuert, Rahmenbedingen festlegt und die Abfolge einzelner Schritte unabhängig der Autonomie der Einheiten plant. Dabei findet die Kommunikation auf mehreren Ebenen statt und dient der Missionsplanung, der Missionsdurchführung und der Datenauswertung während und nach dem Einsatz der Roboter.

Die Abbildung 4.23 illustriert die verschiedenen Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten mit einem Schwarm von Monsoon Unterwasserrobotern, welche im Laufe der Projektzeit zur Anwendung kamen. Der Einsatz der Roboter wird immer von einem sich im Einsatzgebiet befindlichem Rechner gesteuert. Weiterhin wird ein WLAN Netzwerk eingerichtet, mit dem sich der Steuerrechner und die einzelnen AUVs verbinden. Über aktive Secure Shell (SSH) Verbindungen ist es nun

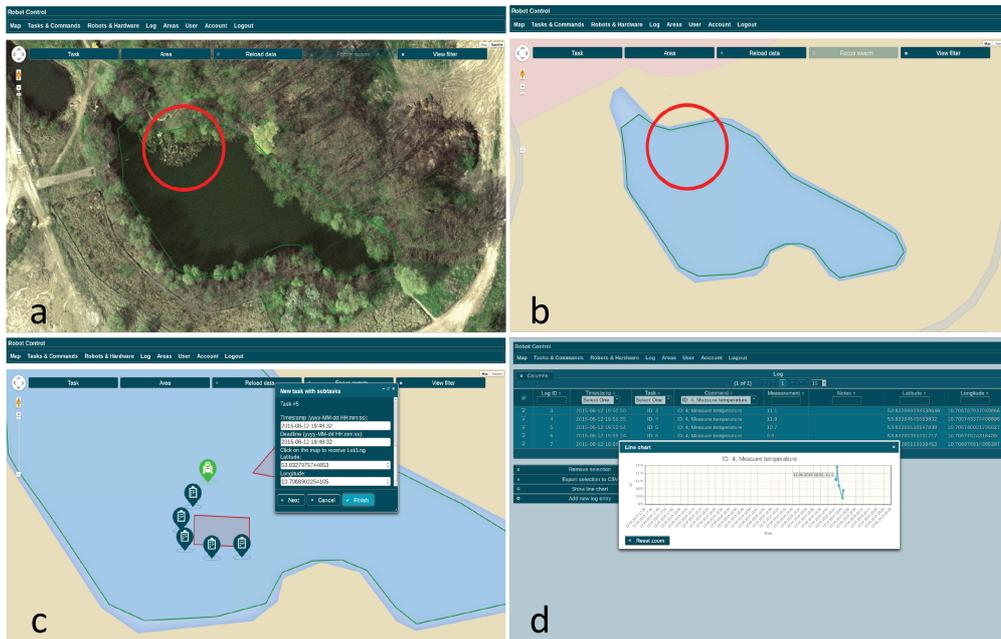
möglich, mit den ROS Systemen der Roboter zu interagieren und Missionsbefehle zu übersenden. Für eine bessere Steuerung des Systems werden die Roboter zusätzlich mit IDs versehen, um eine hierarchische Kommunikationsstruktur aufbauen zu können. Einsatzbefehle werden so per WLAN an den Monsun mit der niedrigsten ID übersendet und dieser verteilt eventuelle Aufgaben und Befehle an Roboter mit höherer ID. Dieses selbst-organisierende System bietet den Vorteil von verminderter Kommunikation mit dem Nutzer und lässt diesen die Mission einfacher planen. Dieses ist allerdings nur im aufgetauchten Zustand der Roboter möglich, da nur an der Oberfläche eine WLAN Verbindung aufrecht erhalten werden kann. Dies gilt ebenfalls für eine Lokalisierung der Einheiten per GPS, die für die Navigation und Planung benötigt wird. Unter Wasser bauen die Schwarmmitglieder mithilfe der Akustikmodems eine weitere Kommunikationsebene auf, welche für einen Datenaustausch der Roboter untereinander während der Mission verwendet wird. Da die Bandbreite dieses Kommunikationskanals im Vergleich zu einer aktiven WLAN Verbindung sehr gering ist, werden über die Akustikmodems nur wenige wichtige Daten für den Ablauf der Mission ausgetauscht. So können die Roboter mit aktiver GPS- und WLAN-Verbindung an der Oberfläche den getauchten Einheiten Informationen über Fahrtrichtung und Geschwindigkeit mitteilen, um als Schwarm gemeinsam zu operieren. Gleichzeitig erlauben die Akustikmodems eine Messung der Signallaufzeit, aus der die Entfernung zwischen den Robotern errechnet werden kann. Diese neu gewonnenen Daten werden ebenfalls über die Modems im Schwarm verteilt und ermöglichen eine Lokalisation über Triangulation. Unabhängig von der benötigten Kommunikation zur Koordination der Roboter, dienen die beiden Kommunikationsebenen auch für die Weiterleitung von missionsspezifischen Daten. Zwar reicht die Bandbreite nicht für die Übertragung von Bildern aus, dafür können aber numerische Daten wie die der CTD Sonde an die Oberfläche übertragen werden. Dort können diese direkt ausgewertet werden und bieten dem Nutzer die Möglichkeit, zur Missionszeit diese an aktuelle Begebenheiten, wie beispielsweise das Passieren einer Sprungschicht, anzupassen. Während der Expedition Uhrwerk Ozean (siehe Kapitel 3.4) wurde noch eine weitere Kommunikationsebene eingeführt, um mit dem Luftschiff kommunizieren zu können, welches die Mission koordinierte. Über das FreeWave Protokoll<sup>11</sup> wurde ein RF Funknetzwerk aufgebaut, mit dessen Hilfe die Temperaturbilder der Hyperspektralkameras des Zeppelins an die verschiedenen Einheiten im Operationsgebiet weitergeleitet wurden. Damit konnten dann die Nutzer auf den Schiffen die zu untersuchenden Positionen genau lokalisieren und ihre Geräte an den richtigen Stellen ausbringen.

Für die Missionsplanung benötigt der Nutzer Informationen über das Einsatzgebiet, sowie die Positionen der verschiedenen Roboter und deren interne Zustände. Soll zum Beispiel ein festgelegtes Gebiet auf das Vorhandensein von Schadstoffen untersucht werden, muss dem Roboter diese Aufgabe auf die ein oder anderer Art mitgeteilt werden. Dies kann entweder über direkte Kommunikation erfolgen, oder aber die Aufgabe wird auf einem Missionsplanungsserver zentral gespeichert, welcher diese über Dienste dem Roboter zur Verfügung stellt. Eine zentrale Anlaufstelle für die Abarbeitung von Missionen ist ebenfalls bei der Nutzung eines

---

<sup>11</sup><http://www.freewave.com/>

## 4.7. Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten



**Abbildung 4.24.:** Die Missionsplanungssoftware von Monsun entwickelt im Rahmen der Masterarbeit von Patrick Zenker. Mithilfe einer Datenbank werden missionspezifische Daten und Roboterinformationen zentral gespeichert, welche online abgerufen werden können, um weitere Schritte zu planen. Gleichzeitig bietet sie eine Eingrenzung des Einsatzgebiets und eine Navigation anhand von Wegpunkten, welche in der Karte intuitiv gesetzt werden können. Die Abbildungen (a) und (b) illustrieren ein mögliches Einsatzgebiet und die verschiedenen von Google Maps zur Verfügung gestellten Ansichten. In (c) werden verschiedene Wegpunkte im Einsatzgebiet eingefügt, welche über ein Popup Menü aufrufbare Informationen beinhalten können. In (d) wird die ebenfalls integrierte Datenauswertung von aufgenommenen Umweltdaten direkt in der Applikation dargestellt [Zen15]

Roboterschwarmen von Vorteil. So können von dort mit verschiedenen Auswahlverfahren und Heuristiken die Aufgaben auf geeignete Mitglieder des Schwarms verteilt werden. Betrachtet man das oben genannte Beispiel der Schadstoffuntersuchung, kommen für diese Aufgabe nur Roboter in Frage, welche über geeignete Sensorik verfügen, sich im Einsatzgebiet befinden und über eine ausreichende Akkukapazität verfügen. Im Rahmen der Masterarbeit von Patrick Zenker wurde eine grafische Benutzungsschnittstelle (*GUI*) entwickelt, die genau für die erwähnten Aufgaben geeignet ist. Gleichzeitig wurde sie aber auch plattformunabhängig und nutzungsfreundlich entworfen. Die Abbildung 4.24 illustriert die verschiedenen Ansichten der Schnittstelle. Wesentlicher Bestandteil dabei ist die Integration von Google Maps<sup>12</sup> als zentrale Darstellungsvariante. Aus der Vogelperspektive kann zwischen physischer Darstellung oder Satellitenaufnahme gewählt werden, um das Einsatzgebiet und temporäre Eingrenzungen durch Vegetation zu betrachten. Das zu befahrende Gebiet kann mithilfe eines Polygonzugs genauer spezifiziert werden.

<sup>12</sup>maps.google.de

Weiterhin können nicht befahrbare Bereiche und Hindernisse markiert werden, die es den Robotern später erlauben, Gefahrenbereichen bei der autonomen Fahrt auszuweichen. Die Navigation der Roboter erfolgt hauptsächlich über Wegpunkte. Diese können mit weiteren Aufgaben verknüpft werden, wie beispielsweise mit einer Schadstoffuntersuchung in einer bestimmten Tiefe, sowie mit anderen Wegpunkten zu komplexen Pfaden zusammengefasst werden. Die spezifischen Informationen über das Einsatzgebiet mit beinhaltenden Wegpunkten und Eigenschaften der Roboter, beispielsweise die aktuelle Position und verbaute Sensorik, werden in mehreren Tabellen einer SQL-Datenbank auf dem Missionsplanungsserver gespeichert. Der Nutzer kann über die Benutzungsschnittstelle auf alle Daten zugreifen, und dabei über PopUp Menüs zusätzliche Informationen zu den vermerkten Wegpunkten und Robotern ermitteln. Weiterhin können übermittelte Daten direkt aufgerufen und grafisch ausgewertet werden.

Für die Expedition Uhrwerk Ozean wurde eine vereinfachte Version der Missionsplanungssoftware verwendet, da der Einsatz auf dem offenen Meer weniger komplex ist und nur zwei Monsun Roboter verwendet wurden. Die Planung der Trajektorien durch die auffälligen Strukturen wurde ebenfalls anhand von Google Maps Karten durchgeführt. Diese wurden dabei mit Temperaturbildern des Zepelins verknüpft und der Nutzer auf dem Begleitboot konnte Zielpunkte anhand von GPS Koordinaten ermitteln, damit die Roboter die Anomalie in der Wassersäule mit ihrer Sensorik passieren konnten. Die Fahrbefehle wurden hierbei per direkter Kommunikation an die beiden Roboter übertragen um die Robustheit des Systems in der sich schnell ändernden Gesamtlage bei der Wirbeljagd zu erhöhen.

Im folgenden Kapitel werden zu den hier vorgestellten Teilen der Entwicklung des Roboters Monsun verschiedenste Ergebnisse und Auswertungen von Testreihen geliefert, um die Funktionalitäten der einzelnen Teile zu bewerten und einzuordnen.

# 5

## Experimente und Evaluation

Unsere Fehlschläge sind oft erfolgreicher als unsere Erfolge.

//

//

--- Henry Ford

Die Entwicklung eines autonomen Robotersystems ist ein aufwendiger und arbeitsintensiver Prozess, müssen doch die einzelnen Komponenten im Verbund fehlerfrei funktionieren, um ein eigenständiges Verhalten zu ermöglichen. Dieses ist besonders im Bereich der Unterwasserrobotik wichtig, da das Einsatzgebiet keine Fehler verzeiht, welche im schwerwiegendsten Fall zum Verlust des Systems führen. Weiterhin können die Missionen im Vergleich zu Land- und Luftrobotern nicht im selben Maße visuell beobachtet werden, da die Sichtverhältnisse unter Wasser oftmals nur wenige Meter betragen. Der Entwicklungsprozess von autonomen Systemen wird daher von einer erheblichen Anzahl quantitativer und qualitativer Tests begleitet, bevor die Roboter für Missionen in natürlichen Gewässern einsatzbereit sind. Die Evaluationen dieser Experimente liefern die Daten, welche zur Verbesserung des Systems, seiner internen Regelung und zum Aufbau intelligenter Verhalten benötigt werden, um ein flexibles und nützliches System zu generieren.

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der verschiedenen Verhaltensweisen des Roboters Monsun sowie Experimente und deren Evaluation zur Demonstration der Zuverlässigkeit des Systems. Einführend wird eine Einleitung in den Bereich der verschiedenen verwendeten Roboterverhalten basierend auf den Paradigmen der mobilen Robotik geliefert, bevor die Regelung der Elementarverhalten detailliert erklärt wird. Grundlegende Parameter und Messwerte werden vorgestellt und eine

Einschätzung der Systemleistung wird gegeben, bevor die Ergebnisse der bereits beschriebenen Expedition Uhrwerk Ozean (siehe Kapitel 3.4) als Leistungsanalyse des Gesamtsystems beschrieben werden.

Teile dieses Kapitels beruhen auf den eigenen Veröffentlichungen [MEIM14, MRM16, MIMB17, IMM17, BIMM18].

### 5.1. Paradigmen und Verhalten der mobilen Robotik

Die vorangegangenen Kapitel lieferten einen Überblick über die Soft- und Hardware des Roboters Monsun und beschrieben das vorhandene Grundgerüst. Aufgrund seiner Modularität und Flexibilität ist Monsun auf viele verschiedene Weisen nutzbar und seine Rechenkapazität bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, die gesetzten Ziele mit dem Roboter zu erreichen und ihm eine künstliche Intelligenz zu verschaffen. Diese ist kann durch drei verschiedene Paradigmen charakterisiert werden: dem *hierarchischen*, dem *reaktiven* und dem *hybriden deliberativ/reaktiven* Roboterparadigma [77]. Diese Paradigmen werden durch die Primitiven **SENSE**, **PLAN** und **ACT** genauer beschrieben.

#### **SENSE:**

Verwendet eine Roboterfunktionalität Informationen der vorhandenen Sensoren und stellt diese anderen Funktionen als Ausgabe zur Verfügung, so wird diese Funktion der Kategorie SENSE zugeordnet.

#### **PLAN:**

Werden Informationen von Sensoren oder einer Wissensbasis von Funktionalitäten verwendet, um eine oder mehrere Aufgaben zu definieren, die dann vom Roboter ausgeführt werden sollen, so werde diese der Kategorie PLAN zugeordnet.

#### **ACT:**

Produzieren Funktionalitäten Ausgabekommandos zur Ansteuerung von Aktoren, so werden diese der Kategorie ACT zugeordnet.

Die Programmierung von autonomen Robotern orientiert sich oftmals an bekannten Denkmustern, welche immer und überall in der Natur beobachtet werden können. Bereits *Shakey*, der erste mobile Roboter, der seine eigenen Aktionen planen konnte, verwendete dafür das *hybride* Roboterparadigma [78]. Diese, auch S-P-A (Sense-Plan-Act) Paradigma genannte Verfahrensweise, ist besonders orientiert an dem menschlichen Denkmuster. Dabei nimmt der Roboter seine Umwelt sensorisch wahr, plant anhand eines bekannten globalen Weltmodells seine nächsten Schritte und führt diese dann direkt aus [77].

Die Planungsphase zusammen mit einem globalem Weltmodell ist allerdings die Schwachstelle dieser Herangehensweise. Es ist oftmals schwierig, ein genaues Modell der Welt zu entwickeln, welches den Planungsaufwand minimiert und gleichzeitig

genau genug ist, um sich in diesem Weltmodell wiederzufinden. Besonders im Bereich der Unterwasserrobotik ist ein solches Modell schwer zu generieren, da die Roboter kaum über die sensorischen Kapazitäten verfügen, um eine ausreichende Abstraktion zu generieren. Weiterhin ist es bei der Verwendung dieses Paradigmas schwierig, auf unvorhergesehene Situation zu reagieren. Eine Hindernisvermeidung muss möglichst sofort und ohne vorherige Planung durchgeführt werden, weil bei Kollisionen unter Wasser der Verlust des AUVs möglich ist.

Die fortschreitende Entwicklung in der Elektronik führte in der Vergangenheit zu immer kleiner werdenden Robotern und autonom fahrenden Vehikeln, bei denen bewusst auf eine Planungsphase verzichtet werden sollte. Inspiriert durch die Verhaltensweisen von Insekten und kleinsten Lebewesen wurde hierfür das *reaktive*, auch S-A (Sense-Act) Paradigma entwickelt. Durch die Einsparung der Planung werden hier die Sensoreingaben direkt verarbeitet an die verschiedenen Aktuatoren weitergeleitet. Dieses ermöglicht eine Reaktion auf plötzlich auftretende Ereignisse ohne Zeitverlust und findet heutzutage sogar in Robotern des Heimgebrauchs Anwendung, wie beispielsweise autonome Rasenmäh- und Staubsaugerroboter.

Dieses Paradigma führte zu vielen verschiedenen Grundverhalten, die ebenfalls mit Monsun umgesetzt werden. Neben einfachen Fahrverhalten, auch *Cruise* genannt, finden besonders häufig Hindernisvermeidungsverhalten ihre Anwendung. Beim *Avoid* Verhalten werden die Sensoreingaben verwendet, um frühzeitig Hindernissen auf dem Weg auszuweichen, während des *Escape* Verhalten kurz vor stattfindenden Kollisionen dazu führt, dass der Roboter zurück schreckt und seinen Weg in einer anderen Richtung fortsetzt. Da einzelne dieser sogenannten primitiven Verhalten nicht ausreichen, um ein produktives Roboterverhalten zu generieren, wurde im Rahmen des S-A Paradigmas eine Möglichkeit der Kombination mehrerer Verhalten entwickelt. Durch die Verwendung z.B. einer Subsumptionlogik ergeben sich emergente Gesamtverhalten, die dann in der Lage sind, komplexe Missionen autonom durchzuführen [79].

Soll ein Unterwasserroboter getaucht eine vorgegebene Trajektorie fahren, überlagern sich in diesem Fall folgende Verhalten: Auf der untersten Ebene befindet sich das einfache Fahrverhalten, welches den Roboter in eine vordefinierte Richtung bewegt. Da die Fahrt allerdings getaucht stattfinden soll, wird das einfache Fahrverhalten von einem weiteren Verhalten überlagert, welches die Tiefe des Roboters auf den gewünschten Wert regelt. Mit höchster Priorität kann, sofern die Sensoren dafür vorhanden sind, noch die Hindernisvermeidung angegliedert werden, die vermeidet, dass der Roboter mit unvorhergesehenen Gegenständen während der Fahrt kollidiert.

Für definierte Aufgaben in bekannten und beschränkten Bereichen ist das beschriebene Paradigma sehr gut geeignet. Bei komplexeren Einsatzszenarien, welche auch den Einsatz mehrerer Roboter beinhalten, sind rein reaktive Verhalten allerdings nicht mehr ausreichend. In diesen Fällen ist eine Planungsphase unabdingbar um den

Anforderungen an die Mission gerecht zu werden. Um die Vorteile beider genannten Roboterparadigmen zu vereinigen, wurde für komplexere Verhalten das *hybrid deliberativ/reaktive* Roboterparadigma, auch P,S-A Paradigma genannt, eingeführt. Dieses beinhaltet wieder eine Planungsphase, allerdings ist diese der reaktiven S-A Verhaltensebene vorgeschaltet. Die Planungsphase ist dafür gedacht, eine sogenannte Missionsplanung durchzuführen, welche die geforderte Aufgabe an den Roboter in mehrere Einzelaufgaben unterteilt. Den Einzelaufgaben werden dann die bereits bekannten reaktiven Roboterverhalten zugeordnet und sequentiell abgearbeitet [77].

Dieses Verhalten ist ebenfalls beim Roboter Monsun mit Hilfe von endlichen Zustandsautomaten umgesetzt. Ist das Ziel einer Mission beispielsweise die Messung der Wassertemperatur an verschiedenen Stellen in verschiedenen Tiefen eines Gewässers, wird diese komplexe Aufgabe von der Missionsplanung zuerst in mehrere einzelne Aufgaben unterteilt: Der Fahrt zu einem gegebenen Wegpunkt, dem Abtauchen an diesem Wegpunkt mit beinhaltender Temperaturmessung und der Weiterfahrt zum nächsten Missionspunkt. Während der Fahrt zwischen den Wegpunkten kann der Roboter weiterhin rein reaktiv fahren, um so beispielsweise Hindernissen ohne Zeitverzögerung auszuweichen ohne die Mission anschließend neu planen zu müssen.

## 5.2. Fahrtregelung

Viele der genannten Elementarverhalten, sei es das Fahren in eine bestimmte Richtung, oder das exakte Halten der Tiefe, basieren intern auf einer technischen Regelung. Diese bezeichnet man als einen Vorgang, bei dem die zu regelnde Größe fortlaufend erfasst, mit einer Führungsgröße verglichen und im Sinne einer Angleichung an diese beeinflusst wird. Im Genaueren handelt es sich bei den meisten Verhalten von Monsun um Folgeregelungen, d.h. die Führungsgröße, der die Ausgangsgröße des Prozesses folgen soll, ist zeitlich nicht konstant, sondern ändert sich. Ein typischer Vertreter hiervon ist die Kursregelung des Roboters, da sich der Kurs stets je nach der zu erfüllenden Aufgabe regelmäßig ändert und von vielen Faktoren abhängig ist. Die Abbildung 5.1 illustriert den vereinfachten Wirkungsplan der Regelung nach DIN 19226, welcher die wesentlichen Bestandteile und Größen einer Regelung in einem Regelkreis illustriert.

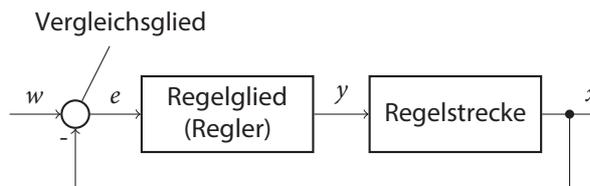
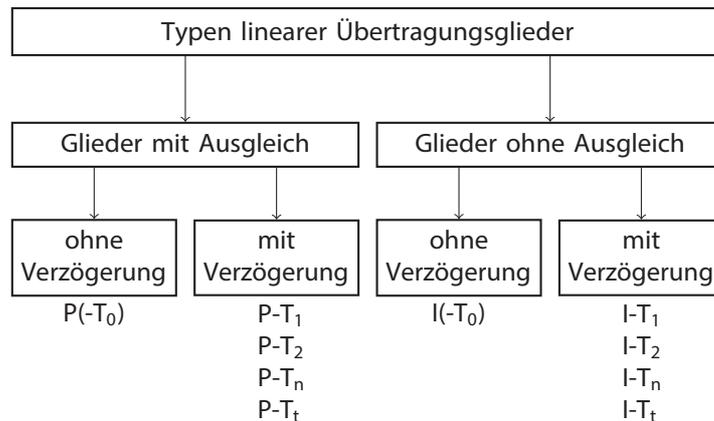


Abbildung 5.1.: Wirkungsplan der Regelung nach DIN 19226 [80]



**Abbildung 5.2.:** Typen linearer Übertragungsglieder [80]

Als Eingabe in den Regelkreis wird hier die *Führungsgröße*  $w$  verwendet, welche in einem Vergleichsglied mit der *Regelgröße*  $x$  verglichen wird, woraus sich die *Regeldifferenz*  $e$  ergibt. Die Größen  $x$  und  $w$  werden aus diesem Grund auch oftmals als Ist- und Sollwert bezeichnet. Das Vergleichsglied und das Regelglied bilden im Anschluss den Regler des Systems und erzeugen die *Stellgröße*  $y$ , welche angepasst an die Regelstrecke des Systems versucht, den Istwert an den Sollwert anzugleichen [80].

Die Regelstrecke beschreibt die Eigenschaften des zu regelnden Systems in seinem statischen Verhalten, also dem Verhalten im stationären Zustand (Beharrungsverhalten) und in seinem dynamischem Verhalten, welches auch als Zeit- oder Übergangsverhalten bezeichnet wird. Stellt sich einem zu regelnden System bei einer konstanten Stellgröße  $y$  nach einer endlichen Zeit eine konstante Ausgangsgröße  $x$  ein, so weist die Regelstrecke einen Beharrungszustand auf und wird in diesem Falle auch als eine Regelstrecke mit Ausgleich bezeichnet. Ein Beispiel für so eine Regelstrecke ist ein Elektromotor, welcher als Eingangsgröße einen Spannungswert verwendet, der die Ausgangsgröße Drehzahl des Motors bedingt. Die Drehzahl ist bei einer konstanten Eingangsspannung immer gleich und verändert sich nicht. Strebt das System beim Anlegen einer konstanten Eingangsgröße jedoch keinem stationären Zustand entgegen, wird diese Regelstrecke als Strecke ohne Ausgleich bezeichnet.

Der Monsun Unterwasserroboter ist dank seiner kleinen modularen Bauweise und der insgesamt 6 Unterwassermotoren ein sehr agiles System, welches sich unter Wasser in insgesamt fünf Freiheitsgraden bewegen kann. Für die elementaren Bewegungsarten des Roboters werden jeweils einzelne Regler verwendet, da sich diese in ihrer Art und Weise sehr stark unterscheiden. Um einen passenden Regelalgorithmus für die verschiedenen Verhalten zu entwerfen, werden diverse Überlegungen im Rahmen der Regelstreckenanalyse durchgeführt, um das dynamische Übergangsverhalten des Systems zu messen. Üblicherweise wird dabei das zu untersuchende System am Eingang mit einem Testsignal beaufschlagt

und das resultierende Verhalten am Ausgang beobachtet. Die Antwort auf so eine sogenannte *Sprungfunktion* wird in der Regelungstechnik als *Sprungantwort* oder auch *Übergangsfunktion* bezeichnet. Die Abbildung 5.2 liefert eine Übersicht über die verschiedenen Übertragungsglieder und unterscheidet zwischen den daraus resultierenden charakteristischen Regelstrecken. Je nach Art der ermittelten Regelstrecke erfolgt daraus der Entwurf eines zugeschnittenen Regelalgorithmus [80].

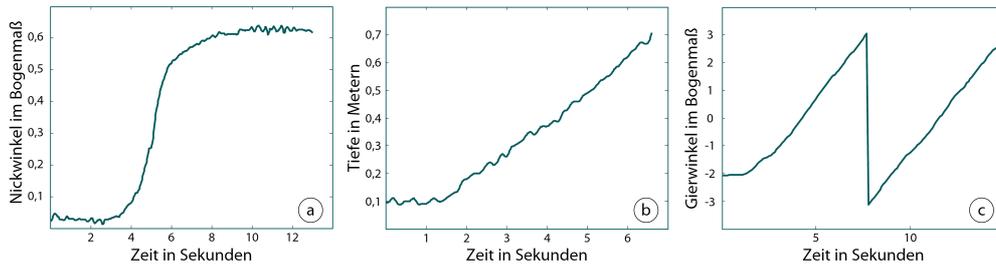
Die Position eines Monsun AUVs ist im Wasser definiert durch seine Tiefe unterhalb der Wasserlinie und seine Lage im Raum, welche mit Hilfe der sogenannten Gier-Nick-Roll-Winkel (engl. Yaw-Pitch-Roll Winkel) angegeben wird. Diese verschiedenen Winkel geben die Rotationen um die drei Achsen eines rechtshändigen Koordinatensystems an, welches imaginär im Mittelpunkt des Roboters ausgerichtet ist.

Für die Manipulation der Tauchtiefe dienen die vier vertikalen Motoren, welche gemeinsam eine Kraft erzeugen, die den positiven Auftrieb des Roboters übersteigt und das AUV abtauchen lässt. Der Nickwinkel definiert eine Drehung um die Querachse des Roboters, welcher immer möglichst klein gehalten werden sollte, damit Monsun gerade im Wasser liegt. Liegt der Roboter beispielsweise in Fahrtrichtung nach vorne geneigt im Wasser, kann durch die Flügel bereits bei einer kleinen Fahrt voraus eine aktive Tauchbewegung ausgelöst werden, die eine unerwünschte Eingabe für die Tiefenregelung erzeugt. Die vorherige Austarierung des Roboters hat den Haupteinfluss auf den Nickwinkel des Roboters. Eine aktive Manipulation dieses Winkels, welche durch Strömungen und Wellengang nötig ist, ist ebenfalls mithilfe der vier vertikalen Motoren möglich. Dabei führen unterschiedliche Stellwerte zwischen den vorderen zwei und hinteren zwei Motoren zu einer Drehung um die Querachse des Roboters.

Der Rollwinkel definiert eine Drehung um die Längsachse von Monsun, welche mithilfe unterschiedlicher Stellwerte der vertikalen Motoren auf der Backboard- und Steuerbordseite manipuliert werden kann. Durch den Einsatz eines Geräteträgers am Roboter, welcher beispielsweise das Unterwassermodem und eine CTD-Sonde aufnimmt, befindet sich der Schwerpunkt weit unterhalb der Längsachse des Roboters. Da die vertikalen Motoren in den Flügeln einen Abstand von 10 cm von der Längsachse des Roboters aufweisen, ist der Hebelwinkel zu gering, um eine aktive Regelung des Rollwinkels zu generieren. Außerdem wirkt der tiefe Schwerpunkt passiv stabilisierend auf das System, wodurch eine Regelung nicht weiter nötig ist und aus diesem Grund nicht weiter betrachtet wird.

Die Kursregelung des Roboters entspricht einer Regelung des Gierwinkels, welcher eine Drehung um die senkrechte Achse durch den Mittelpunkt von Monsun repräsentiert. Der sogenannte Kompasskurs kann mithilfe der beiden horizontalen Motoren manipuliert werden. Da die Motoren zentrisch um den Mittelpunkt des Roboters montiert sind, dreht sich der Roboter auf der Stelle um die eigene Achse, wenn diese gegenläufig zueinander angetrieben werden.

Mithilfe der Tauchtiefe und der Lage im Raum kann die grundlegende Positionierung von Monsun durchgeführt werden. Um eine Regelung für die verschiedenen Parameter zu implementieren, wurden die einzelnen Regelstrecken mithilfe von



**Abbildung 5.3.:** Abgetragene Sprungantworten des Systems hervorgerufen durch unterschiedliche Motorstellwerte für die zur Positionierung essentiellen Parameter (a) Nickwinkel, (b) Tiefe und (c) Gierwinkel.

Sprungfunktionen der Regelstreckenanalyse auf ihr dynamisches Verhalten genauer untersucht, um die genauen Typen der Übertragungsglieder ermitteln zu können. Zur Generierung der Sprungantworten dienen verschiedene Motorstellwerte als Eingaben in das System, welche dann mithilfe der internen Sensorik wie Drucksensor und IMU ausgewertet werden. Die Abbildung 5.3 illustriert die vorher als essentiell definierten aufgenommenen Sprungantworten eines Monsun Roboters.

Zur Bestimmung der Sprungantwort für die Drehung um die Querachse wurde ein Monsun Roboter in einer Tauchtiefe von 50 cm an seinem Schwerpunkt fixiert. Als Eingaben in das System wurden verschiedene Motorstellwerte generiert, die bei den vorderen vertikalen Motoren einen Schub nach oben und bei den hinteren einen Schub nach unten erzeugten. Als Ergebnis führte der Roboter eine Nickbewegung durch, welche in der Abbildung 5.3 auf der linken Seite mithilfe der Sensorwerte der IMU abgetragen ist. Deutlich zu erkennen ist, dass es sich um eine Regelstrecke mit Ausgleich handelt, da der Nickwinkel einem stationären Endwert entgegen strebt. Dieses ist bedingt durch die Positionierung der Motoren am Rumpf und dem tieferem Schwerpunkt unterhalb des Roboters. Weiterhin reagiert das System mit einer Verzögerung von 3 s auf die angelegten Motorstellwerte. Diese ist bedingt durch die verschiedenen Energiespeicher des Systems. So wird eine gewisse Zeit benötigt, bis die Kapazitäten und Induktivitäten des Systems aufgeladen werden, und die Motoren mit ihrer Schwungmasse ihre geforderte Drehzahl erreichen. Aus dem Verlauf der Kennlinie lässt sich erkennen, dass es sich um ein lineares Übertragungsglied mit Ausgleich und einer Verzögerung, also ein PT-Glied höherer Ordnung handelt. Im weiteren wird für Strecke des Nickwinkels eine P-T<sub>2</sub> Strecke angenommen, welche auf ihre Regelparameter hin untersucht wird.

Für die Untersuchung des Tauchvorgangs wird eine Sprungantwort generiert, bei der den vier vertikalen Motoren eine gleichmäßige Schubkraft nach unten gerichtet zugeordnet wird, sodass diese Kraft die entgegen gerichtete Kraft des positiven Aufstiegs übersteigt und der Roboter abtaucht. Wie schon bei der Sprungantwort zur Drehung um die Querachse beobachtet werden konnte, reagiert das System wieder mit einer Verzögerung, womit von mindestens einem Energiespeicher ausgegangen werden kann (siehe Abbildung 5.3 mittig). Allerdings ist aus der

Sprungantwort ebenfalls ersichtlich, dass es sich um eine Strecke ohne Ausgleich handelt. Dieses integrierende Verhalten lässt sich leicht anhand des Tauchvorgangs erklären. Sobald die Schubkraft der Motoren größer als die entgegengesetzte Kraft des positiven Auftriebs ist, taucht der Roboter unablässig ab. Damit kann die Strecke als I- $T_t$  Glied mit Totzeit  $T_t$  charakterisiert werden. Eine genauere Modellierung des Tauchverhaltens ist in [BAMM18] beschrieben.

Der letzte grundlegende Parameter für die Positionierung des Roboters ist der Gierwinkel, welcher durch die beiden horizontalen Motoren manipuliert wird und Drehungen um die senkrechte Achse verlaufend durch den Mittelpunkt des Roboters generiert. Zur Aufnahme einer Sprungantwort wurden beide Motoren gegenläufig zueinander angesteuert, wodurch sich der Roboter fortlaufend um die eigene Achse dreht. Die Sprungantwort des Systems ist in der Abbildung 5.3 rechts dargestellt. Das markante Sägezahnprofil ist daher begründet, dass die IMU des Roboters den Gierwinkel im Intervall von  $x \in [-\pi, \pi]$  liefert, wodurch nach einer vollständigen Drehung ein Phasensprung auftritt. Die Sprungantwort zeigt ein deutlich integrierendes Verhalten und definiert somit eine Strecke ohne Ausgleich. Dies ist einfach durch das kontinuierliche Drehen des Roboters um seine eigene Achse zu erklären, welches keinem festen Endzustand entgegen streben kann. Wiederum kann von einem Energiespeicher ausgegangen werden, da die für die Motoren charakteristische Verzögerung am Anfang auftritt, wobei sie in diesem Fall nicht so ausgeprägt ist, da auch nur zwei Motoren für den Sprungversuch verwendet werden.

Nachdem die Übertragungsverhalten der Regelparameter, welche grundlegend für die Positionierung des Roboters verantwortlich sind, mithilfe von Sprungantworten untersucht wurden, wird ein Regelungsverfahren benötigt, welches die auftretenden Regeldifferenzen in möglichst effektiver Weise in benötigte Stellgrößen umsetzt. Da sich die Konfiguration des Roboters Monsun aufgrund seiner Modularität einfach ändern lässt, werden für die Regelung ebenfalls digitale Regler als Bestandteil der Software verwendet. Weiterhin ist bekannt, dass sich die Regeldifferenzen auf stetige Art und Weise ändern, wodurch ebenfalls ein Reglertyp mit stetig änderbarer Regelgröße benötigt wird. Der in der Praxis am weitesten verbreitete Regler ist der PID-Regler, welcher aufgrund seiner flexiblen Einstellmöglichkeiten und sehr gutem Regelverhalten auch hier Anwendung findet. PID-Regler verbinden die drei gebräuchlichsten Reglertypen und vereinen ihre jeweiligen Vorteile. Der einzelne Proportional-Regler (*kurz P-Regler*) erzeugt eine der aktuellen Regeldifferenz proportionale Stellgröße. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$y(t) = K_{P(R)} e(t) \quad (5.1)$$

Die numerische Größe des Proportionalbeiwertes  $K_{P(R)}$  gibt an, wie stark der Regler auf eine bestimmte Regeldifferenz reagiert. Da kein weiterer Parameter verwendet wird, ist allerdings offensichtlich, dass dieser Reglertyp für die Erzeugung einer Stellgröße das Vorhandensein einer Regeldifferenz voraussetzt, wodurch er bei Regelstrecken mit Ausgleich zu einem schwingenden Verhalten neigt. Um bleibende Regeldifferenzen zum Verschwinden zu bringen, wird somit ein weiterer Typ Regler

benötigt, der auch dann noch eine Stellgröße liefert, wenn keine Regeldifferenz mehr vorhanden ist. Für diese Aufgabe eignet sich ein Integral-Regler (*kurz I-Regler*), für eine Regeldifferenz  $e(t)$  folgende Stellgröße  $y(t)$  generiert:

$$y(t) = K_{I(R)} \int e(t) dt \quad (5.2)$$

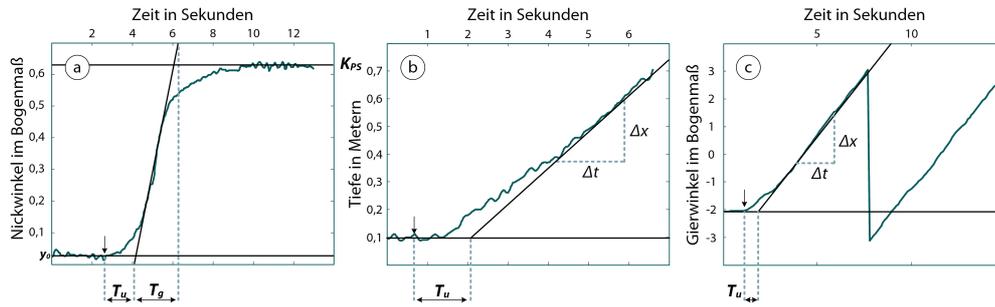
Durch das integrierende Verhalten reagiert dieser Reglertyp sehr verzögernd auf plötzliche Regeländerungen und ist weiterhin für Regelstrecken ohne Ausgleich nicht geeignet, da er durch das integrierende Verhalten der Regelstrecke zu einem instabilen Zustand führt. Aus diesen Gründen ist es naheliegend, dass die Reglertypen P und I miteinander kombiniert werden, um einen Regler zu erhalten, der die Vorzüge beider Anteile vereinigt. Der resultierende Proportional-Integral-Regler (*kurz PI-Regler*) setzt sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} y(t) &= y_P + y_I = K_{P(R)} \cdot e(t) + \frac{K_{P(R)}}{T_N} \int e(t) dt \\ &= K_{P(R)} \left( e(t) + \frac{1}{T_N} \int e(t) dt \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Während der P-Anteil die aktuelle Regeldifferenz in eine proportionale Stellgröße umsetzt, wodurch auf plötzlich auftretende größere Regeldifferenzen schneller reagiert werden kann, bewertet der I-Anteil zeitlich zurückliegende Werte der Regeldifferenz. Dafür werden die Parameter  $K_{P(R)}$  als Proportionalbeiwert und  $T_N$  als Nachstellzeit verwendet. Die Nachstellzeit ist dabei definiert als die Zeitspanne, die der I-Anteil benötigen würde, um eine identische Änderung wie ein P-Anteil nach Anlegen des Sprungs benötigen würde. Sie kann daher leicht aus der Sprungantwort ermittelt werden. Kommt es zu einer großen Störung des zu regelnden Verhaltens, welche eine vergleichbar große Regeldifferenz hervorruft, dauert es eine gewisse Zeit, bis der PI-Regler auf diese reagieren kann, da die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße weiterhin konstant ist. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, kann ein differenzierender Anteil - ein sogenanntes D-Glied - dem PI-Regler hinzugefügt werden, wodurch der Proportional-Integral-Differential-Regler (*kurz PID-Regler*) entsteht, welcher oftmals in allen Bereichen der Automatisierung eingesetzt wird. Für den Zusammenhang zwischen der Regeldifferenz  $e(t)$  und der Stellgröße  $y(t)$  gilt schlussendlich die Beziehung:

$$\begin{aligned} y(t) &= y_P + y_I + y_D \\ &= K_{P(R)} \cdot e(t) + \frac{K_{P(R)}}{T_N} \int e(t) dt + K_{P(R)} \cdot T_V \frac{de(t)}{dt} \\ &= K_{P(R)} \left( e(t) + \frac{1}{T_N} \int e(t) dt + T_V \frac{de(t)}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Zu den bekannten Kennwerten Proportionalbeiwert  $K_{P(R)}$  und Nachstellzeit  $T_N$  kommt die Vorhaltezeit  $T_V$  hinzu, welche die Zeitspanne angibt, bei der der Regler einen bestimmten Wert der Stellgröße früher erreicht, als sie es ohne D-Anteil tun würde. Damit kann sie ebenfalls einfach aus der experimentellen Sprungantwort des Systems übernommen werden. Allgemein können die verschiedenen Anteile des PID-Reglers wie folgt beschrieben werden: der P-Anteil des Reglers bewertet



**Abbildung 5.4.:** Experimentelle Ermittlung der Strecken-Kenngrößen aus den Sprungantworten

die Regeldifferenz in der Gegenwart, der I-Anteil den Verlauf der Differenz in der Vergangenheit und der D-Anteil den Verlauf in der Zukunft. Für die wichtigsten Parameter zur Positionierung des Roboters Monsun wurden bereits die Sprungantworten aufgenommen und in der Abbildung 5.3 illustriert. Um für die favorisierten PID Regler die Parameter und Kenngrößen zu erhalten, wird das Verfahren von Chien, Hrones und Reswick (*CHR-Regeln*) zur Einstellung von Reglern verwendet. Diese Regeln sind als Weiterentwicklung der zweiten Regel von Ziegler und Nichols zu sehen, welche versuchen, die Regelstrecken einem P-T<sub>1</sub> Glied anzunähern. Die Regeln hierfür unterscheiden zwischen aperiodischen und periodischen Regelungen und deren Parameter können für vorteilhaftes Stör- und Führungsverhalten eingestellt werden. Mithilfe eines grafischen Verfahrens können aus den Sprungantworten numerische Werte für die jeweiligen Einstellregeln gewonnen werden. Die Abbildung 5.4 illustriert hierfür die bekannten Sprungantworten erweitert mit mehreren Hilfslinien zur Parameterbestimmung. Bei Regelstrecken ohne Ausgleich wird eine Tangente an die Steigung der Sprungantwort angelegt, welches hier im Falle des Gierwinkels und der Tiefenregelung vorliegt. Der Schnittpunkt der Tangente mit der Zeitachse liefert dann die Verzugszeit  $T_u$ . Die Steigung der Tangente lässt sich durch Messung der Ordinaten- und Abszissenabschnitte  $\Delta x$  und  $\Delta t$  bestimmen. Der Quotient aus den beiden Werten liefert dann den Integrierbeiwert der Strecke  $K_{IS} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ . Bei einem Einschwingvorgang mit maximal 20 % Überschwingen ergeben sich die PID-Reglerparameter nach *CHR* wie folgt:

$$K_P = \frac{0.95}{K_{IS} \cdot T_u}, \quad T_N = 2 \cdot T_u, \quad T_V = 0.47 \cdot T_u \quad (5.5)$$

Bei Regelstrecken mit Ausgleich werden zur Kennwertanalyse andere Parameter benötigt. Dieses kann in der Abbildung 5.4 anhand der Sprungantwort des Nickwinkels betrachtet werden. Dort wird eine Wendetangente an den Funktionsverlauf angelegt. Die Schnittpunkte der Tangente mit der Zeitachse und der an den stationären Wert angelegten Asymptote ergeben die benötigten Zeitkomponenten Verzugszeit  $T_u$  und Ausgleichszeit  $T_g$ . Der stationäre Wert am Beharrungszustand liefert gleichzeitig auch den Proportionalbeiwert  $K_{PS}$  aus dem Verhältnis zwischen ihm und der Eingangsamplitude  $y_0$  mit  $K_{PS} = \frac{x(\infty)}{y_0}$ . Nach den Chien, Hrones und

Reswick ergeben sich dann für einen PID-Regler ohne Überschwingen folgende Einstellregeln:

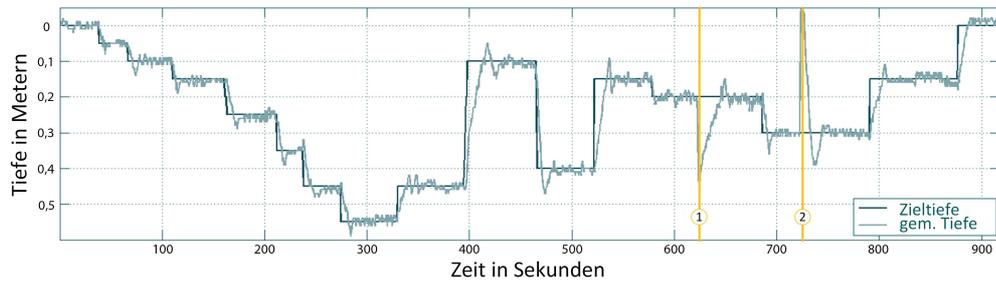
$$K_{PR} = 0.59 \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_U}, \quad T_N = T_g, \quad T_V = 0.5 \cdot T_u \quad (5.6)$$

Die sich aus den Einstellregeln ergebenden Regelparameter wurden nun für die ersten Funktionstests mit einem Monsun Roboter verwendet. Aus softwaretechnischer Sicht wurden für die Regelung des Roboters für jeden genannten Parameter (Yaw-, Pitch-, Rollwinkel, sowie Tiefe) einzelne PID-Regler implementiert. Für die initialen Tests wurden die errechneten Regelparameter der Streckenanalyse verwendet, welche in der Praxis allerdings noch nicht die gewünschten Ergebnisse erzielen konnten. Dieses liegt daran, dass äußere Einflüsse wie Strömungen und die Austarierung des Roboters nicht in die Streckenanalyse einfließen können und als gegeben angesehen werden müssen. Weiterhin muss bedacht werden, dass durch den Einsatz mehrere PID-Regler zur Zeit ein paralleler Zugriff auf die Motoren erfolgt, wodurch sich beispielsweise die Regelung des Nickwinkels und der Tiefe überlagert. Diese verschiedenen Wechselwirkungen führen dazu, dass die finalen Regelparameter nur im Einsatz manuell ermittelt werden können, womit die Regelstreckenanalyse schlussendlich als Startpunkt für ein empirisches Verfahren dient.

Auf eine analytische Systemmodellierung und darauf aufbauende Reglerentwicklung, wie es bei dem ebenfalls am Institut für Technische Informatik der Universität zu Lübeck entwickelten Unterwasserroboter SEMBIO (siehe Kapitel 2.4.9) durchgeführt wurde, wurde bei Monsun verzichtet, da die hier durchgeführte lineare Regelung ausreichend ist und die gewünschten Ergebnisse erzielt. Die für die Modellierung benötigte Systemanalyse hätte neu durchgeführt werden müssen, da sich die Komponenten des Antriebssystems und der strukturelle Aufbau des Roboters zu stark unterscheiden. Ob eine Verbesserung der Regelung dadurch erreicht werden könnte, ist ebenfalls unklar. Eine Klärung dieser Frage ist recht aufwendig und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

### 5.3. Grundfunktionalitäten

Für die qualitative Bewertung der Funktionsweise des Roboters wurden verschiedene Experimente und Testreihen in strömungsarmen Gewässern durchgeführt. Die Versuche wurden so aufgebaut, dass der Roboter eine autonome Lage- und Tiefenregelung durchführte, und dabei in einem zeitlich festgelegten Ablauf mehrere Positionen einnehmen sollte. Da das eigenständige Halten einer vorgegebenen Tauchtiefe die wohl wichtigste Fähigkeit eines autonomen Unterwasserroboters ist, wurde der Fokus der ersten Tests besonders auf dieses Verhalten gelegt. Die Abbildung 5.5 illustriert den Testverlauf über einen Zeitraum von 15 min, bei der die vorgegebene Solltiefe der tatsächlichen Tauchtiefe eines Monsun Roboters gegenübergestellt ist, wobei eine Tauchtiefe von 0 m dem Treiben auf der Wasseroberfläche entspricht. Anfänglich wird die Solltiefe in 5 cm Schritten inkrementiert, um die Genauigkeit des Regelalgorithmus beobachten zu können. Die Schrittgröße wird im Laufe des Experiments auf 10 cm erhöht, bis irgendwann eine maximale

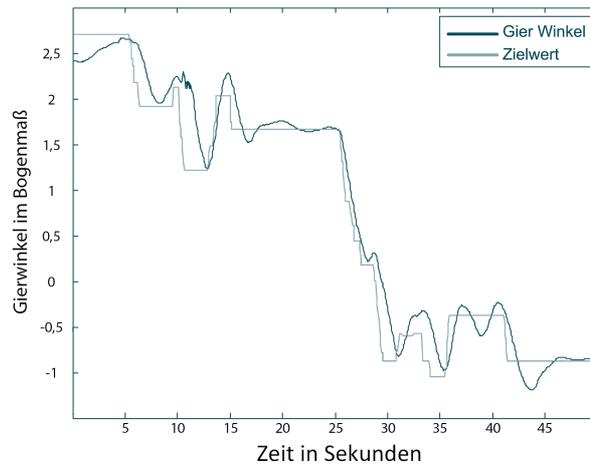


**Abbildung 5.5.:** Evaluationsergebnisse der Tiefenregelung des Roboters Monsoon in einem strömungsarmen Gewässer. Die mithilfe des Drucksensors gemessene Tiefe ist gegenüber der Solltiefe abgebildet. Die Regelung des Roboters erlaubt das autonome Halten der Tiefe mit einer Genauigkeit von 1.4 cm über die Dauer von 15 min. Die orange hervorgehobenen Zeitpunkte markieren Stellen mit einer externen Störgröße, hervorgerufen durch eine manuelle Positionsänderung des Roboters [MEIM14].

Testtiefe von 55 cm erreicht wurde. Anschließend wird die Regeldifferenz durch ein alternierendes Auf- und Abtauchen größerer Abschnitte erhöht. Bei den orange illustrierten Zeitpunkten wurde eine externe Störgröße dem System zugeführt, indem der Roboter manuell unter Wasser gehalten und später auch an die Oberfläche geholt wurde, um das Verhalten des Reglers auf unerwartete Ereignisse zu testen. Generell kann gesagt werden, dass der verwendete PID Regler auf eine Änderung der Solltiefe ohne Verzögerung reagiert. Beim Erreichen der gewünschten Tiefe ist ein leichtes Überschwingen zu beobachten, welches leicht durch die Trägheit des Systems bestehend aus dem Auftrieb des Roboters und der Verzögerung zwischen der softwareseitigen Einstellung der Motorkraft und der realen Kraftänderung erklärt werden kann. Die Tiefe kann während des gesamten Experiments mit einer Genauigkeit<sup>1</sup> von 1.4 cm gehalten werden. Nachdem die Genauigkeit des Reglers mithilfe der Testreihen nachgewiesen werden konnte, wurde weitere Tauchversuche mit größeren Tiefen und in Bewegung unternommen. Dabei sollte der Roboter in eine Tiefe von 1.5 m abtauchen und nach dem Erreichen mit geringer Fahrt in Richtung Norden fahren. Für das Erreichen der Tauchtiefe wurde eine Zeit von 6 s benötigt. Es konnte ebenfalls eine kleine Überschwingbewegung von 6 cm gemessen werden, bevor die Tiefe während der Fahrt mit einer mittleren maximalen Abweichung von 1.3 cm gehalten werden konnte. Das SEMBIO AUV mit seiner aufwendigen Regelung erreicht im Vergleich eine Genauigkeit bei der Tiefenregelung auf der Stelle mit einer maximalen Regelabweichung von 1.4 cm [BAMM18].

Neben der Fähigkeit, eine vorgegebene Tiefe möglichst exakt im stationären Zustand und während der Fahrt halten zu können, ist auch die Regelung des Kurses von großer Bedeutung. Alle höheren Verhalten, wie zum Beispiel das Anfahren eines GPS Punktes basieren auf der grundlegenden Kursregelung, welche durch die Regelung des Gierwinkels realisiert wird. Für die Evaluation wurden auf einem strömungsarmen Gewässer Navigationsfahrten mit vorgegebenen Kompasswerten unternommen.

<sup>1</sup>Errechnet mithilfe der *Root Mean Squared Error* Methode.



**Abbildung 5.6.:** Evaluationsergebnisse der Kursregelung mit einem Monsun auf einem strömungsarmen Gewässer. Während sich der Roboter mit kleiner Fahrt voraus bewegt, wurden in zeitlich unterschiedlichen Abständen die Sollwerte des Gierwinkels geändert. Abgetragen sind die mithilfe des Xsens Sensors gemessenen Gierwinkel gegenüber den von der Software vorgegebenen Sollwerten. Der verwendete PID-Regler bewirkt für das Verhalten eine Regeldifferenz im Durchschnitt von nur 0.083, was einer Abweichung von  $4.8^\circ$  entspricht [Iso16].

Dabei wurden in zeitlich unterschiedlichen Abständen die Sollwerte des Gierwinkels geändert und das resultierende Verhalten des Roboters beobachtet. Die Abbildung 5.6 illustriert den gemessenen Gierwinkel, welcher vom XSens Sensor geliefert wurde, verglichen mit dem gewünschten Sollwert. Es wird deutlich, dass der gemessene Wert dem geforderten Sollwert in den ersten 15 s nur folgt, diesen aber nie ganz annähert. Dies ist durch die geringe Strömung des Gewässers und die simultan stattfindende Vorfahrt des Roboters bedingt, welche ebenfalls die horizontale Aktorik verwendet. Nachfolgend kann allerdings ein Führungsverhalten mit nur wenigen Schwingungen beobachtet werden. Über die Dauer des Experiments beträgt die Regeldifferenz im Durchschnitt allerdings nur 0.083, was einer Abweichung von  $4.8^\circ$  entspricht.

Für die Lageregelung der Nick- und Rollwinkel wurden ebenfalls Daten aufgenommen, welche in der Masterarbeit von Isokeit [Iso16] illustriert sind. Durch den montierten Geräteträger und dem dadurch tief liegenden Schwerpunkt lag der Roboter allerdings so stabil im Wasser, dass auf eine Regelung dieser Parameter in weiteren Versuchen verzichtet wurde. Besonders der Rollwinkel ist aufgrund des Unterbaus mit den vier horizontalen Motoren kaum noch zu manipulieren, während gleichzeitig eine Tiefe aktiv gehalten wird.

## 5.4. Evaluation der Umweltsensorik

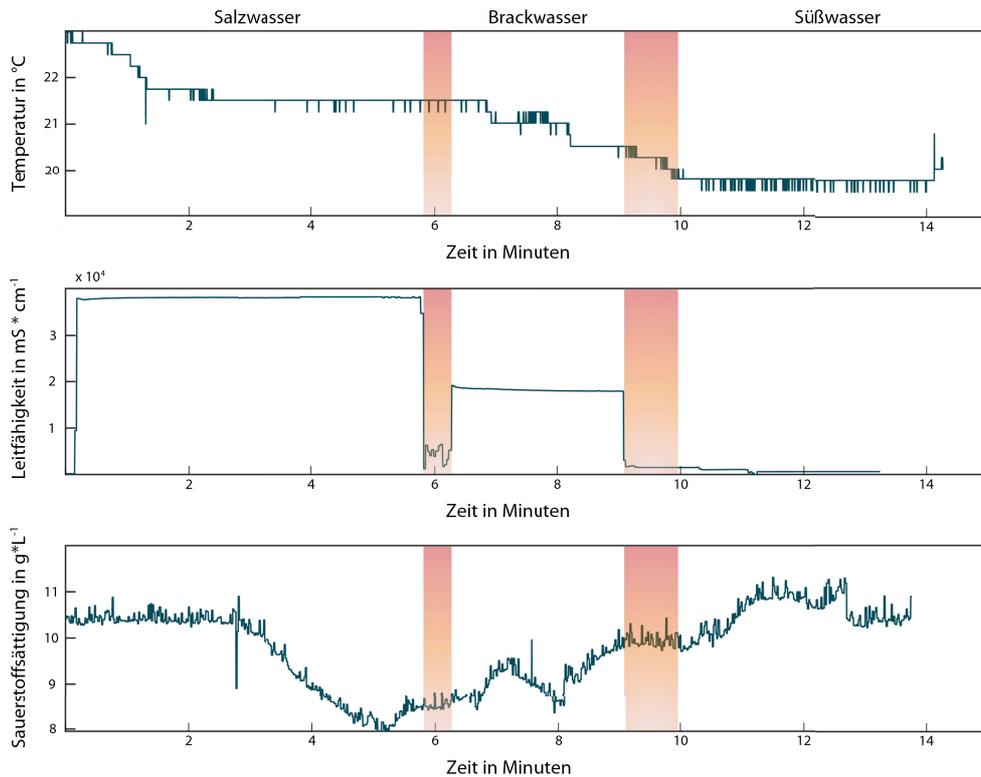
Die vorherigen Ergebnisse liefern ein gutes Abbild der vorhandenen Grundfunktionalitäten des Roboters, welche für die autonome Fahrt alternativlos sind. Die Positionierung des Roboters im Wasser wird mithilfe verschiedener PID Regler umgesetzt und liefert damit die Basis für Funktionstests weiterer Roboterfähigkeiten. Das Kapitel 4 gibt einen Überblick der vorhandenen Erweiterungsmodule für den Einsatz des Roboters. Das Umweltmonitoring wurde als Haupteinsatzfeld des Roboters Monsun festgelegt, wodurch die Fähigkeit der Erhebung von Umweltdaten ebenfalls als Grundfunktionalität des Roboters notwendig ist. Neben der verwendeten kommerziellen CTD-Sonde der Firma Sea&Sun wurde ein eigenständiges Umweltmodul entworfen, welches über eine Reihe von Messsonden zur Erhebung der wichtigsten Parameter verfügt (siehe Kapitel 4.5.6). Der große Vorteil des selbst entwickelten Erweiterungsmoduls ist dabei, dass anders als bei der CTD Sonde, bereits während der Laufzeit des Systems die Daten entnommen und ausgewertet werden können. Dieses ermöglicht das autonome Suchen nach auffälligen Messwerten und auch das Verfolgen diverser Messspuren. Zur Evaluation der Leistungsfähigkeit des Systems wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit Experimente an der Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik<sup>2</sup> unternommen, welche die Leistungsfähigkeit des Systems im Vergleich zu kommerziellen Labormessgeräten bewerteten [Sch15].

Für die Vergleichstest wurden die Daten des Umweltmoduls mit einer kommerziellen HQ40D Multiparameter Messelektronik<sup>3</sup> für pH-Wert, Redoxpotential, Leitfähigkeit und Sauerstoffsättigung in verschiedenen Wasserproben verglichen. Neben normalem Leitungswasser wurde auch natürliches Salzwasser aus der Nordsee als Messgrundlage verwendet. Die Abbildung 5.7 illustriert die Messdaten des Umweltmoduls anhand drei ausgewählter Parameter, nacheinander aufgenommen im Salzwasser, in einer Mischung aus Salz- und Leitungswasser, sowie final im Süßwasser. Am Verlauf der Kurve der gemessenen Leitfähigkeit wird der Ortswechsel des Moduls in den verschiedenen Wasserproben am deutlichsten. Die Zeitpunkte, in denen sich das Modul an der Luft befand, sind in der Abbildung rot hinterlegt. Der Grund, warum die Leitfähigkeit nicht direkt auf den Wert 0 fällt, liegt daran, dass an den Messfühlern der Elektrode einige Wassertropfen verweilten. Auch die Temperaturkurve lässt einen deutlichen Unterschied erkennen, allerdings benötigt der Temperatursensor einige Minuten, um sich auf die neue Umgebungstemperatur einzustellen. Die Kurve für die Sauerstoffsättigung lässt die größten Schwankungen erkennen, was dem Fakt geschuldet ist, dass sie für optimale Messergebnisse extern angeströmt werden muss. Da die Probenbehälter eine Fahrt des Roboters nicht ermöglichten, konnte dies nur durch kleinere Bewegungen des Roboters nachempfunden werden. Nichtsdestotrotz lässt sich erkennen, dass der Sauerstoffgehalt im wärmeren Wasser geringer ist, als in kälterem da sich dieser dort schwerer lösen lässt.

---

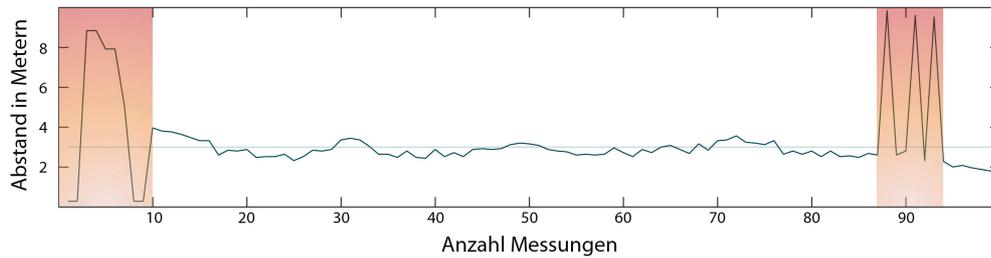
<sup>2</sup>Fraunhofer EMB, Mönkhofer Weg 239a, 23562 Lübeck

<sup>3</sup>HQ40D Portables 2-Kanal Multimeter der Firma Hach (<https://de.hach.com/hq40d-portables-2-kanal-multimeter/product?id=26370217285>)



**Abbildung 5.7.:** Evaluationsergebnisse des selbst entwickelten Umweltmoduls, aufgenommen am Fraunhofer EMB in drei verschiedenen Wasserproben. Am deutlichsten ist der Wechsel der Flüssigkeiten am Verlauf der gemessenen Leitfähigkeit zu erkennen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass der Sauerstoffgehalt in wärmeren Wasser geringer ist als in kaltem. Die rot hinterlegten Bereiche markieren die Zeitabschnitte, in denen das Modul in eine andere Wasserprobe eingebracht wurde.

Der ebenfalls gemessene pH-Wert wurde in der Abbildung nicht illustriert, da er keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Proben erkennen lässt. Im Vergleich zu der professionellen Messelektronik konnten beim pH-Wert Abweichungen von 4 % gemessen werden. Bei der Leitfähigkeit konnte eine maximale prozentuale Abweichung der verschiedenen Messsonden von nur 1.1 % gemessen werden, was vor allem daran liegt, dass es verglichen mit den anderen Parametern sehr einfach ist, die Leitfähigkeit zu messen. Es werden lediglich zwei Messelektroden verwendet, um die maximal übertragbare analoge Spannung zu messen. Messunterschiede sind hier also besonders durch unterschiedlich feine Elektroden und verwendete Analog-Digital-Wandler zu erklären. Aufgrund der Eigenschaft, dass der im Umweltmodul verwendete Sensor für die Sauerstoffsättigung angeströmt werden muss, ergab sich im Vergleich zum HQ40D Multimeter eine Abweichung von 11 %, welche allerdings im Meerwasser auf 7.7 % sank, was darauf schließen lässt, dass eine Kompensation mit der gemessenen Leitfähigkeit durchgeführt wird.



**Abbildung 5.8.:** Evaluationsergebnisse einer Wandverfolgung mithilfe des in Kapitel 4.5.3 vorgestellten Echo-Sounders. Illustriert sind die fortlaufenden Messwerte des Sonars während der Roboter einen Abstand von 3 m zu einer geraden Wand des Lübecker Schwimmbads geregelt halten sollte. Die rot markierten Bereiche zeigen Abschnitte, in denen der Echosounder kein Hindernis wahrnehmen konnte und so seine maximal eingestellte Entfernung von 10 m als Abstand liefert. In den Bereichen, in denen eine Wand erkannt wurde, wird dieser mit einem quadratischen mittleren Fehler von 37.1 cm gefolgt. Als Regler wurde ein einfacher P-Regler verwendet, dessen Parameter experimentell ermittelt wurden.

### 5.5. Evaluation des Sonars

Nachdem die grundsätzliche Einsatzbereitschaft des Roboters Monsun und seine Eignung für den Bereich des Umweltmonitorings durch erste Experimente dargelegt wurde, rückt die Autonomie des Systems weiter in den Vordergrund. Eine der wesentlichen Eigenschaften des selbstständigen Verhaltens ist die sensorische Wahrnehmung der umgebenden Welt und die selbstständige Lokalisierung in dieser. Hierfür kann das Monsun AUV mit einem Echo-Sounder Modul ausgerüstet werden, welches bereits in Kapitel 4.5.3 vorgestellt wurde. Hiermit ist nicht nur eine reaktive Hinderniserkennung während der Fahrt möglich, sondern auch begrenzte Bereiche des Einsatzgebietes können erkannt und zur Navigation verwendet werden. Ein angedachtes Einsatzszenario des Roboters ist die autonome Untersuchung einer Kaimauer hinsichtlich Beschädigungen und Bewuchs. Die Mauer wird dabei über Wasser mithilfe des GPS Sensors angefahren, bis sie in den Schallsignalen des Echo-Sounders identifiziert werden kann. Ab diesem Moment kann ein autonomes Wandfolgeverhalten initiiert werden, welches mit Hilfe eines Reglers abhängig von den gemessenen Abstandswerten den Abstand zur Wand während der Fahrt regelt. Die Abbildung 5.8 illustriert die gemessenen Abstandswerte des Echo-Sounders während einer Wandverfolgung in einem festgelegtem Abstand von 3 m in einem Lübecker Schwimmbad. Solange die Wand eindeutige Sonarechos zurückwirft, kann der Roboter dieser mit einem quadratischen mittleren Fehler von 37.1 cm folgen. Hierfür wurde in den Experimenten ein einfacher P-Regler verwendet, dessen Parameter experimentell ermittelt wurden. Die Einstellung des eigentlichen Echo-Sounders erwies sich allerdings als schwieriger. Wie im Kapitel 4.5.3 bereits erwähnt, sind Sonare dieser Bauart anfällig für diverse Echos, welche aus verschiedenen Richtungen eintreffen. So muss der Schwellwert der Signalfilterung genau gewählt werden, damit keine doppelten Echos, welche besonders in den Ecken eines Schwimmbades entstehen, als eigentliche Abstandswerte erkannt werden. Die roten Bereiche der Abbildung 5.8 stellen die Abschnitte dar, in denen

kein eindeutiges Sonarecho gemessen werden konnte. In diesen Fällen wird eine maximal eingestellte Entfernung von 10 m angenommen, und der Roboter dreht sich so lange auf der Stelle, bis er entweder die Wand wieder gefunden hat, oder nach einer voreingestellten Zeitperiode auftaucht, um seine Position mithilfe des GPS Sensors eindeutig bestimmen zu können.

Das Kapitel 4.5 beschrieb neben dem hier ausgewerteten Echo-Sounder noch weitere Sensoren, um den Roboter mit Hilfsmitteln für die Umgebungserkennung und Hindernisvermeidung auszustatten. Neben dem optischen Distanzsensor wurde unter anderem auch das Lichtschnittverfahren mit einem Linienlaser vorgestellt. Diese Verfahren erwiesen sich in den Tests allerdings nur für die Hinderniserkennung im Nahbereich von maximal 1 m als nützlich. Mithilfe eines reaktiven Ausweichverhaltens konnte der Roboter in einem Pool randomisiert fahren, ohne mit den Wänden oder anderen Robotern zu kollidieren. Möchte man jetzt allerdings höherwertige Lokalisierungsverfahren verwenden, ist beispielsweise die Benutzung von 360° Scanning Sonaren eine vielversprechende Alternative. Am ebenfalls am Institut für Technische Informatik entwickelten Unterwasserroboter HANSE, wurden Verfahren der Selbstlokalisierung und simultanen Kartierung (SLAM - Simultaneous Localisation and Mapping) implementiert und in [FHK<sup>+</sup>12] veröffentlicht.

## 5.6. Kommunikation mehrerer Roboter

Einer der großen Vorteile des Monsun Roboters ist seine Vielseitigkeit im Einsatz und seine Möglichkeit, mit anderen AUVs zu kooperieren, um die angedachte Mission zu erfüllen. Hierfür kann der Roboter mit einem S2CM 18/34 Evologics Akustik Modem ausgerüstet werden (siehe Kapitel 4.5.7). Wie bei vielen anderen Modems auch, wird der sogenannte *AT-Befehlssatz*<sup>4</sup> zum Konfigurieren und Parametrieren des Akustikmodems verwendet. Im Monsun AUV wurde hierfür ein eigener Mikrocontroller verwendet, welche die AT Befehle an das Modem weiterreicht und die bevorzugten Verhalten triggert.

Die größte Schwierigkeit bei der Verwendung der Akustikmodems ist allerdings die Koordination der Kommunikationspartner. Das Wasser als Kommunikationskanal ist für jeden Kommunikationsteilnehmer offen und den Monsun Robotern ist es nicht möglich zu überprüfen, ob der Kanal zu einem Zeitpunkt belegt ist, oder für die eigene Kommunikation genutzt werden kann. Um trotzdem eine konfliktfreie Kommunikation zu ermöglichen, muss zwischen den Kommunikationspartnern des AUV Schwarms ein Protokoll implementiert werden, welches verhindert, dass eine Kommunikation gleichzeitig von mehreren Mitgliedern gestartet wird, was zu einer Verfälschung des akustischen Signals führen würde. Die einfachste Lösungsstrategie in so einem Fall ist das Festlegen von exklusiven Zeitabschnitten, in denen ein Kommunikationspartner den Kanal uneingeschränkt verwenden kann. Für diese, auch Zeitmultiplexing genannte Methode, ist allerdings eine Zeitsynchronisation der einzelnen Kommunikationspartner nötig. Da auf den Monsun Robotern kein Echtzeitbetriebssystem verwendet wird, und als einzige Quelle für die aktuelle Zeit nur die GPS Zeit zur Verfügung steht, erweist sich eine exakte Zeitsynchronisation

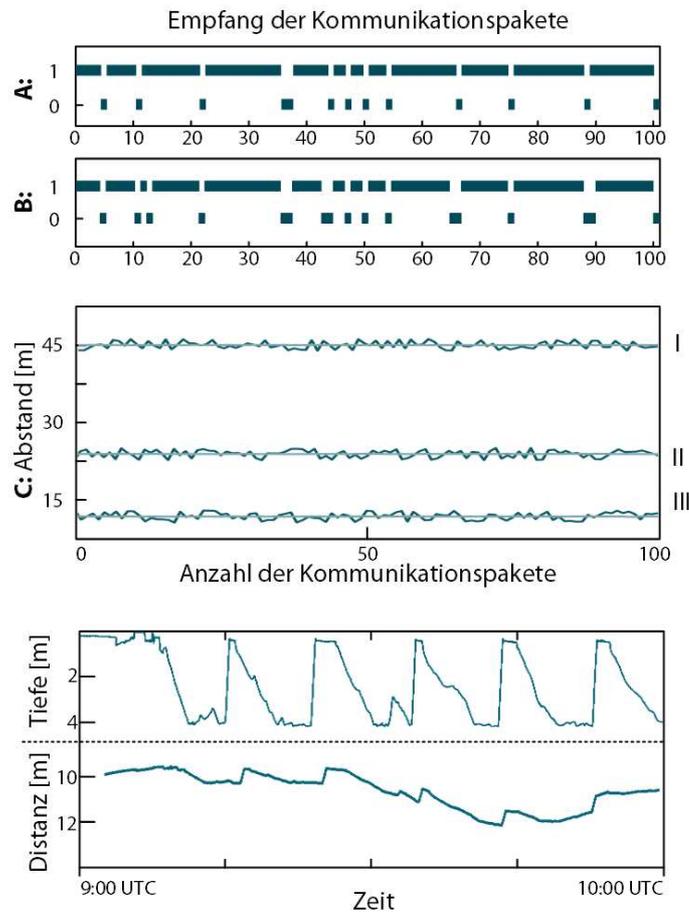
---

<sup>4</sup>AT steht hierbei für *attention* und kennzeichnet den Beginn eines Befehls

allerdings als schwierig. Ein weiterer Punkt, der gegen diese Methodik spricht, liefert die akustische Kommunikation selbst. Die Zeit für eine erfolgreiche Kommunikation zwischen zwei Evologics Modems ist nämlich nicht konstant. Abhängig von den aktuellen Umweltbedingungen, dem Abstand und der Ausrichtung der Roboter, unterscheiden sich die Laufzeiten für eine erfolgreiche Punkt-zu-Punkt Kommunikation erheblich. Diese ungleiche Verteilung führt dazu, dass die gewählten exklusiven Zeitabschnitte sehr lang sein müssen, um sicher zu gehen, dass es zu keinem gleichzeitigen Kommunikationsaufbau verschiedener Entitäten kommt. Dieses führt allerdings dazu, dass die ohnehin begrenzte Bitrate des Kanals noch weiter minimiert wird und kaum noch für einen Austausch aktueller Missionsdaten geeignet ist.

Aufgrund dessen wird für den koordinierten Einsatz mehrerer Monsun Roboter in einem Schwarm ein anderes Prinzip für die wechselseitige Kommunikation benötigt. Aus dem Bereich der Netzwerktechnologie ist das Token-Prinzip als Medienzugriffsverfahren bekannt. Hierbei wird beispielsweise in einem Token-Ring ein sogenannter Token verwendet, der zwischen den Kommunikationspartnern weitergegeben werden kann. Derjenige, welcher zu einem aktuellen Zeitpunkt über den Token verfügt, hat als einziges Mitglied des Netzwerkes exklusiven Zugriff auf den gemeinsamen Kommunikationskanal. Sobald die Kommunikation abgeschlossen ist, wird der Token an den nächsten Teilnehmer des Netzwerkes weitergegeben, und damit der Zugriff auf das akustische Medium einem weiteren Roboter übergeben. Dieses dezentralisierte Prinzip bietet den Vorteil, dass es mit wechselnden Nachrichtenlängen und Zeitperioden klar kommt, weshalb es auf den Robotern implementiert wurde. Für die ersten Verhalten war es notwendig, dass die AUVs ihre Kursdaten untereinander austauschen. Mithilfe der Kompasswerte der anderen Schwarmmitgliedern kann so eine gemeinsame Fahrtrichtung bestimmt und im Pulk gefahren werden. Außerdem war es so möglich, dass ein Roboter an der Oberfläche per GPS Navigation Wegpunkte anfuhr, während ein getauchter Roboter mit gleicher Geschwindigkeit versuchte, dem anderen zu folgen. Diese Methodik funktionierte für kleiner Strecken, ist allerdings empfindlich für unterschiedliche Strömungen über und unter Wasser, die schnell zu einem Auseinanderdriften der AUVs führen. Sobald mehr als zwei Monsun Roboter verwendet wurden, treten zusätzlich Probleme in der kreisförmigen Netzwerktopologie auf. Sobald ein Schwarmmitglied Schwierigkeiten bei der Kommunikation hat, da er beispielsweise in einem Bereich mit erhöhtem Pflanzenaufkommen oder sonstigen Begebenheiten ist, welche die akustischen Signale absorbieren, befindet sich die Kommunikation im ganzen Netzwerk in einem Stillstand. Dieser Kommunikations-Deadlock kann nur gelöst werden, wenn sich entweder die Bedingungen positiv ändern und eine Kommunikation an der fehlerhaften Stelle wieder möglich machen, oder wenn nach einem vorher definierten Timeout die Kommunikation neu gestartet wird. Bleibt die fehlerbehaftete Stelle allerdings präsent, kann ein Kreisschluss auf Dauer nicht mehr realisiert werden und die Kommunikation im Schwarm scheitert.

Aus diesem Grund wurde ein weiteres Verfahren für die Kommunikation in einem Unterwasserroboterschwarm implementiert, welches auch im Fehlerfall einzelner Knotenpunkte weiter funktioniert. Es ist ein Master-Slave-Prinzip, bei dem die Koordination der Kommunikation von einem einzelnen Schwarmmitglied durchgeführt wird. Der als Master bezeichnete Monsun Roboter kommuniziert hierbei nacheinander mit einer skalierbaren Menge Slaves und stößt den direkten Datenaustausch



**Abbildung 5.9.:** Grundfunktionalitäten des Akustikmodems gemessen zwischen zwei Monsun Robotern. Die oberen Gantt Diagramme (1: Empfang, 0: kein Empfang) illustrieren die Erfolgsraten bei der akustischen Kommunikation in einem flachen Gewässer, jeweils in der Hin- und Rückrichtung in einem festen Abstand von 25 m. Die Pakete erreichten ihren Empfänger mit einer Rate von 87 % bzw. 83 %. Die mittlere Grafik illustriert die durchgeführten Abstandsbestimmungen mit Hilfe der Laufzeitmessung. Bei drei unterschiedlich festgelegten Abständen weichen die gemessenen Werte im Durchschnitt nur 29 cm vom tatsächlichen Abstand ab. Unten ist der gemessene Abstand und die Tauchtiefe eines Roboters illustriert, welcher in einem Sägezahnprofil einem an der Oberfläche vorausfahrenden Roboter im festen Abstand folgen sollte [MIMB17].

Punkt-zu-Punkt an. Die Kommunikation mit den einzelnen Slaves verläuft nach dem Handshake-Verfahren, bei dem auf eine Antwort des Adressaten gewartet wird, um erst danach mit weiteren Slaves zu kommunizieren. Fällt ein Slave aufgrund verschiedener Fehlerfälle aus, kann dies nun vom Master erkannt werden, wodurch dieser Slave bei weiterer Kommunikation im Schwarm vernachlässigt wird. Ebenfalls von Vorteil ist, dass der Handshake dazu genutzt werden kann, um die beiderseitigen Signallaufzeiten der Nachrichten zu messen und dem Master mitzuteilen. Mithilfe der gemessenen Schallgeschwindigkeit kann damit die direkte Entfernung zwischen den Kommunikationspartnern gemessen werden.

Die grundlegende Funktionalität der akustischen Kommunikation wurde mit zwei Monsun Robotern in einem flachen Gewässer gemessen. Für die ersten Tests hielten die Roboter eine feste Position und versuchten Datenpakete akustisch auszutauschen. Der Abstand zwischen den Robotern war festgelegt und wurde im Laufe des Experiments zwei mal vergrößert. Die Abbildung 5.9 illustriert die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen, bei denen insgesamt 100 akustische Pakete in einem Ping-Pong Verfahren ausgetauscht wurden. Dabei konnten in der Hinrichtung 87 % der Pakete ihr Ziel erreichen. Die Rückrichtung wies eine Empfangsrate von 83 % auf. Da nur für empfangene Pakete eine Rückantwort gesendet wird, ist diese immer niedriger. Es wurde deutlich, dass zu einigen Zeitpunkten der akustische Kanal unabhängig von der Kommunikationsrichtung keine Datenübertragung ermöglicht, was unter anderem mit Störungen durch Umwelteinflüsse wie aufsteigende Luftblasen erklärt werden kann. Dieses Phänomen konnte wiederholt besonders an sonnigen Tagen beobachtet werden, an denen die Pflanzen unter Wasser vergleichsweise große Mengen an Gasen abgaben. Außerdem ist eine steigende Fehlerrate zu beobachten, wenn sich beide Kommunikationspartner an der Wasseroberfläche befinden und der Abstand zwischen ihnen anwächst. Dieses als Lloyd's Mirror Effekt bekannte Phänomen tritt immer bei akustischer Kommunikation auf, sofern sich die Kommunikationspartner dicht an der Wasseroberfläche befinden und diese kaum durch Wellen unterbrochen ist. Die an der Wasseroberfläche reflektierten Signale bilden dann ein Interferenzsignal, welches die eigentlichen akustischen Signale überlagert und verfälscht [81].

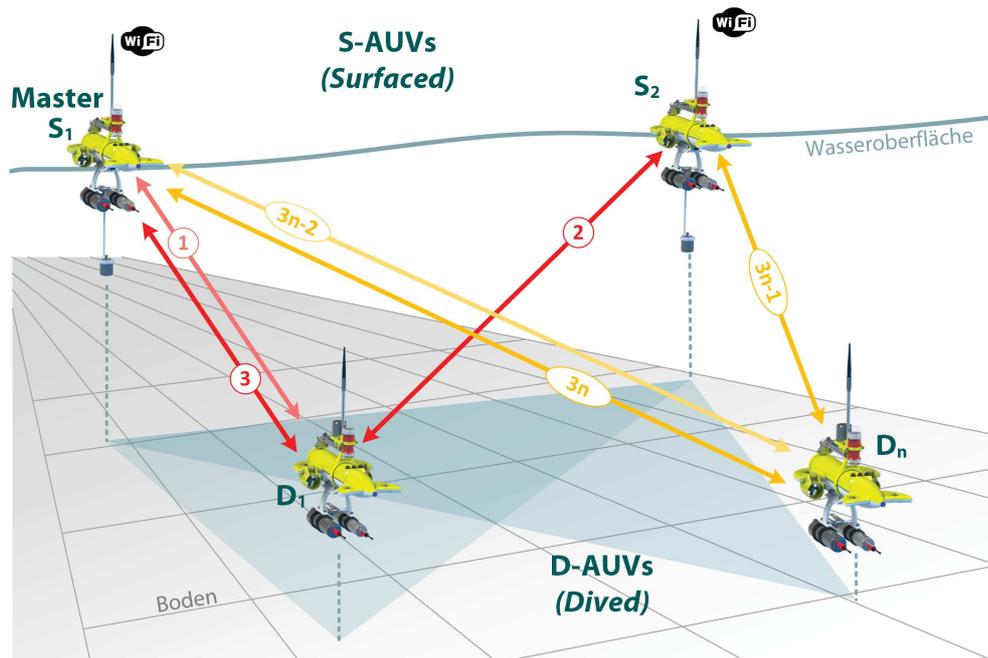
Die Abbildung 5.9 zeigt ebenfalls die Ergebnisse der Distanzmessung basierend auf den gemessenen Laufzeiten während der akustischen Kommunikation. Deutlich sind hier die drei festgelegten Abstände von 10 m, 25 m und 45 m ersichtlich. Mit einer durchschnittlichen Abweichung von nur 29 cm konnten diese Abstände mithilfe der Akustikmodems ebenfalls bestimmt werden. Dabei lag der größte Ausreißer nur bei 49 cm.

Die durchgeführten Messungen zeigten die Zuverlässigkeit des Systems und erlaubten erste Verhalten, welche die Akustikmodems verwendeten. Für die mehrfach erwähnte Expedition Uhrwerk Ozean wurde bereits ein erstes rudimentäres Folgeverhalten von zwei Robotern implementiert, bei dem ein Roboter an der Oberfläche eine GPS basierte Wegstrecke abfuhr und diesem ein Roboter unter Wasser folgen sollte. Der folgende Monsun fuhr dabei in einem Sägezahnmuster, indem er abwechselnd zwischen der Oberfläche und einer Tiefe von 4 m pendelte. Dabei wurden periodisch per Akustikmodem die Richtungswerte der Kompassmodule ausgetauscht und damit konnte gleichzeitig der Abstand der Kommunikationspartner untereinander gemessen werden. Die Abbildung 5.9 illustriert unten den Verlauf der gemessenen Tiefe des folgenden Roboters bei gleichzeitig gemessenem Abstand zu dem Monsun an der Oberfläche. Dieser sollte geregelt auf 10 m gehalten werden, welches vom Roboter trotz Tauchbewegung und Strömungen eingehalten werden konnte.

Die gezeigten Experimente und Messungen zeigten deutlich, dass die verwendeten Modems in Kombination mit den Monsun AUVs höherwertige Verhalten ermöglichen, man bei der Kommunikation im Schwarm allerdings einige Besonderheiten beachten muss. So sollte die Kommunikation zwischen Robotern an der Oberfläche möglichst

mithilfe der WiFi Verbindung erfolgen, um beeinträchtigende Effekte wie den Lloyd's Mirror Effekt zu vermeiden. Für den Bereich des Umweltmonitorings werden besonders Formationsfahrten mit mehreren Robotern benötigt, um gleichzeitige Messungen an einem Ort, aber in unterschiedlichen Wassertiefen zu ermöglichen. Von besonderem Wert sind hier die Messungen unter Wasser, um eventuelle Sprungschichten und sauerstoffarme Bereiche möglichst genau identifizieren und lokalisieren zu können. Für die Lokalisation im Schwarm verwenden die Monsun Roboter die Möglichkeit der Positionsbestimmung an der Wasseroberfläche mit GPS kombiniert mit Laufzeitmessungen der Akustikmodems unter Wasser, um auch den Ort der getauchten Roboter zu berechnen. Als Formation wurde für weitere Tests eine V-Formation angestrebt, bei der zwei Roboter gemeinsam an der Oberfläche gewünschte Wegpunkte anfahren und mindestens ein weiterer Roboter getaucht dahinter diesen folgt. Unter der Prämisse, dass sich der getauchte Roboter hinter den Oberflächen-Monsuns befindet, kann mithilfe des Drucksensors, der Abstände und der vorhandenen GPS-Positionen an der Wasseroberfläche die Position des getauchten AUVs eindeutig bestimmt werden. Die Abbildung 5.10 illustriert die Verteilung der verschiedenen Roboter und den Verlauf der akustischen Nachrichten für das verwendete Protokoll. Die Monsun AUVs an der Oberfläche werden im weiteren als *S-AUVs*  $S_1$  und  $S_2$  bezeichnet, wobei der Roboter  $S_1$  als Master des Kommunikationsprotokolls dient. Unter Wasser befindet sich eine Anzahl von  $n$  AUVs, welche im Folgenden als *D-AUVs*  $D_i$  mit  $i = [1..n]$ ,  $n \in \mathbb{N}$  bezeichnet werden. Jedes *D-AUV* bildet im weiteren eine V-Formation mit den beiden *S-AUVs* und nimmt keine direkte Kommunikation mit anderen getauchten Robotern auf. Auf diese Weise sind verschiedene Verteilungen von Robotern möglich, da die  $D_i$  nicht nur verschiedenen Tiefen, sondern auch unterschiedlichen Abständen zugeordnet werden können, wodurch sich eine größere Abdeckung des Untersuchungsgebiets ermöglicht. Für die Kommunikation werden jetzt Nachrichten-Tripel verwendet, um den getauchten Robotern  $D_i$  das Verfolgen von  $S_1$  und  $S_2$  zu ermöglichen. Für die konfliktfreie Kommunikation initiiert der Master  $S_1$  diese durch eine Nachricht an ein  $D_i$ . Dieses reagiert darauf mit einer Nachricht an  $S_2$ , wodurch erreicht wird, dass das getauchte AUV  $D_i$  den Abstand zu einem führenden Monsun errechnen kann. Beendet wird das Tripel durch eine Nachricht von  $D_i$  an den Master  $S_1$ , indem diesem der Abstand von  $D_i$  zu  $S_2$  ebenfalls mitgeteilt wird. Das Ergebnis des Nachrichtenaustausches ist es, dass der getauchte Roboter  $D_i$  die Abstände zu den beiden führenden Robotern kennt und diese für seine Regelung nutzen kann, um einen vordefinierten Abstand halten zu können. Nach Abschluss des Tripels initiiert der Master  $S_1$  dann eine Kommunikation zu einem weiteren *D-AUV*  $D_j$  mit  $j \neq i$  und wiederholt das Protokoll. Dieser geregelte Ablauf verhindert, dass akustische Nachrichten der getauchten Roboter sich nicht gegenseitig beeinflussen und fehleranfällige Kommunikationen zwischen AUVs derselben Tiefe verhindert werden [BIMM18].

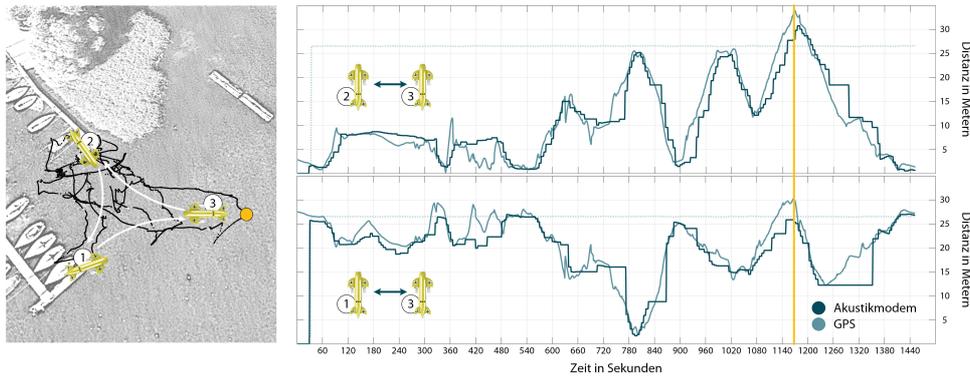
Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass es den Monsun Robotern mit den verwendeten Modems und Protokollen möglich ist, in einem Schwarm von mehreren Unterwasserrobotern zu kommunizieren. Abhängig von äußerlichen Einflüssen wie zum Beispiel herrschenden Umweltbedingungen, kann eine Erfolgsrate von durchgängig mehr als 75 % erfolgreich übertragener Pakete erreicht werden. Damit



**Abbildung 5.10.:** Verwendete Kommunikationsstrategie im Schwarm mit gleichzeitiger Nutzung von WiFi und akustischer Kommunikation für ein Folgeverhalten. Für die Strategie werden mindestens zwei Roboter an der Wasseroberfläche benötigt, welche im Folgenden als *S-AUVs* bezeichnet werden. Das Ziel ist ein Folgeverhalten einer Menge von  $n$  getauchten AUVs, welche hier als *D-AUVs* bezeichnet werden. Ein Roboter an der Oberfläche dient als Master und tauscht sich über WiFi mit dem ebenfalls an der Oberfläche befindlichen Roboter aus. Der Master kommuniziert unabhängig davon nacheinander mit Hilfe von akustischen Nachrichten-Tripeln mit den getauchten D-AUVs, mit dem Ziel, aktuelle Missionsparameter auszutauschen und die Laufzeiten der akustischen Nachrichten für eine paarweise Abstandsmessung zu verwenden. Mit Hilfe der gewonnenen Informationen ist es nun jedem D-AUV möglich, den beiden S-AUVs unter der Prämisse, dass es sich lokal hinter ihnen befindet, in einer V-Formation zu folgen [BIMM18].

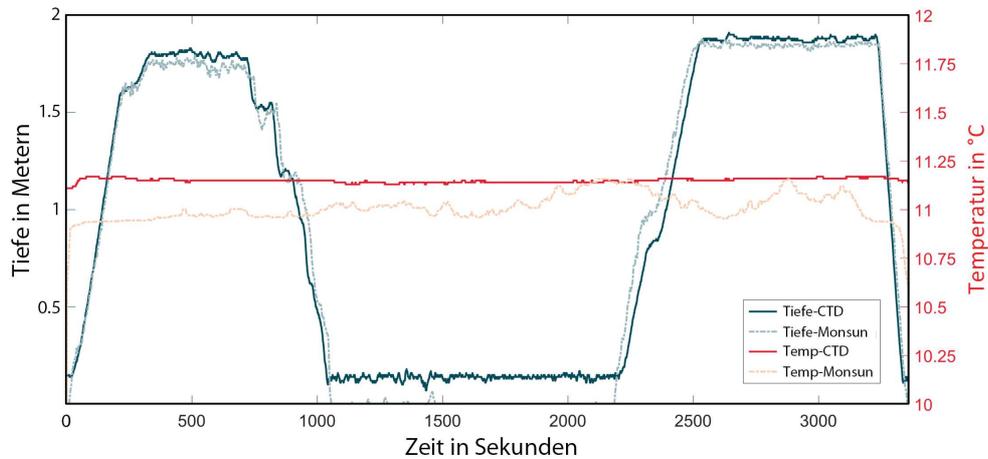
können missionsspezifische Daten zur Navigation und Organisation zwischen den Schwarmmitgliedern zur Laufzeit ausgetauscht werden und zum Erfolg der Mission beitragen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der akustischen Kommunikation ist die Möglichkeit, mithilfe einer Laufzeitmessung der ausgetauschten Signale den Abstand zwischen den Kommunikationsteilnehmern zu bestimmen. Hierfür wird eine genaue Zeitmessung innerhalb der Modems und ein Kenntnis der Schallgeschwindigkeit des Wassers benötigt. Die gemessenen Abstände liefern anschließend eine zur Lokalisation essentielle Größe, um eine Positionsbestimmung durch Ausnutzung von Schwarmalgorithmen zu erlangen, ohne extra dafür entwickelte Sensoren verwenden zu müssen. In vorherigen Versuchen wurde bereits gezeigt, dass die Distanzmessung zweier Modems im Stillstand für die Lokalisation ausreichend genau ist (vgl. Abbildung 5.9). In einem weiteren Versuch wurde nun untersucht, wie sich die Distanzmessung bei einem sich bewegenden Roboter verhält. Hierbei



**Abbildung 5.11.:** Evaluationsergebnisse der Distanzmessung mehrerer Roboter, bei denen sich ein Monsun zwischen zwei anderen bewegte. Auf der linken Seite ist das Testgebiet und die Positionierung der Roboter von oben dargestellt. Die Roboter Nr.1 und Nr.2 waren fest an zwei Stegen positioniert, während der Roboter Nr.3 verschiedenste Pfade zwischen diesen Robotern fuhr. Die zufälligen Pfade sind mit schwarz in der Grafik hinterlegt. Die Plots auf der rechten Seite illustrieren die gemessenen Abstände zwischen den Robotern, parallel gemessen mithilfe von GPS und Laufzeitmessungen der Akustikmodems. Die akustische Kommunikation lieferte die Abstände mit einer Genauigkeit von 2.9 m, welches sehr nahe an der allgemeinen GPS Genauigkeit der verwendeten XSens Sensoren liegt. Der gelbe Strich in den Daten repräsentiert den Zeitpunkt, an dem sich der Roboter Nr.3 an der gelb markierten Position in der Karte links befand, welches den Zeitpunkt der maximalen Abstände zwischen den Robotern markiert.

treten nämlich Effekte wie Störgeräusche der Motoren und Wasserströmungen um die Motoren auf, welche sich negativ auf die Empfangsqualität der Modems auswirken können. Die Abbildung 5.11 illustriert das durchgeführte Experiment in einem flachen natürlichen Gewässer aus dem Sommer 2018. Zwei Monsun AUVs befanden sich an festen Punkten mit einem Abstand von 27 m in einem Hafengebiet, während sich ein dritter Roboter auf unterschiedliche Weise zwischen diesen beiden festen Punkten an der Oberfläche bewegte. Als Referenz wurde die GPS Lokalisation des XSens Sensors verwendet, welche in stehendem Zustand eine Genauigkeit von 2.5 m aufweist. In einem Zeitraum von 25 min fuhr Monsun Nr.3 nun verschiedenste Punkte in dem Einsatzgebiet an. Dabei fuhr er unter anderem auch in die direkte Nachbarschaft der anderen beiden Roboter und an einen Punkt, welcher in 30 m Abstand gleichmäßig von beiden Robotern entfernt lag. Um eine Grundwahrheit für dieses Experiment zu haben, wurde die Oberflächenfahrt gewählt, obwohl diese aufgrund des bereits erwähnten Lloyd's Mirror Effekts am fehlerbehafteten ist. Die Abbildung 5.11 zeigt auf der rechten Seite jeweils die gemessenen Abstände zwischen den beteiligten Robotern, wobei diese gleichzeitig mithilfe von GPS und den Akustikmodems gewonnen wurden. Über die gesamte Dauer wurde in diesem Experiment eine Genauigkeit von 2.9 m erreicht, was sehr dicht an der GPS Genauigkeit des XSens Sensors liegt. Die Kommunikation zwischen allen Robotern konnte bis auf einen zweiminütigen Aussetzer bei den Robotern Nr.1 und Nr.3 während des gesamten Experiments aufrecht erhalten werden. Es ist deutlich ersichtlich, dass eine Abstandsbestimmung mithilfe der Akustikmodems möglich ist, und die Genauigkeit für eine Positionierung im Schwarm unter Wasser ausreicht.



**Abbildung 5.12.:** Ergebnisse der Vergleichsmessung der Umweltsensorik des Roboters Monsun . Die Messungen wurden im Oktober 2015 im Fischereihafen von Sassnitz an der Ostsee aufgenommen. Der Roboter wurde mit dem eigenen entwickelten Umweltmodul und der professionellen CTD48 Sonde ausgerüstet. Damit wurden verschiedene Navigationsfahrten im Hafengebiet durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sonden unter realistischen Bedingungen Ergebnisse liefern. Die Temperaturwerte wiesen im Durchschnitt nur eine mittlere Differenz von  $0.1345\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf. Die Daten der Leitfähigkeit wurden hier nicht ausgewertet, da die Sonde im selbst entwickelten Modul nur einen konstanten Wert lieferte [MRM16].

## 5.7. Küstennaher Einsatz

Die bisher präsentierten Experimente und deren Ergebnisse konnten die grundsätzliche Einsatzbereitschaft des Monsun AUVs anhand der durchgeführten Messreihen deutlich zeigen. Der Roboter ist in einem Zustand, der eine geregelte autonome Fahrt ermöglicht. Gleichzeitig erlaubt die Modularität und Flexibilität eine Vielzahl von möglichen Einsatzszenarien im Bereich des Umweltmonitorings. Die Akustikmodems sind komplett integriert und die verwendeten Protokolle erlauben eine Kommunikation im Schwarm, wenn für eine Aufgabe mehrere Roboter benötigt werden.

### 5.7.1. Vergleichsmessungen Umweltsensorik

Im Folgenden werden nun weitere Einsätze des Roboters beschrieben, welche über den Charakter von Funktionstests hinausgehen. Die Roboter sind in einem einsatzbereiten Zustand und wurden in der vergangenen Zeit schon unter realistischen Bedingungen für küstennahe Einsätze verwendet. In der Vorbereitungsphase der Expedition Uhrwerk Ozean wurden daher im Oktober 2015 vor der Küste und im Hafengebiet von Sassnitz mehrere Messfahrten mit verschiedenen Modulen der Umweltsensorik unternommen. Neben der Sea&Sun CTD48 Multiparametersonde

wurde gleichzeitig auch das selbst entwickelte Environmental Monitoring Modul (siehe Kapitel 4.5.6) eingesetzt. Die Testfahrten dienten zur Verifizierung der Einsatzbereitschaft des Roboters und sollten weiterhin Aufschluss darüber geben, welche Sensorik für die angedachten Aufgaben am besten geeignet ist. Die Abbildung 5.12 illustriert einen Ausschnitt der aufgenommenen Daten während eines Testlaufs im Fischereihafen von Sassnitz. Dabei wurden mehrere Korridore im Hafengebiet mit der Hilfe von GPS Positionen angefahren, um Umweltdaten an der Wasseroberfläche und in einer Tiefe von bis zu 2 m zu messen. Die Daten zeigen deutlich die Fähigkeit des Roboters, die geforderte Tiefe autonom zu halten. Der Vergleich der Daten des Drucksensors des Roboters und der CTD Sonde liefert einen durchschnittlichen Unterschied von 9.979 cm, welcher durch die Positionierung der beiden Sensoren am Roboter zu erklären ist. Während der Drucksensor von Monsun am hinteren Teil des Rumpfes angebracht ist, befindet sich die CTD48 Sonde unterhalb des Roboters angebracht am Geräteträger in einem Abstand von 10 cm. Dieses ist deutlich in der Mitte der abgetragenen Messdaten zu erkennen, da sich der Roboter zu dieser Zeit an der Wasseroberfläche befand, die CTD Sonde aber weiterhin eine Tiefe von 10 cm gemessen hat.

Die gemessenen Temperaturwerte der beiden unterschiedlichen Sensoren weisen über die Gesamtdauer der Messungen einen durchschnittlichen Unterschied von 0.1345 °C auf. Insbesondere die CTD48 Sonde besitzt einen sehr genauen Temperatursensor mit einer Genauigkeit von 0.02 °C, welches an den gleichförmig abgetragenen Messdaten deutlich wird. Der analoge Temperatursensor des Environmental Monitoring Kit hat diese Genauigkeit nicht, liefert die Temperatur aber ausreichend genau, um eventuelle Schichtungen unter Wasser messen zu können. Weiterhin ist das Modul vollständig in den Roboter integriert und die Messdaten können zur Laufzeit des Systems beobachtet werden, welches mit der autark betriebenen CTD48 Sonde nicht möglich ist.

Die Messungen in Sassnitz belegten die Eignung beider eingesetzten Systeme nach den europäischen Standards für die Genauigkeit der Datenerfassung für das Umweltmonitoring, zeigten aber auch deutliche Unterschiede. Ist es für den Einsatz wichtig, direkt während der Laufzeit des Systems auf die Messdaten zuzugreifen, um eventuell wichtige Positionen unter Wasser anhand von Sensordaten zu finden, so ist es von Vorteil, das selbst entwickelte Environmental Monitoring Modul zu verwenden. Legt man allerdings einen hohen Wert auf die Genauigkeit der Messdaten und benötigt keine Live-Auswertung, dann sollte immer die CTD48 Multiparametersonde verwendet werden. Sie ist nicht nur genauer in den Messungen, sondern liefert die Messdaten auch in einer 10-fach höheren Datenrate von 100 Hz. Allerdings ist der Aufwand nach der Mission höher, die Messdaten der Sonde mit denen des Roboters zu kombinieren [MRM16].

### 5.7.2. Kooperierendes Schwarmverhalten für Umweltmonitoring

Das Konzept des Monsun Roboters erlaubt neben den bereits gezeigten Funktionalitäten einen gleichzeitigen Einsatz mehrerer Roboter, welche mithilfe intelligenter Schwarmverhalten eine geforderte Aufgabe zusammen durchführen können. Hierfür ist bereits auf die verschiedenen Kommunikationsmöglichkeiten des AUVs an vielen

Stellen eingegangen worden. Im folgenden werden die Ergebnisse eines ersten kooperierenden Schwarmverhaltens gezeigt, bei denen zwei Roboter für eine Aufgabe des Umweltmonitorings eingesetzt wurden [Iso16]. Für die Kommunikation wurde ein zentralisierter Ansatz gewählt, welcher unter Berücksichtigung der geringen Bandbreite des akustischen Kanals die benötigte Nachrichtenanzahl gering hält. Gleichzeitig wird die Fähigkeit der Überwasserkommunikation über WLAN für die eigenständige Koordination und Auswahl der Roboter am Anfang der Mission genutzt. Die Mission umfasst eine Menge von GPS Punkten, an denen in-situ Messungen verschiedener Umweltparameter durchgeführt werden sollen. Für einen einzelnen Roboter entspricht die Planung dieser Mission dem in der Theoretischen Informatik bekannten Problem des Handlungsreisenden<sup>5</sup>. Dieses beschreibt das kombinatorische Optimierungsproblem, bei dem die Aufgabe daraus besteht, die Reisstrecke zwischen mehreren bekannten Punkten so zu wählen, dass die Gesamtstrecke möglichst kurz ist. Damit gehört dieses Problem zu der Menge der NP-vollständigen Probleme, welche vollständig für die Klasse der Probleme sind, die sich aber nichtdeterministisch in Polynomialzeit lösen lassen. Für mehrere Roboter gilt es in diesem Fall, die ab zufahrenden Punkte unter den Robotern so aufzuteilen, dass die Missionszeit minimal gehalten wird. Weiterhin wird die Batterieladung der Roboter als zweite Kenngröße eingeführt, um einen einseitigen Energieverbrauch der Monsuns zu verhindern, welcher sich auf Dauer ebenfalls negativ auf die Missionszeit des ganzen Schwarms auswirken würde. Dieses Optimierungsproblem kann ebenfalls einem bekannten kombinatorischen Grundproblem zugeordnet werden, dem Rucksackproblem. Da hierfür ebenfalls kein Algorithmus bekannt ist, der das Problem in Polynomialzeit lösen lässt, liefert das hier verwendete Schwarmverhalten eine Annäherung mithilfe einer Heuristik, um zu einer Lösung zu kommen.

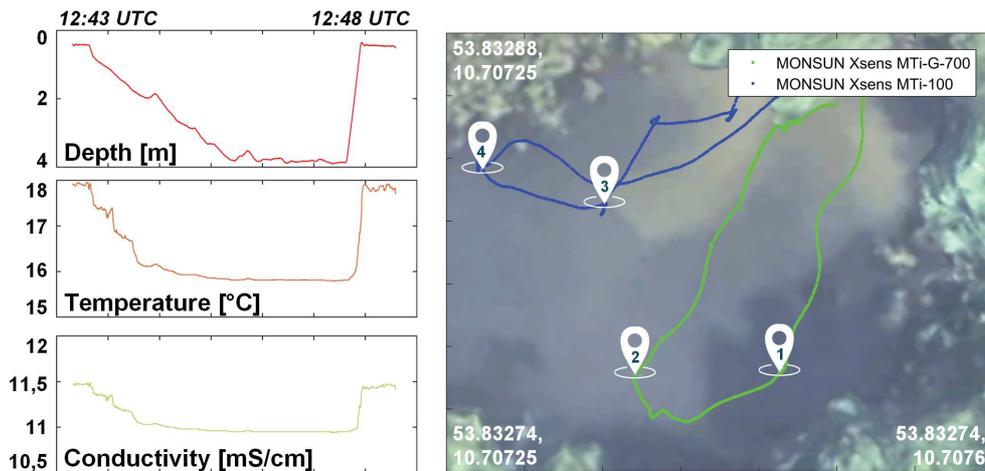
Das Verhalten beginnt mit der Wahl eines Masters, welcher die Tasks entgegennimmt und zentralisiert die Aufgaben und Informationen im Schwarm verteilt. Hierfür wurde in [Iso16] der Echo-Algorithmus von Chang gewählt [82]. Dieser funktioniert in beliebigen zusammenhängenden Topologien und ist somit auch für die akustische Kommunikation unter Wasser geeignet, bei der nicht davon auszugehen ist, dass jedes Schwarmmitglied zu jeder Zeit mit allen anderen kommunizieren kann. Anschließend wird eine Heuristik für alle Messpunkte und AUVs separat berechnet. Diese beinhaltet einen Boolean  $N$ , welcher darüber Aufschluss gibt, ob der für die Aufgabe benötigte Sensor überhaupt verbaut ist. Soll an einem Wegpunkt die Temperatur in einer gewissen Tiefe gemessen werden, kommen somit automatisch nur die Roboter in Frage, welche auch über einen Temperatursensor verfügen. Weiterhin beinhaltet die Heuristik die Distanz  $d$  in Metern zu dem Wegpunkt und die Batterieladung  $c$  aus dem Intervall  $[0, 1]$ . Formal kann die Heuristik  $H$  folgendermaßen angegeben werden:

$$H = \begin{cases} \text{undefiniert,} & \text{wenn } N = \text{False,} \\ d \cdot (1 - c), & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.7)$$

Sofern also die geforderte Nutzlast vorhanden ist, wird die Distanz zum Messpunkt mit dem Komplementärwert des Ladezustandes multipliziert. Je geringer der Endwert, desto besser ist das betrachtete AUV für die Durchführung der Mission geeignet.

---

<sup>5</sup>(engl. *Traveling Salesman Problem*, kurz *TSP*)



**Abbildung 5.13.:** Evaluationsergebnisse eines kooperierenden Schwarmverhaltens mit zwei Monsun Robotern in einem flachen Gewässer. Das Testszenario beinhaltet vier verschiedene Messpunkte, an denen in-situ Messungen verschiedener Umweltparameter durchgeführt werden sollen. Mithilfe einer Heuristik entscheiden die Roboter selbstständig, wie die vier Messpunkte untereinander aufgeteilt werden und fahren diese unabhängig voneinander ab, wodurch die Missionszeit gegenüber einem einzelnen Roboter um mehr als die Hälfte reduziert werden kann. Illustriert sind die abgefahrenen Wegstrecken der Roboter zwischen den definierten Messpunkten und auf der linken Seite die Messverläufe der Umweltparameter an einem der Punkte [IMM17].

Dieses bewirkt unter anderem, dass für weit entfernte Wegpunkte vorzugsweise die Roboter ausgewählt werden, welche über eine hohe Batterieladung verfügen. Mithilfe Clustering Verfahren und anschließender Hauptkomponentenanalyse<sup>6</sup> kann die Verteilung der anzufahrenden Punkte unter den Robotern noch vielschichtiger verteilt werden, um Situationen zu verhindern, in denen sich Roboter nicht entscheiden können, da die Heuristik einen ähnlichen Wert liefert. Dieses ist in [IMM17] genauer untersucht worden.

Die Abbildung 5.13 illustriert den Test für das beschriebene Verhalten. Es wurden vier Messpunkte auf einem lokalen Gewässer mithilfe der GPS Positionen platziert. An diesen Stellen war es gefordert, dass ein Monsun Roboter abtaucht und dort eine CTD Messung für 30 s durchführt. Die Startposition war identisch mit der Endposition und die kürzester Wegstrecke für einen einzelnen Roboter, welcher die Punkte nacheinander abfahren würde, betrug 55 m. Mit einer eingestellten Geschwindigkeit von  $0.3 \frac{m}{s}$  konnte die Strecke in  $T = \frac{55m}{0.3 \frac{m}{s}} + 4 \cdot 30s = 303s$  abgefahren werden.

Im nächsten Schritt wurden nun zwei Monsun Roboter verwendet, um die Wegpunkte entsprechend abzufahren und die Messungen durchzuführen. Nach einer Absprache an der Wasseroberfläche mittels des beschriebenen Protokolls wurden die Wegpunkte unter den beiden Robotern gleichmäßig aufgeteilt. Der erste Roboter fuhr nacheinander zu den Messpunkten 1 und 2 und legte insgesamt dafür eine Wegstrecke von 31.4 m bis zum gemeinsamen Start- und Endpunkt zurück. Der

<sup>6</sup>(engl. Principal Component Analysis, kurz PCA)

zweite Roboter fuhr die anderen beiden Wegpunkte an und legte dabei eine Strecke von 34.6 m zurück. Nach 173 s waren beide Roboter am Startpunkt angekommen und hatten die Messungen vollzogen. Damit konnte eine Zeitersparnis von 57 % gegenüber dem einzelnen Roboter zuvor gewonnen werden und das kombinierende Schwarmverhalten wurde erfolgreich durchgeführt [IMM17].

## 5.8. Einsatz auf offenem Meer

In den bisherigen Tests und Untersuchungen haben die Monsun Roboter ihre Flexibilität und Einsatzbereitschaft unter Beweis gestellt und konnten aufgrund ihrer Modularität auf unterschiedlichste Weise eingesetzt werden. Für die Expedition Uhrwerk Ozean (siehe Kapitel 3.4) wurde allerdings ein Einsatzszenario angedacht, welches beim Entwurf des Roboters nicht an erster Stelle der Prioritäten stand: der Einsatz auf offenem Meer. Hierfür wurde der Roboter mit dem Ozean-Kit ausgestattet und rundherum verstärkt, um ohne Beschädigungen von Booten aus eingesetzt zu werden. Gleichzeitig mussten auch die steuernden Personen den Umgang mit Monsun AUVs von einem fahrenden Schiff aus lernen, um sicherzustellen, dass kein Roboter verloren geht und wichtige Daten für die jahrelang geplante Expedition gewonnen werden konnten.

Während des zehntägigen Einsatzes auf der Ostsee südlich der Insel Bornholm wurden mehrere Tests und Fahrten mit den Robotern durchgeführt. Aufgrund der Wetterlage und der aufwendigen Vor- und Nachbearbeitung der Messungen wurden in der Zeit insgesamt drei Messfahrten mit der Beteiligung von Monsun AUVs unternommen. Der Ablauf der Experimente und die dabei gewonnenen Ergebnisse werden nachfolgend ausführlich beschrieben.

### 5.8.1. Ablauf der Experimente

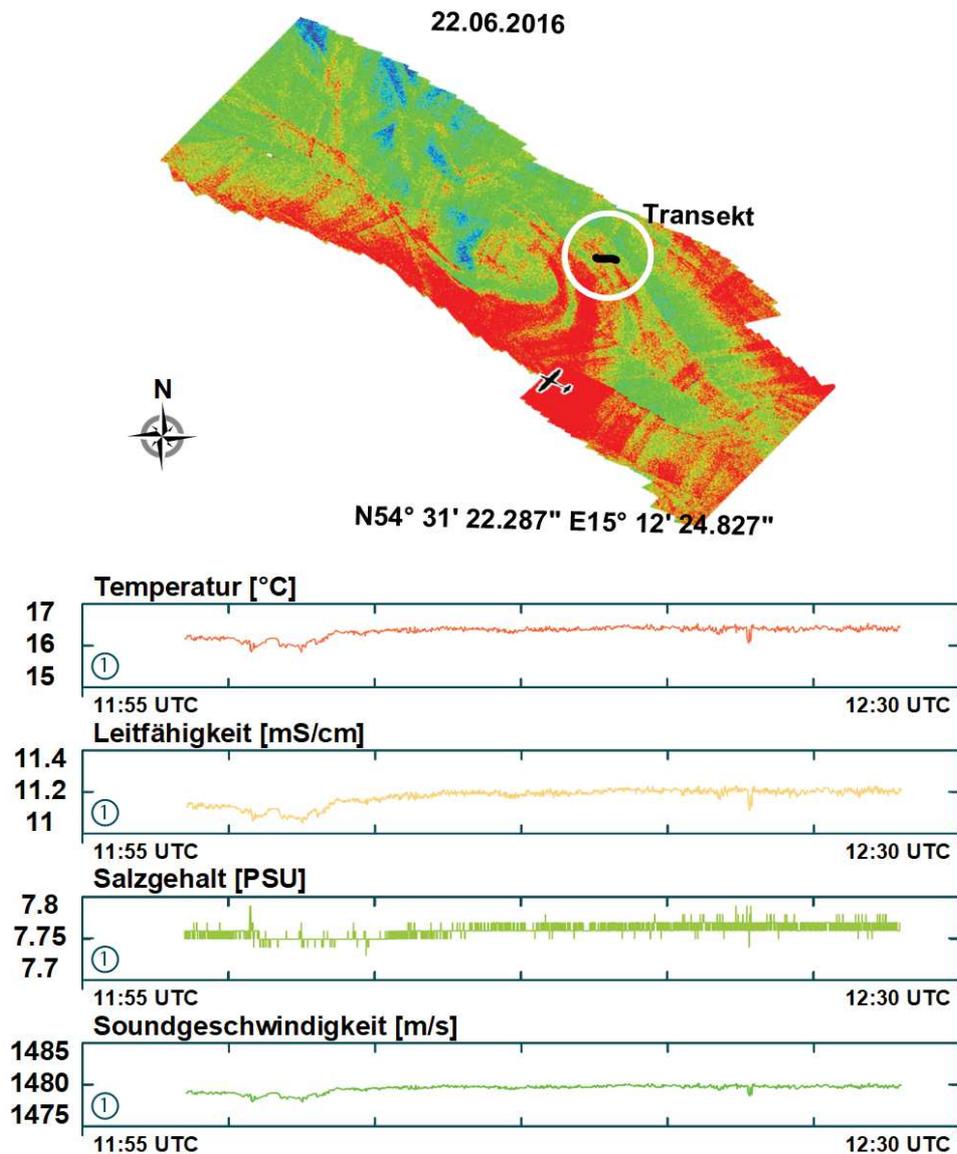
Das primäre Ziel der Expedition war die Detektion submesoskaler Wirbel und Strukturen aus der Luft, um diese dann vor Ort mit den verschiedensten Messverfahren vermessen und erforschen zu können. Nachdem die ersten georeferenzierten Infrarotbilder interessanter Strukturen vom Zeppelin oder dem Motorsegler an alle Beteiligten verteilt wurden, konnte auch das Einsatzboot der Monsun Roboter in das Zentrum der Anomalie gelenkt werden. Dort wurde eine grafische Benutzungsschnittstelle verwendet, um die Missionen der Roboter zu planen, in dem an zufahrende Wegpunkte und Missionsdauer der Umgebung angepasst wurden. Diese Aufgabe wurde durch die Möglichkeit vereinfacht, dass die topografische Karte des Einsatzgebietes direkt mit den Infrarotbildern des Zeppelins verbunden werden konnte. Basierend auf den Temperaturgradienten und der Bewegungsrichtung der gefundenen Struktur, wurden die Wegpunkte so gewählt, dass die Roboter mit der Strömung möglichst einen Transekt durch das Zentrum der Struktur fahren sollten. Nachdem der erste Roboter vom Boot ausgesetzt wurde, navigierte dieser mithilfe der GPS-Navigation zu den vorgegebenen Wegpunkten. Dabei wurde die CTD48 Messsonde verwendet, um die benötigten ozeanografischen Daten der gefunden

Struktur zu messen. Allerdings sind die Oberflächendaten weniger gehaltvoll, da sie bereits aus den Infrarotdaten des Zeppelins gewonnen werden konnten. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Monsun Roboter eingesetzt, welcher dem an der Wasseroberfläche fahrenden Roboter in getauchtem Zustand folgen sollte. Submesoskale Wirbel besitzen eine einzigartige Dynamik und die Eigenschaften unter Wasser sind für die Erforschung dieser Phänomene besonders wichtig. Daher stellen die Daten eines getauchten Monsun Roboters einen Mehrwert für die Expedition dar. Um einen größeren Teil der Wassersäule vermessen zu können, wurde der folgende Roboter so konfiguriert, dass er dem Oberflächenroboter in einem Sägezahnprofil folgte. Dies wurde durch ein periodischen Auf- und Abtauchen bis zu der angegebenen Maximaltiefe erreicht. So konnte ein komplettes Messprofil unter Wasser für den abgefahrenen Transekt durch die gefundene Struktur gewonnen werden.

Die Herausforderung bei diesem Ansatz war das Folgeverhalten des getauchten Roboters, da dieser keine GPS-Navigation verwenden konnte. Außerdem konnte eine Trägheitsnavigation nicht durchgeführt werden, da keinerlei Informationen über die Strömungen und Geschwindigkeiten über Grund vorhanden waren, was in einem Drift weg vom angedachten Transekt resultiert wäre. Daher wurde die akustische Kommunikation zwischen den Robotern verwendet, um dem folgenden Roboter aktuelle Befehle und Richtungsanweisungen zu übermitteln, wodurch ein großer Drift minimiert werden konnte. Weiterhin wurde das Verhalten so programmiert, dass der folgende Monsun periodisch an die Wasseroberfläche zurückkehrte, dort eine GPS Ortung durchführen konnte und seinen Positionsfehler korrigieren konnte. Als Folge aus diesem Verhalten war es der steuernden Person an Bord des Schiffes zu jeder Zeit möglich, den Kontakt zu den Robotern zu halten, was bei submesoskalen Wirbeln einen weiteren Vorteil hatte. Diese Wirbel haben die Eigenschaft, ohne Vorankündigung ihre Bewegungsrichtung über Grund zu verändern, wodurch ein vormals geplanter Transekt eventuell nicht mehr durch einen wichtigen Sektor führt. Die Monsun Roboter erlaubten daher eine Veränderung der Bewegungsrichtung zur Laufzeit der Mission, sofern dieses nötig war. Eine Eigenschaft, die die ebenfalls eingesetzten Unterwassergleiter leider nicht hatten. Sobald diese abgetaucht waren, war für eine Dauer von 30 min keine Kommunikation mit den Geräten mehr möglich.

### 5.8.2. Messergebnisse

Am ersten Messtag mit Beteiligung der Monsun Roboter konnte ein großer Spiralwirbel 60 km südlich von Bornholm von den Luftfahrzeugen ausgemacht werden. Der Wirbel hatte einen Durchmesser von mehr als 3 km, wodurch ein Transekt durch diesen mit den Robotern und ihrer maximalen Geschwindigkeit von 1.5 kn nicht möglich war. Um die Einsatzbereitschaft und Nutzbarkeit des Systems zu testen, wurde ein Transekt durch einen einzelnen Wirbelarm der gefundenen Struktur geplant. Weiterhin wurde am ersten Messtag nur ein Monsun Roboter eingesetzt, um der Gefahr des Verlusts oder der Beschädigung eines AUVs aufgrund Unerfahrenheit aus dem Weg zu gehen. Der Roboter wurde daraufhin am Rande der Struktur ausgesetzt und konnte gegen die Strömung mit einer Geschwindigkeit von 0.4 kn eine Strecke von 360 m an der Oberfläche abfahren. Die Abbildung 5.14 illustriert die abgefahrte Strecke als hervorgehobenen Transekt in dem Infrarotbild des gut zu

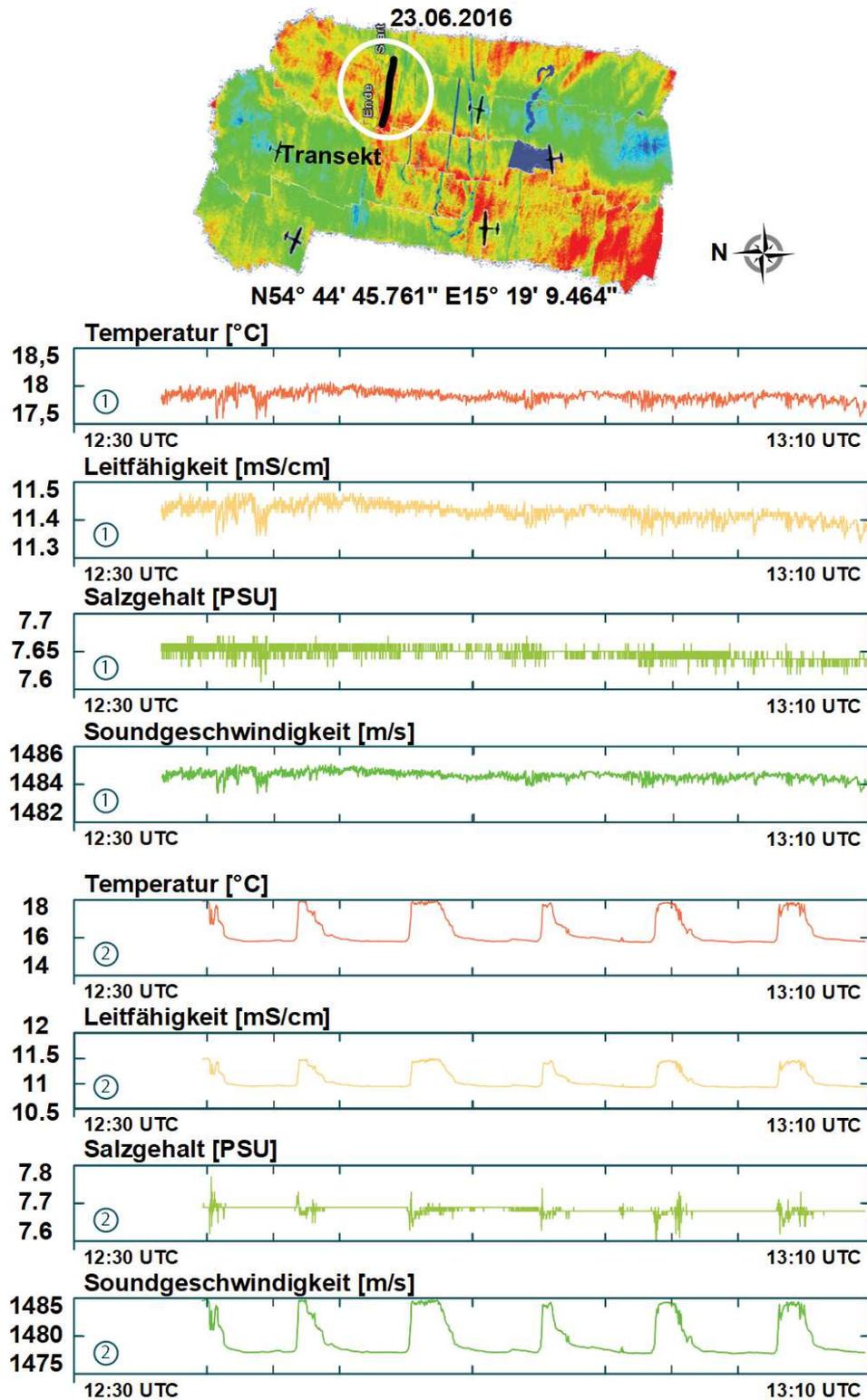


**Abbildung 5.14.:** Messergebnisse des ersten Messtages der Expedition Uhrwerk Ozean. Auf dem Infrarotbild oben deutlich zu erkennen ist der 60 km südlich von Bornholm gefundene Spiralwirbel mit einem Durchmesser von mehr als 3 km. Die Farben ergeben sich aus dem gemessenen Temperaturspektrum und visualisieren die gemessenen Unterschiede an der Wasseroberfläche. Die wärmste Temperatur bekam die Farbe rot und davon wurde nach unten hin das Spektrum erweitert. Im Bild gekennzeichnet ist der zurückgelegte Weg eines Monsun Roboters in der Struktur. Mit einer Geschwindigkeit von 0.4 kn konnte eine Strecke von 360 m an der Oberfläche abgefahren werden. Die ebenfalls abgebildeten Messwerte der CTD Sonde zeigen eine Fluktuation der Werte beim Hineinfahren in den warmen Wirbelarm, wodurch die Einsatzbereitschaft und Nutzbarkeit des Systems bewiesen werden konnte. Die abgetragenen Werte wurden alle mithilfe der CTD Sonde gemessen, welche intern auch ebenfalls die Soundgeschwindigkeit berechnet.

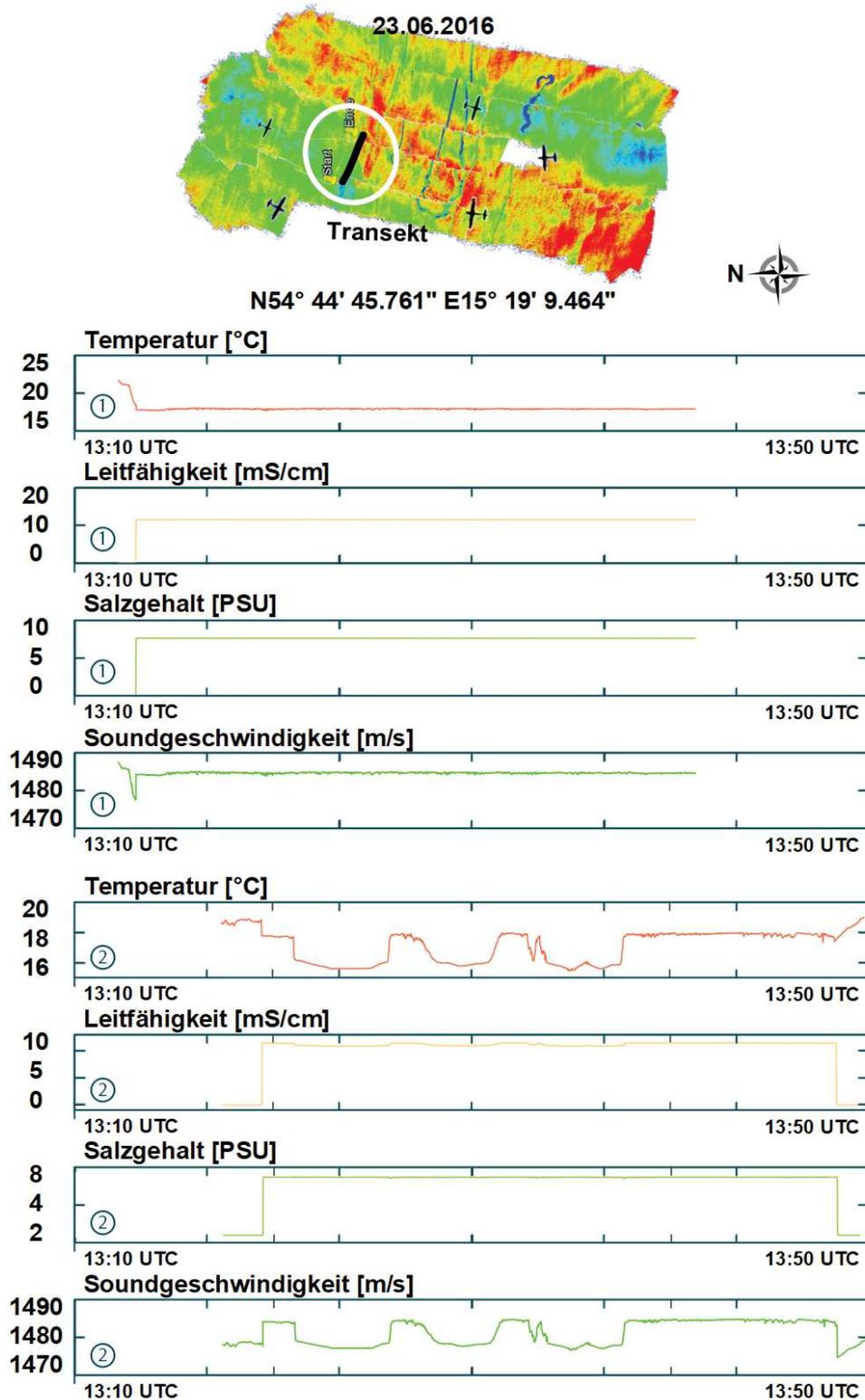
erkennenden Wirbels. Weiterhin zeigen die ebenfalls abgebildeten Datenverläufe der verwendeten CTD48 Messsonde Fluktuationen der Wasserwerte bei der Einfahrt in den Wirbelarm. Dieses zeigte die Nutzbarkeit des Systems bei der Sammlung von relevanten Daten. Der erste Messtag konnte also als Erfolg verbucht werden. Die gesammelten Erfahrungen im Umgang mit dem Roboter auf offener See und dem Zusammenspiel aller Komponenten bildeten die Grundlage für die weiter folgenden Tests.

Der zweite Messtag wurde bereits am darauffolgenden Tag nur 37 km südöstlich der Insel Bornholm durchgeführt. Aus dem Flugzeug konnte ein großer Bereich mit in der Blüte befindlicher Cyanobakterien ausgemacht werden, welche sich an einer deutlich zu erkennenden Temperaturfront angesiedelt hatten. Spätere Untersuchungen ergaben, dass diese Temperaturfront ein auslaufender Wirbelarm des großen Wirbels war, welcher am Tag zuvor untersucht worden war. Die Erfahrungen des Vortages führten zu einer anderen Herangehensweise beim Planen der Wegpunkte durch die zu vermessende Struktur. Vor Ort wurde vermehrt auf die Wasserströmungen geachtet, um vorzugsweise mit der Oberflächenströmung durch die Struktur fahren zu können. Weiterhin wurden am zweiten Messtag zwei Roboter in das Einsatzgebiet gebracht, um das erste Mal auch Messungen unterhalb der Wasseroberfläche in dem bereits beschriebenen Sägezahnprofil durchführen zu können. Die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen die Daten, welche an diesem Tag aufgenommen werden konnten. Die aufgetretene Struktur war durch die Algenblüte an diesem Tag mit bloßem Auge zu erkennen und erleichterte die Orientierung auf der sonst merkmalsarmen Wasseroberfläche. Da es sich um keinen submesoskalen Wirbel handelte, wurden Streckenprofile senkrecht zur vom Zeppelin aus ausgemachten Temperaturfront durchgeführt. Die Front selber bewegte sich während der mehrstündigen Tests Richtung Westen, wodurch die Roboter nach dem ersten Transekt wieder an Board geholt wurden, um einige hundert Meter weiter an einer zu dem Zeitpunkt günstigeren Stelle eingesetzt zu werden. Zusammen konnten beide Monsun Roboter eine Strecke von 1896 m mit einer Geschwindigkeit von 1.5 kn durch die Front zurücklegen. Dabei folgte der zweite Roboter dem an der Oberfläche befindlichem in einem Abstand von maximal 10 m, während er in einem Sägezahnprofil bis zu einer jeweiligen Tiefe von 5 m tauchte. Das Profil ist deutlich in den Daten der CTD Sonde zu erkennen, welche in den Abbildungen illustriert sind. Die Daten zeigen weiterhin, dass die Temperaturfront nicht nur an der Wasseroberfläche mit den schwimmenden Cyanobakterien zu erkennen ist, sondern dass diese auch in der einer Tiefe von 5 m messbar ist. Ob die erhöhte Temperatur zusammen mit den Effekten des Wirbels vom Vortag zu der erhöhten Algenblüte geführt haben, kann noch nicht genau gesagt werden. Allerdings ist es sehr wahrscheinlich, dass der Wirbel sauerstoffreiches Wasser aus der Tiefe an der Oberfläche gespült hat, welches das Algenwachstum positiv beeinflussen kann.

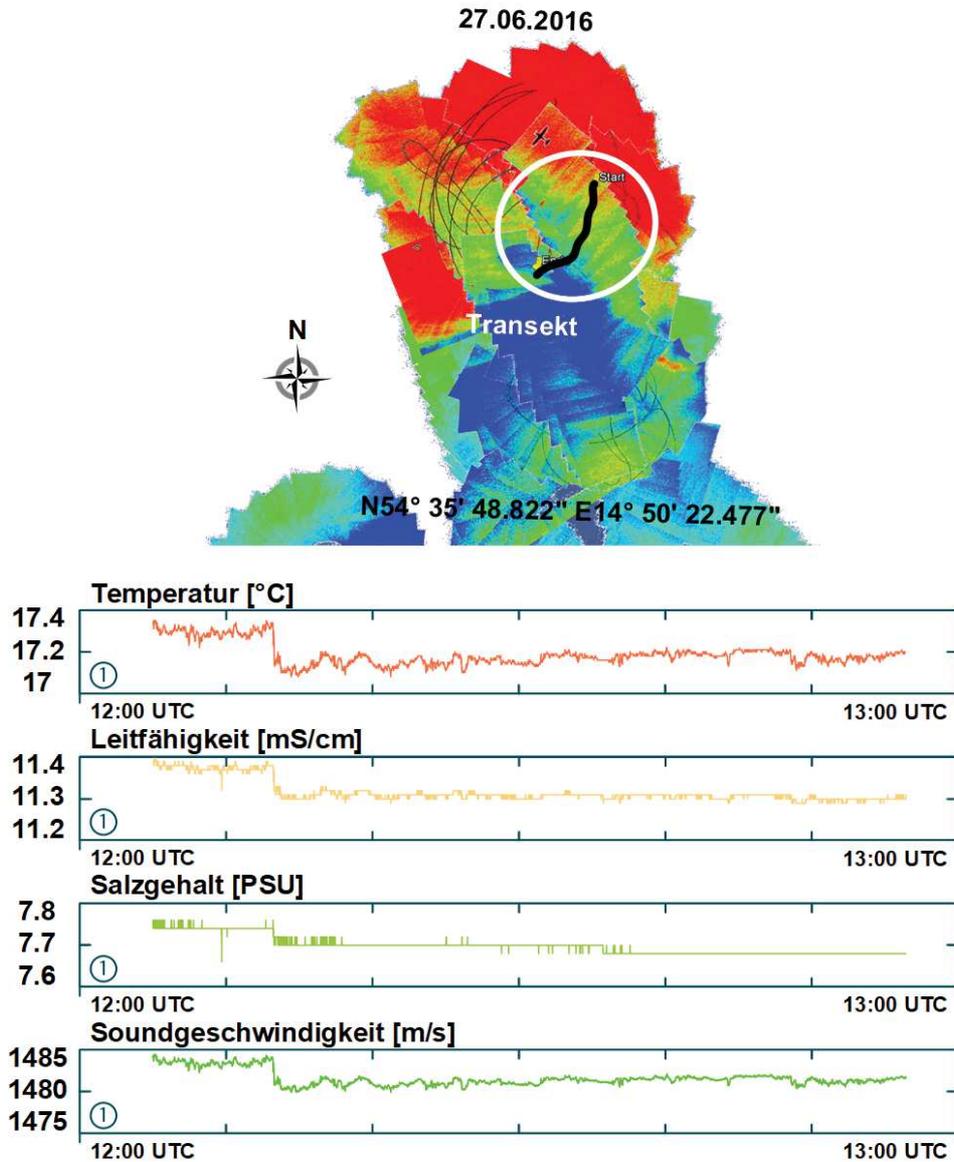
Der dritte und letzte Messtag der Expedition Uhrwerk Ozean fand aufgrund schlechterer Wetterbedingungen erst vier Tage nach den erfolgreichen ersten Messtagen statt. Allerdings konnte dann eine ganz besondere Situation beobachtet



**Abbildung 5.15.:** Messergebnisse des zweiten Messtages für den ersten Transekt durch eine Front 37 km südöstlich von Bornholm. Unterhalb des Infrarotbildes sind die jeweils vier Datenverläufe der beiden eingesetzten Roboter zu sehen. Auf den unteren vier wird das Sägezahnprofil des folgenden Roboters besonders deutlich.



**Abbildung 5.16.:** Messergebnisse des zweiten Messtages für den zweiten Transekt durch die Front. Ebenfalls abgebildet sind die Datenverläufe der gemessenen Umweltdaten. Zusammen konnten beide Roboter eine Strecke von 1896 m mit einer Geschwindigkeit von 1.5 kn durch die Front zurücklegen und wichtige Daten sammeln.



**Abbildung 5.17.:** Messergebnisse des dritten Messtages der Expedition Uhrwerk Ozean. 55 km südlich von Borholm konnte über 12 h hinweg der Lebenszyklus eines kleinen Spiralwirbels von der Entstehung bis zum Zerfall beobachtet werden. Die eingesetzten Roboter fuhren Messfahrten durch das Zentrum des Wirbels und legten gemeinsam eine Strecke von 896 m mit einer Geschwindigkeit von 1.1 kn zurück. Der starke Abfall der gemessenen CTD Werte zeigt deutlich die Durchquerung der unterschiedlichen Wassermassen, welche sich um das Zentrum des Unterwasserwirbels drehen. Das Infrarotbild zeigt den Wirbel zum Zeitpunkt, als die Roboter am Ende ihres Transekts angekommen waren. Der Wirbel selbst wanderte während der Messung nach Süden und mit ihm der wärmere Temperaturbereich. Daher ist die Sprungschicht schon am Anfang der Messdaten zu sehen.

werden. 55 km südlich der Insel Bornholm konnte mit Hilfe des Zeppelins die plötzliche Entstehung eines kleinen Spiralwirbels ausgemacht werden. Während der folgenden 12 h konnte so weltweit erstmals der Lebenszyklus eines submesoskalen Wirbels von der Geburt bis zum Zerfall aufgenommen und untersucht werden. Aufgrund des geringen Durchmessers von nur knapp 1.5 km wurden die Monsun Roboter um das Zentrum des Wirbels platziert und sollten eine Messspur aus dem Wirbelzentrum nach außen hin durchführen. Die Abbildung 5.17 illustriert das Zentrum des Wirbels in einem Infrarotbild, die durchgeführte Messfahrt und die aufgenommenen CTD Daten. Die Monsun AUVs konnten gemeinsam eine Strecke von 896 m mit einer Geschwindigkeit von 1.1 kn zurück legen. Der in den Messdaten deutlich zu sehende Abfall der Sensorwerte kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem die Roboter die Front des Wirbelzentrums nach außen hin durchbrachen. Im Infrarotbild befindet sich dieser Punkt beim Übergang von den grünen und den blauen Bereich. Die Daten des zweiten hinterherfahrenden Roboters lassen die Sprungschicht aufgrund der Sägezahnkurve nicht einfach erkennen, wodurch auf die Abbildung dieser Daten verzichtet wurde. Zusammengefasst wurden allerdings erstmalig mit dem Robotersystem Monsun Messdaten eines submesoskalen Wirbels aufgenommen, welches einen Höhepunkt des Projektes bis zu diesem Zeitpunkt darstellt.



# 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Ich denke niemals an die Zukunft. Sie kommt  
früh genug.

//

--- Albert Einstein

Alles was einen Anfang hat, hat auch ein Ende. Diese Arbeit lieferte eine detaillierte Übersicht über die Entwicklung des schwarmfähigen Unterwasserroboters Monsun im Kontext seiner Anwendungsmöglichkeiten für das Umweltmonitoring. Hierfür wurde anfänglich eine Literaturstudie durchgeführt, die die Anfänge der autonomen Unterwasserfahrzeuge bis hin zu heutigen multinationalen Projekten zusammenfasste. Die europäischen Vorzeigeprojekte *GREX* und *MORPH* konnten den ersten Eindruck schaffen, zu welchen komplexen Aufgaben autonome Unterwasserfahrzeuge eingesetzt in einem Schwarm fähig sind und welches ein großes Potential in ihnen steckt. Einige der heutzutage am weitesten verbreiteten Unterwasserroboter wurden anschließend näher erläutert, um die Unterschiede zu Monsun herauszuarbeiten und die Einzigartigkeit des Systems zu verdeutlichen.

Als aktuelles Hauptanwendungsgebiet für das Monsun AUV wurde der Forschungsbereich des Umweltmonitorings, in diesem besonderem Fall das Gewässermonitoring, detailliert beschrieben. Darunter fällt auch, warum die Notwendigkeit in den Zeiten des Klimawandels immer weiter ansteigt und wie die aktuellen Beobachtungsverfahren aussehen. Deutlich wurde, dass das angestrebte Ausmaß des Gewässermonitorings mit konventionellen Methoden niemals durchzuführen ist und in diesem Bereich ein hoher Bedarf an einer Automatisierung besteht. Nach der Analyse der zu vermessenden Parameter und weiteren Suchkriterien wurden autonome Unterwasserfahrzeuge als Hilfsmittel des Gewässermonitorings deklariert, mit deren Hilfe die angestrebten Ziele erreicht werden könnten.

Den Hauptteil der Arbeit bildet die Beschreibung der Entwicklung des Roboters Monsun. Der Designprozess erstreckte sich über drei Phasen und die verwirklichten Konzepte und Ideen wurden ausführlich skizziert. Jedes Teil des am Institut für Technische Informatik entworfenen AUVs wurde detailliert beschrieben, bis sich aus den Einzelteilen ein überaus modularer und flexibler Unterwasserroboter zusammensetzen ließ. Kernelement des Roboters ist seine Anpassungsfähigkeit an verschiedenste Einflüsse und Missionen. Durch das Erweiterungspaket kann der Roboter für viele anstehende Aufgaben des Umweltmonitorings angepasst werden und ohne großen Aufwand neue Sensorik und Aktorik aufnehmen. Eine weitere Besonderheit des Roboters ist seine Fähigkeit im Schwarm von mehreren Robotern zu agieren. Hierfür wurde die im Unterwasserbereich vorzugsweise eingesetzte Unterwasserkommunikation beschrieben und auf die Eigenheiten dieser Kommunikationsart hingewiesen.

Nach der Vorstellung des Roboters und seiner Eigenschaften wurde eine Evaluation der möglichen Verhaltensweisen und der autonomen Steuerung durchgeführt. Die Auswertung machte die Einsatzbereitschaft des Roboters deutlich und stellte die Ergebnisse verschiedenster Testfahrten nacheinander dar. Dabei wurden die grundlegenden autonomen Verhalten für die Fahrt unter Wasser nacheinander bewertet, bevor auf komplexere Versuche hingearbeitet wurde. Die Evaluation beinhaltet weiterhin Experimente mit mehreren Monsun AUVs, um die ersten Algorithmen aus der Schwarmrobotik auf dem Roboter auszuführen. Klar herausgearbeitet werden konnte, dass der gleichzeitige Einsatz mehrerer Roboter einen deutlichen Vorteil bei Monitoringaufgaben liefert und so beispielsweise ein Gewässer in viel kürzerer Zeit untersucht werden kann.

Als zentrale Anwendung des Monsun AUVs wird in dieser Arbeit die Teilnahme an der multinationalen Expedition Uhrwerk Ozean beschrieben. Als wissenschaftlicher Part konnte auf der mehrwöchigen Expedition die Leistungsfähigkeit des Roboters auch auf dem offenen Meer bewiesen werden und gleichzeitig wurden interessante Daten mit den Monsun AUVs aufgenommen und in dieser Arbeit beschrieben. Die Expedition unter der Führung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht stellt damit einen Meilenstein in der Entwicklung des Roboters dar und bietet eine Basis für zukunftsgerichtete Entwicklungen und Verbesserungen des Roboters.

Das Fazit der hier angefertigten Dissertation ist, dass die Entwicklung eines kleinen und kostengünstigen AUVs für den Einsatzzweck des Umweltmonitorings möglich ist. Der vorgestellte Roboter ist in der Lage, eigenständig Aufgaben durchzuführen. Er kann außerdem flexibel an angedachte Missionen angepasst und erweitert werden. Weiterhin ist es möglich, ihn im Schwarm von mehreren Einheiten fahren zu lassen, wodurch sich die Effizienz des gesamten Robotersystems erhöhen lässt. Der Monsun Roboter bildet in seiner jetzigen Konfiguration eine stabile Basis für weiterführende Entwicklungen und ist für die viele Aufgaben der Zukunft gewappnet.

Das vorgestellte AUV bietet in seiner jetzigen Ausführung eine stabile Basis für ein großes Spektrum an Anwendungen und Erweiterungen und Gespräche mit diversen Interessenten lassen immer neue Anwendungsfelder erkennen und möglich werden. Nachfolgend wird versucht, einen Blick in die Zukunft zu werfen, um

mögliche Veränderungen am Roboter zu diskutieren, um ihn als festen Bestandteil verschiedener Missionen zu etablieren.

### 6.1. Weiterentwicklung des Roboters

Die Entwicklung eines Roboters ist nie ganz abgeschlossen und kann oftmals in verschiedene Phasen unterteilt werden, in denen als Ergebnis ein Entwicklungsstand steht, der ein Teilgebiet angestrebter Aufgaben abdeckt. Dieses konnte auch schon während des Entwurfs des Roboters beobachtet werden. So standen die ersten Entwicklungsstufen klar unter dem Fokus, das Antriebskonzept festzulegen und die Mobilität des Roboters zu spezifizieren. Erst aufbauend auf diesem Grundgerüst konnten Ideen wie beispielsweise das modulare Erweiterungspaket überhaupt umgesetzt werden, womit der Roboter nach und nach auf den heutigen Stand gebracht wurde. Besonders als Entwickler sieht man aber immer zwischendurch Einzelheiten, die alternativ gestaltet werden könnten oder Verbesserungspotential bieten. So liefern auch besonders intensive Experimente wie die geschilderte Expedition Uhrwerk Ozean neben unzähligen Daten auch unersetzliche Informationen über die reale Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, die den weiteren Entwicklungsprozess stark beeinflussen.

Unterwasserroboter sind im besonderes Maße dem Verschleiß und Effekten wie Korrosion und Materialermüdung ausgesetzt. Besonders der Salzgehalt des Wassers setzt dem Material auf Dauer stark zu und fordert nach mehreren Einsätzen seinen Tribut, welcher nur durch intensive Wartung des Roboters eingegrenzt werden kann. Besonderes Augenmerk muss also auf alle Bestandteile des AUVs gelegt werden, welche in direktem Kontakt mit dem Wasser kommen. Während ein Großteil der Hülle aus glasfaserverstärktem Kunststoff den äußeren Einflüssen unbeschadet über Jahre standhalten kann, werden besonders die aus Aluminium gefertigten Bajonettinge vom Salz angegriffen. Die langsam voranschreitende Korrosion führt auf Dauer zu einer Verformung der Fassungen im Ring und auch der Dichtring muss öfter gewechselt werden. Diese Effekte führen dazu, dass nach einer langen Einsatzphase die Ringe eventuell getauscht werden müssen. Dieses tritt aber nicht zu oft auf und kann daher als unkritisch angesehen werden. Ein Weiterentwicklungspotential ist hier höchstens durch den Einsatz von hochwertigeren Materialien wie Edelstahl zu sehen, bei dem sich allerdings die Frage der gestellt werden muss, ob sich dieser Einsatz rentiert.

Größerer Bedarf der Weiterentwicklung ist eher im Bereich der Unterwassermotoren zu sehen. Nach intensivem Einsatz der Roboter konnten die Motoren als größte Schwachstelle ausgemacht werden. Um der Korrosion zu strotzen, wurden die Kugellager der bürstenlosen Motoren gegen Kunststofflager ausgetauscht. Diese haben auf Dauer den Nachteil, dass sich die Aufnahme der Welle der Motorgondel mit der Zeit ausschlägt. Sobald die Motorgondel nicht mehr zentrisch im Motor läuft, wird die Bewegung des Propellers mit der Zeit unrund und führt schlussendlich zu einem Versagen des ganzen Motors, da unregelmäßige Abstände zwischen den Magneten und Spulen das Anlaufen verhindern. Defekte des Motors führen leider auch bei der Ansteuerlektronik zu weiteren Problemen. Laufen die Motoren unrund,

benötigen die Motortreiber mehr Strom, um die Bewegung aufrecht zu erhalten. Sie überhitzen auf diese Weise sehr schnell und fallen ebenfalls nach einiger Zeit aus, wodurch das ganze Antriebssystem lahmgelegt wird. Das Antriebskonzept birgt daher großes Potential für die Weiterentwicklung. Die Motoren und zugehörigen Treiber stammen noch aus den Anfängen des Projekts und sind den gestiegenen Anforderungen, hervorgerufen durch eine gestiegene Anzahl an Außeneinsätzen und Vergrößerungen des Roboters, nicht mehr gewachsen. Eine sinnvolle Verbesserung wäre in diesem Fall der Austausch der Motoren nebst Ansteuerelektronik auf eine kommerzielle Variante. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass der Preis des Roboters dadurch sehr steigen kann und die Größe von Monsun eventuell nicht ausreichend ist, um andere Motoren aufzunehmen. Die Hülle wurde für den Einsatz der gewählten bürstenlosen Motoren konzipiert. Ein Wechsel dieser könnte zu Stabilitätsproblemen in der Hülle des Roboters führen, da die Struktur aus dem Gleichgewicht geraten könnte.

Im Inneren des Roboters konnten während der Projektlaufzeit die größten Entwicklungssprünge verzeichnet werden. Durch die Modularität der Elektronik auf mehreren Leiterplatten, die wahlweise auf verschiedenen Steckplätzen der Hauptplatine platziert werden können, wurde der Verkabelungsaufwand auf ein Minimum reduziert. Die gestiegene Anzahl an Einsätzen führte aber natürlich auch hier zu einigem Verschleiß. So wird der Sitz der Elektronikboards mit der Zeit immer lockerer. Für jeden Einsatz muss der Roboter geöffnet werden, wodurch die Elektronik aus dem Rumpf gezogen und wieder hinein geschoben wird. Hier kann es nach einiger Zeit zu Problemen bei den Steckkontakten führen, hervorgerufen durch einen zu lockeren Sitz. Abhilfe kann hier sicherlich durch eine Versteifung und zusätzliche Verschraubungen geschaffen werden, wodurch alle Platinen nochmals zu überarbeiten sind. Für das Laden der verschiedenen Akkus des Roboters muss dieser ebenfalls immer geöffnet werden. Zum Schutz der Elektronik und allgemeiner Materialschonung wäre es hier sicherlich sinnvoll, einen äußeren Anschluss am Roboter zu installieren, um diesen von Außen aufladen zu können. Da allerdings Lithium-Polymer Akkus verwendet werden, müsste eventuell eine interne Ladevorrichtung vorgesehen werden, da beim Ladevorgang darauf geachtet werden muss, dass sich die Zellen nicht unregelmäßig aufladen. Die wohl beste Lösung wäre sicherlich ein eigenes Modul für die Stromversorgung im Roboter, welches auch unabhängig vom Rest des AUVs entfernt werden kann. Diese Entwicklung ist ebenfalls bei den genannten Robotern im Kapitel 2 zu sehen.

Viele der genannten Punkte dienen dem Zweck der Erhöhung der Robustheit des Roboters. Hierbei sollte nicht vergessen werden, dass Monsun als Prototyp entworfen wurde, welcher natürlich nicht für einen dauerhaften Einsatz konzipiert ist. Je mehr Belastungen auf so ein System geladen werden, desto mehr werden die Schwachpunkte deutlich. Möchte man den Roboter trotzdem einem höherem Arbeitspensum unterziehen, ist es nur natürlich, dass der Wartungsaufwand stetig steigt und irgendwann der Punkt erreicht ist, an dem die Frage steht, ob sich dieser Aufwand auf Dauer lohnt. Eine Weiterentwicklung des Systems zur Verminderung der Schwachpunkte ist sicherlich machbar, erfordert aber viel Zeit. In einem Umfeld der Forschung ist dieser Fakt hinnehmbar, wird allerdings an eine Kommerzialisierung

des Roboters gedacht, muss das Design überarbeitet werden.

Bisher wurden nur die offensichtlichen Weiterentwicklungen des Roboters im Bereich der Robustheit herausgearbeitet. Monsun liefert in seinem jetzigen Status allerdings eine stabile Basis für viele Einsätze und Anwendungen, die besonders Entwicklungen im Bereich der Verhalten möglich machen. Das proklamierte Haupteinsatzgebiet des Umweltmonitorings liefert hierfür noch einiges Potential. Ob einzeln oder im Schwarm, können weitere Verhalten implementiert werden, die sich an den Richtlinien des Gewässermonitorings orientieren. So können Einsätze erfolgen, in denen ein ausgesuchtes Gewässer periodisch und autonom untersucht wird und das Begleitpersonal nur als Aufsicht benötigt wird. Hierfür werden besonders noch Weiterentwicklungen im Bereich der Hindernisvermeidung benötigt. Auch der Informationsaustausch und die Koordination im Schwarm kann weiter herausgearbeitet werden, sodass schnell ein Mehrwert gegenüber manueller Probenentnahme deutlich wird. Diese Arbeit hat gezeigt, dass der Roboter dazu in der Lage ist und über alle benötigten Sensoren verfügt.

Durch die Flexibilität des Systems ist es unmöglich, alle Weiterentwicklungen für weitere mögliche Anwendungen zu nennen. Die Ideen hierfür kommen oftmals durch den Austausch mit Forschern und Anwendern aus anderen Bereichen, in denen erst noch das Bewusstsein für das System Monsun und generell autonome Unterwasserroboter wachsen muss, um eigene Anwendungen zu erkennen. Das Ziel kann daher nur sein, aus eigenen Erfahrungen das Fahrzeug so zu verbessern, dass hiermit ein großes Spektrum an Aufgaben möglich ist. Hierfür muss sicherlich wie oben erwähnt die Robustheit des Systems steigen, und weitere Erfahrungen in der Anwendung gesammelt werden. Die Unterwasserrobotik entwickelt sich rasant, daher war es schon immer das Ziel, den Roboter so modular und flexibel zu gestalten, um neue Erkenntnisse direkt umsetzen zu können. Die verwendeten Techniken, wie beispielsweise die akustische Unterwasserkommunikation im Schwarm, sind immer noch aktiver Bestandteil der Forschung und halten sicherlich noch viele Überraschungen parat.

## 6.2. Weitere Anwendungen

Die Flexibilität des System ermöglicht es dem Institut für Technische Informatik mit dem Roboter Monsun an verschiedenen Projekten mit externen Partnern teilzunehmen. Diese Projekte beinhalten weitere Anwendungen des Systems und ermöglichen eine weitere Evaluation der Leistungsfähigkeit, ähnlich wie sie bereits im beschriebenen Projekt Uhrwerk Ozean vollzogen wurde. So nahm Monsun u.a. einen Platz im MoSAIK Verbundprojekt<sup>1</sup> unter der Leitung der Technischen Universität Hamburg Harburg (TUHH) ein. Der vollständige Name des Projekts lautet: Mobiles Sensornetz zur autonomen und großflächigen Unterwasserortung und Identifikation von Gefahrstoffen in Häfen und Binnengewässern. Ziel ist mit Hilfe von mehreren

---

<sup>1</sup>Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Kennzeichen 13N14153

Monsun Robotern ein weiteres Werkzeug für den Katastrophenschutz im Hamburger Hafen zu erschaffen. Als zweitgrößter Containerhafen Europas bietet der Hamburger Hafen eine sehr große Wasserfläche und wird täglich von vielen unterschiedlichen Schiffen besucht. Von Zeit zu Zeit kommt es so auch zu Unfällen, bei denen Gefahrenstoffe in das Wasser eingeleitet werden. Diese Stoffe aufzuspüren, deren Quelle zu finden und die Ausbreitung zu überwachen ist bei der riesigen Hafenfläche ein schweres Unterfangen. Die Monsun AUVs wurden aufgrund ihrer einfachen Handhabbarkeit und Schwarmfähigkeit ausgewählt, um als Gruppe von mehreren Robotern bei Suche nach Gefahrstoffen zu helfen.

Für das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Sea & Sun ein eigenes Erweiterungsmodul für Monsun entwickelt, welches als Korpusmodul im Zentrum des Roboters integriert werden kann. An diesem Modul befindet sich spezielle Sensorik, welche in Echtzeit die spezifischen Parameter im Wasser misst und damit die erdachten Gefahrstoffe aufspüren kann. Weiterhin wurde an der akustischen Unterwasserkommunikation gearbeitet. Im Kapitel 4.5.7 wurde bereits von den verschiedenen verwendeten Unterwassermodems berichtet. Während auf der einen Seite das Schwarmverhalten mit den kommerziellen Modems der Firma Evologics weiter erprobt und spezifiziert wurden, wurde auf der anderen Seite die Entwicklung von dem eigenen Unterwassermodem durch die TUHH weiter voran getrieben. Für die Missionssteuerung wurde eine eigene Benutzungsschnittstelle entworfen, auf der der Hamburger Hafen grafisch dargestellt ist, wodurch man Suchgebiete definieren und an die Roboter übertragen kann.

Zur Zeit der Entstehung dieser Arbeit war das Projekt noch nicht vollständig abgeschlossen. Offene Punkte waren die Finalisierung des Schwarmverhaltens zum Absuchen eines definierten Gebietes in einer Mäander und die vollständige Integration des eigenhändig entworfenen Unterwassermodems, welches zu einer erheblichen Kostenreduktion des AUVs führen würde, und es für noch viele weitere Anwendungen interessant machen würde.

Ein weiteres aktuelles Projekt, in welchem Monsun Roboter verwendet werden, ist IHATEC Innovative Hafentechnologien - Secure Port<sup>2</sup>, das sich unter Koordination der Lübecker Hafengesellschaft mit der Sicherheit im Seehafen Lübeck befasst. Bei diesem Teilvorhaben geht es vornehmlich um autonome Überwachungs- und Wartungstechniken im Hafenbecken. Die Monsun Roboter wurden ausgewählt, um bei den Untersuchungen der Kaianlagen des Hafens Hilfe zu leisten, indem diese autonom nach Schadstellen abgesucht werden. Die Kaimauern bestehen hauptsächlich aus metallenen Spundwänden. Diese sind wellenförmig aufgebaut und werden ineinander verschachtelt senkrecht in den Boden eingebracht. Aktuell werden die Wände periodisch von Tauchern manuell auf ihre Beschaffenheit hin untersucht, wodurch nur eine punktuelle Bestandsaufnahme möglich ist. Die Gespräche mit den verantwortlichen Tauchern führten schnell zu der Erkenntnis, dass ein automatisiertes System niemals die gleichen Schlüsse und Einblicke zur Untersuchung einer Kaimauer liefern kann, wie es der menschliche Beobachter tut. Dafür wird sich auch heute noch zu sehr auf manuelle Untersuchungen und Einblicke

---

<sup>2</sup>Gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Kennzeichen 19H17008B

verlassen. Allerdings kann ein Roboter Sensoren verwenden, die dem Taucher nicht zur Verfügung stehen. Mithilfe von beispielsweise verschiedenen Sonaren können Monsun AUVs Bilder der Kaimauer unter Wasser machen, die Tauchern nicht möglich sind. Die Sonare ermöglichen es, einen großen Bereich auf einmal zu scannen und sind dabei nicht von schlechten Sichtverhältnissen beeinflussbar. Weiterhin können die Roboter auch Tauchmanöver vollziehen, die dem Menschen aufgrund der körperlichen Belastungen nicht möglich sind.

Das Projekt befindet sich noch in der ersten Phase, allerdings wurden schon einige Untersuchungen an Kaimauern durchgeführt. Hier zeichnete sich besonders die modulare Bauweise des Roboters aus, da es einfach möglich war, ein MultiBeam Sonar zu installieren, um mit diesem Aufnahmen durchzuführen. Es bleibt abzuwarten, welche weiteren Ergebnisse das Projekt liefert, aber schon jetzt wird deutlich, dass Monsun Roboter in der Lage sind, im Hafengebiet für unterschiedliche Aufgaben verwendet zu werden und dadurch einen Mehrwert liefern.

*„Ein Ende finden und den Anfang in Händen halten“* sagte einst Hanspeter Rings und mit diesem Zitat möchte ich diese Arbeit zum Abschluss bringen. Der Blick in die Zukunft lässt viele neuartige Erkenntnisse erwarten und der Roboter Monsun kann hoffentlich seinen Teil dazu beitragen.



# A

## Verzeichnisse

### Tabellenverzeichnis

3.1. Biologische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56] . . . . .	42
3.2. Allgemein physikalisch-chemische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56] . . . . .	43
3.3. Hydromorphologische Qualitätskomponenten des Gewässermonitorings [56] . . . . .	44
3.4. Allgemeine Einstufungskriterien für den Zustand von Flüssen, Seen, Übergangsgewässern und Küstengewässern [57] . . . . .	45
3.5. Gegenüberstellung wichtigster Parameter des Gewässermonitorings und der gebräuchlichsten Messverfahren . . . . .	56
4.1. Technische Kenndaten des Monsun Unterwasserroboters in seiner aktuellen Konfiguration. . . . .	91



## Abbildungsverzeichnis

2.1. Vorhersage der AUV Entwicklung . . . . .	7
2.2. Das GREX Projekt . . . . .	10
2.3. MORPH Schwarmverhalten . . . . .	12
2.4. Theorie des MORPH Folgeverhaltens . . . . .	14
2.5. SeaCat Hybrid Autonomous Underwater Vehicle . . . . .	18
2.6. Girona G500 AUV . . . . .	19
2.7. Medusa AUV . . . . .	21
2.8. Apium SwarmDiver . . . . .	23
2.9. CoCoRo Swarm Robots . . . . .	25
2.10. Serafina und Hydromea AUVs . . . . .	26
2.11. Der Unterwasserroboter HANSE . . . . .	29
2.12. Der Unterwasserroboter SMART-E . . . . .	31
2.13. SEMBIO AUVs . . . . .	33
3.1. Living Planet Index . . . . .	37
3.2. Bedrohungsarten von Süß- und Salzwasserlebewesen . . . . .	38
3.3. Veränderungen der Sauerstoffkonzentrationen . . . . .	40
3.4. Ökologischer Zustand der Flüsse und Bäche in Deutschland . . . . .	46
3.5. Expedition Uhrwerk Ozean . . . . .	50
3.6. Satellitenaufnahme der Ostsee im Juni 2016 . . . . .	51
3.7. Messzenario der Expedition Uhrwerk Ozean . . . . .	52
3.8. Sea & Sun CTD-48 Sonde . . . . .	54
3.9. Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) . . . . .	55
4.1. Konzeptionelles Design . . . . .	59
4.2. Entwicklungsstufen des Monsun AUVs . . . . .	61
4.3. Hauptbestandteile des wasserdichten Korpus . . . . .	64
4.4. Hauptkomponenten des Monsun Unterwasserroboters . . . . .	65
4.5. Elektronikkonzept . . . . .	67
4.6. Antriebsmotorik . . . . .	68
4.7. Positions- und Lagesensorik . . . . .	69
4.8. Das modulare Erweiterungspaket . . . . .	70
4.9. Optischer Distanzsensor . . . . .	72
4.10. Pan-Tilt Kameraeinheit . . . . .	73
4.11. Blob-Erkennung und Folgeverhalten . . . . .	74
4.12. Lichtschnittverfahren und Triangulation . . . . .	76

4.13. Sonarmessungen mit dem Echosounder . . . . .	78
4.14. Echosounder Module . . . . .	79
4.15. Visuelles Feedback Modul . . . . .	80
4.16. Modul zur Wasserproben Extraktion . . . . .	82
4.17. Aufbau des Environmental Monitoring Moduls . . . . .	84
4.18. Funktionsweise des Environmental Monitoring Moduls . . . . .	85
4.19. S2CM 18/34 Mini Modem . . . . .	86
4.20. Ozean-Kit für offene Gewässer . . . . .	89
4.21. Aktuelle Konfiguration des Monsun AUVs . . . . .	90
4.22. ROS-basierte Softwarearchitektur . . . . .	93
4.23. Kommunikationsebenen innerhalb des Schwarms . . . . .	95
4.24. Missionsplanungssoftware . . . . .	97
5.1. Wirkungsplan der Regelung . . . . .	102
5.2. Typen linearer Übertragungsglieder . . . . .	103
5.3. Sprungantworten des Systems . . . . .	105
5.4. Ermittlung der Strecken-Kenngrößen . . . . .	108
5.5. Evaluationsergebnisse der Tiefenregelung . . . . .	110
5.6. Evaluationsergebnisse der Kursregelung . . . . .	111
5.7. Evaluationsergebnisse des Umweltmoduls . . . . .	113
5.8. Ergebnisse der Wandverfolgung mit dem Echo-Sounder . . . . .	114
5.9. Grundfunktionalitäten des Akustikmodems . . . . .	117
5.10. Kommunikationsstrategie im Schwarm für ein Folgeverhalten . . . . .	120
5.11. Distanzmessung mehrerer Roboter . . . . .	121
5.12. Vergleichsmessung der Umweltsensorik . . . . .	122
5.13. Evaluationsergebnisse eines kooperierenden Schwarmverhaltens . . . . .	125
5.14. Messergebnisse Uhrwerk Ozean: Erster Messtag . . . . .	128
5.15. Messergebnisse Uhrwerk Ozean: Zweiter Messtag, Erster Transekt . . . . .	130
5.16. Messergebnisse Uhrwerk Ozean: Zweiter Messtag, Zweiter Transekt . . . . .	131
5.17. Messergebnisse Uhrwerk Ozean: Dritter Messtag . . . . .	132

## Betreute Abschlussarbeiten

- [Ham12] Bent Marten Hamann. *Ein autonomer Unterwasserroboter auf Basis des kommerziellen Modell-U-Boots NEPTUNE*. Bachelorarbeit, 2012.
- [Hei14] Jan Heitmann. *Integration eines ROS-basierten Steuerungssystems in den autonomen Unterwasserroboter NEPTUNE*. Bachelorarbeit, 2014.
- [Iso16] Cedric Kevin Isokeit. *Schwarmverhalten für den autonomen Unterwasserroboter MONSUN*. Masterarbeit, 2016.
- [Lin15] Malte Lindenau. *Entwicklung eines kostengünstigen Moduls zur optischen Entfernungsbestimmung mit Hilfe des Lichtschnittverfahrens*. Bachelorarbeit, 2015.
- [Mai14] Kolja Cornelius Maier. *Entwicklung eines Hardware-Moduls zur autonomen Sammlung von Wasserproben mit dem Unterwasserroboter MONSUN*. Bachelorarbeit, 2014.
- [Sch15] Kim Scharringhausen. *Entwicklung und Integration eines Sensormoduls zur autonomen Bestimmung der Gewässerqualität mit Hilfe des Unterwasserroboters MONSUN*. Bachelorarbeit, 2015.
- [Tra15] Immo Albert Traupe. *Entwicklung eines Visualisierungs- und Kommunikationsmoduls für den Unterwasserroboter MONSUN*. Bachelorarbeit, 2015.
- [Uke14] Fabian Uken. *Entwicklung einer Steuereinheit für einen teilautonomen ferngesteuerten Unterwasserroboter*. Bachelorarbeit, 2014.
- [Zen15] Patrick Zenker. *Entwicklung einer verteilten Organisations- und Steuerungssoftware fuer autonome Roboterschwärme*. Masterarbeit, 2015.



## Eigene Publikationen

- [AMO<sup>+</sup>13] Ammar Amory, Benjamin Meyer, Christoph. Osterloh, Thomas Tosik, and Erik Maehle. *Towards Fault-Tolerant and Energy-Efficient Swarms of Underwater Robots*. In *2013 IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, Workshops and Phd Forum*, pages 1550--1553. May 2013. doi:10.1109/IPDPSW.2013.215.
- [BAMM18] Ulrich Behrje, Ammar Amory, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *System Identification and Sliding Mode Depth Control of the Micro AUV SEMBIO*. In *ISR 2018; 50th International Symposium on Robotics*, pages 1--8. June 2018.
- [BIMM18] Ulrich Behrje, Cedric Isokeit, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *A Robust Acoustic-Based Communication Principle for the Navigation of an Underwater Robot Swarm*. In *Proceedings of the Oceans 18 MTS/IEEE Kobe*. 2018.
- [EMM14] Kristian Ehlers, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Full Holonomic Control of the Omni-directional AUV SMART-E*. In *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*, pages 1--6. June 2014.
- [FHK<sup>+</sup>12] Dariush Forouher, Jan Hartmann, Jan Helge Klüssendorff, Erik Maehle, Benjamin Meyer, Christoph Osterloh, and Thomas Tosik. *HANSE---A Low-Cost Autonomous Underwater Vehicle*. In *Autonomous Mobile Systems 2012: 22. Fachgespräch Stuttgart, 26. bis 28. September 2012*, pages 147--155. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-32217-4. doi:10.1007/978-3-642-32217-4\_16.
- [IMM17] Cedric Isokeit, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Cooperative Swarm Behaviour For In Situ Underwater Environmental Measurements*. In *Proceedings of the Oceans 17 MTS/IEEE Aberdeen*. 2017.
- [JMM08] Bojan Jakimovski, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Swarm intelligence for self-reconfiguring walking robot*. In *2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pages 1--8. Sept 2008. doi:10.1109/SIS.2008.4668286.
- [JMM09] Bojan Jakimovski, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Self-reconfiguring hexapod robot OSCAR using organically inspired approaches and innovative robot leg amputation mechanism*. In *International Conference on Automation, Robotics and Control Systems, ARCS-09*. 2009.

- [JMM10a] Bojan Jakimovski, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Design ideas and development of a reconfigurable robot OSCAR-X*. In *Emerging Trends in Mobile Robotics - 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. 2010. doi:10.1142/9789814329927\_0049.
- [JMM10b] Bojan Jakimovski, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. *Firefly Flashing Synchronization as Inspiration for Self-synchronization of Walking Robot Gait Patterns Using a Decentralized Robot Control Architecture*. In Christian Müller-Schloer, Wolfgang Karl, and Sami Yehia, editors, *Architecture of Computing Systems - ARCS 2010: 23rd International Conference, Hannover, Germany, February 22-25, 2010. Proceedings*, pages 61--72. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11950-7. doi:10.1007/978-3-642-11950-7\_7.
- [MEIM14] Benjamin Meyer, Kristian Ehlers, Cedric Isokeit, and Erik Maehle. *The development of the modular Hard- and Software Architecture of the Autonomous Underwater Vehicle MONSUN*. In *Proceedings of the 41st International Symposium on Robotics; ISR/Robotik 2014*, pages 1--6. 2014.
- [MEOM13] Benjamin Meyer, Kristian Ehlers, Christoph Osterloh, and Erik Maehle. *SMART-E: An Autonomous Omnidirectional Underwater Robot*. In *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, 4(4), pages 204--210. DeGruyter, 2013. ISBN ISSN (Print) 2081-4836. doi:10.2478/pjbr-2013-0015.
- [MIMB17] Benjamin Meyer, Cedric Isokeit, Erik Maehle, and Burkard Baschek. *Using Small Swarm-Capable AUVs for Submesoscale Eddy Measurements in the Baltic Sea*. In *Proceedings of the Oceans 17 MTS/IEEE Anchorage*. 2017.
- [MMR12] Benjamin Meyer, Richard Mietz, and Kai Roemer. *LoCaF: Detecting Real-World States with Lousy Wireless Cameras*. In *2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages 58--66. May 2012. ISSN 2325-2936. doi:10.1109/DCOSS.2012.9.
- [MOM13] Benjamin Meyer, Christoph Osterloh, and Erik Maehle. *MONSUN - A Modular Testbed for Swarms of Autonomous Underwater Vehicles*. In *ICRA2013 - Workshop on Many Robot Systems: Crossing the Reality Gap - From Single to Multi- to Many Robot Systems*. 2013.
- [MRM16] Benjamin Meyer, Christian Renner, and Erik Maehle. *Versatile Sensor and Communication Expansion Set for the Autonomous Underwater Vehicle MONSUN*. In *Advances in Cooperative Robotics: Proceedings of the 19th International Conference on Clawar 2016*, pages 250--257. World Scientific, 2016.
- [OMA<sup>+</sup>12] Christoph Osterloh, Benjamin Meyer, Ammar Amory, Thilo Pionteck, and Erik Maehle. *MONSUN II- Towards Autonomous Underwater Swarms for Environmental Monitoring*. In *IROS2012 - Workshop on Robotics for Environmental Monitoring*. 2012.

- [RGM<sup>+</sup>16] Christian Renner, Alexander Gabrecht, Benjamin Meyer, Christoph Osterloh, and Erik Maehle. *Low-Power Low-Cost Acoustic Underwater Modem*, pages 59--65. Springer International Publishing, Cham, 2016. ISBN 978-3-319-32107-3. doi:10.1007/978-3-319-32107-3\_6.
- [RMB<sup>+</sup>14] Christian Renner, Benjamin Meyer, Daniel Bimschas, Alexander Gabrecht, Sebastian Ebers, Thomas Tosik, Ammar Amory, Erik Maehle, and Stefan Fischer. *Hybrid Underwater Environmental Monitoring*. In *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys '14*, pages 340--341. ACM, New York, NY, USA, 2014. ISBN 978-1-4503-3143-2. doi:10.1145/2668332.2668354.



## Literaturverzeichnis

- [1] George Pararas-Carayannis. Turtle: A revolutionary submarine. In *Sea Frontiers*, Band 22(4):Seite 234, 1976.
- [2] D Richard Blidberg. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. In *IEEE ICRA*, Band 4. 2001.
- [3] HR Widditsch. SPURV-The first decade. Technischer Bericht, Washington UNIV Seattle Apllied Physics Lab, 1973.
- [4] Thomas B. Curtin, James G. Bellingham, Josko Catipovic und Doug Webb. Autonomous Oceanographic Sampling Networks. In *Oceanography*, Band 6, 1993. URL <https://doi.org/10.5670/oceanog.1993.03>.
- [5] J. Kalwa. The GREX-Project: Coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned systems in uncertain environments. In *OCEANS 2009-EUROPE*, Seiten 1--9. 2009. URL <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278179>.
- [6] J. Kalwa, A. Pascoal, P. Ridaio, A. Birk, M. Eichhorn, L. Brignone, M. Caccia, J. Alvez und R.S. Santos. The European R and D-Project MORPH: Marine robotic systems of self-organizing, logically linked physical nodes. In *IFAC Proceedings Volumes*, Band 45(5):Seiten 349 -- 354, 2012. ISSN 1474-6670. URL <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3182/20120410-3-PT-4028.00058>. 3rd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles.
- [7] Pedro Caldeira Abreu und António M. Pascoal. Formation Control in the scope of the MORPH project. Part I: Theoretical Foundations. In *IFAC-PapersOnLine*, Band 48(2):Seiten 244 -- 249, 2015. ISSN 2405-8963. URL <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.040>. 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV 2015.
- [8] Pedro Caldeira Abreu, Mohammadreza Bayat, António M. Pascoal, João Botelho, Pedro Góis, Jorge Ribeiro, Miguel Ribeiro, Manuel Rufino, Luis Sebastião und Henrique Silva. Formation Control in the scope of the MORPH project. Part II: Implementation and Results. In *IFAC-PapersOnLine*, Band 48(2):Seiten 250 -- 255, 2015. ISSN 2405-8963. URL <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.041>. 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV 2015.

- [9] J. Jalbert, J. Baker, J. Duchesney, P. Pietryka, W. Dalton, D. R. Blidberg, S. Chappell, R. Nitzel und K. Holappa. A solar-powered autonomous underwater vehicle. In *Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492)*, Band 2, Seiten 1132--1140 Vol.2. 2003. URL <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178503>.
- [10] JJ Davies und SA Pointer. High Data Rate Acoustic Communications for Doubly Spread Underwater Acoustic Channels. In *UDT 99 Conference*. 1999.
- [11] ATLAS ELEKTRONIK GmbH. SeaCat - One AUV - Many Tasks. 2018. URL <https://www.atlas-elektronik.com/solutions/mine-warfare-systems/seacatr.html>.
- [12] D. Ribas, N. Palomeras, P. Ridaó, M. Carreras und A. Mallios. Girona 500 AUV: From Survey to Intervention. In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Band 17(1):Seiten 46--53, 2012. ISSN 1083-4435. URL <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2011.2174065>.
- [13] Universitat de Girona - Computer Vision and Robotics. GIRONA 500 AUV. 2018. URL <http://cirs.udg.edu/auvs-technology/auvs/girona-500-auv/>.
- [14] Jorge Soares, A. Pedro Aguiar, Antonio Pascoal und A Martinoli. Joint ASV/AUV Range-Based Formation Control: Theory and Experimental Results. Seiten 5579--5585. 2013. ISBN 978-1-4673-5641-1. URL <http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631378>.
- [15] João Quintas, Francisco Curado Teixeira und António Pascoal. An Integrated System for Geophysical Navigation of Autonomous Underwater Vehicles. In *IFAC-PapersOnLine*, Band 51(29):Seiten 293 -- 298, 2018. ISSN 2405-8963. URL <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.518>. 11th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2018.
- [16] APIUM Swarm Robotics. Swarmdiver. 2019. URL <http://apium.com/>.
- [17] T. Schmickl, R. Thenius, C. Moslinger, J. Timmis, A. Tyrrell, M. Read, J. Hilder, J. Halloy, A. Campo, C. Stefanini, L. Manfredi, S. Orofino, S. Kernbach, T. Dipper und D. Sutantyó. CoCoRo -- The Self-Aware Underwater Swarm. In *2011 Fifth IEEE Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops*, Seiten 120--126. 2011. URL <http://dx.doi.org/10.1109/SASOW.2011.11>.
- [18] University of Graz -- Artificial Life Lab. subCULTron Project. 2019. URL <http://www.subcultron.eu/>.
- [19] Australian National University. The Serafina Project. 2019. URL <http://serafina.anu.edu.au/>.
- [20] N. Kottege und U. R. Zimmer. Acoustical Localization in Schools of Submersibles. In *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, Seiten 1--5. 2006. URL <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANSAP.2006.4393912>.

- [21] Hydromea SA. The Vertex AUV. 2019. URL <https://www.hydromea.com/products/vertex/>.
- [22] Felix Schill, Alexander Bahr und Alcherio Martinoli. Vertex: A new distributed underwater robotic platform for environmental monitoring. In *Distributed Autonomous Robotic Systems*, Seiten 679--693. Springer, 2018.
- [23] Anwar Quraishi, Alexander Bahr, Felix Schill und Alcherio Martinoli. Autonomous Feature Tracing and Adaptive Sampling in Real-World Underwater Environments. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 1--6. IEEE, 2018.
- [24] D. Ribas, P. Ridaou, J. Domingo Tardos und J. Neira. Underwater SLAM in a Marina Environment. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 1455--1460. 2007. ISSN 2153-0858. URL <http://dx.doi.org/10.1109/IRoS.2007.4399222>.
- [25] Dariush Forouher, Jan Hartmann, Marek Litza und Erik Maehle. Sonar-based FastSLAM in an underwater environment using walls as features. In *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Seiten 588--593. 2011. URL <http://dx.doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088563>.
- [26] Gianluca Antonelli, Stefano Chiaverini, Nilanjan Sarkar und Michael West. Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on ODIN. In *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Band 9(5):Seiten 756--765, 2001.
- [27] J. Han und W. K. Chung. Coordinated motion control of Underwater Vehicle-Manipulator System with minimizing restoring moments. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 3158--3163. 2008. ISSN 2153-0858. URL <http://dx.doi.org/10.1109/IRoS.2008.4650974>.
- [28] Ammar Amory und Erik Maehle. Energy Efficiency of the Swarm-Capable Micro AUV Sembio. In *OCEANS 2019 MTS/IEEE Marseille*. 2019.
- [29] Ammar Amory. *SEMBIO - An Energy Efficient Micro Underwater Robot for Swarm Applications*. Dissertation, Institut für Technische Informatik, Universität zu Lübeck, 2018.
- [30] Joint Research Centre. European Commission's science and knowledge service. 2017. URL [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/mawp-2016-2017-decision\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/mawp-2016-2017-decision_en.pdf).
- [31] European Commission's science and knowledge service. The EU Water Framework Directive - Integrated river basin management for Europe. 2000. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20090625&from=EN>.
- [32] Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Clockwork Ocean. 2016. URL <http://clockwork-ocean.com>.

- [33] Colin N. Waters, Jan Zalasiewicz, Colin Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Clément Poirier, Agnieszka Gałuszka, Alejandro Cearreta, Matt Edgeworth, Erle C. Ellis, Michael Ellis, Catherine Jeandel, Reinhold Leinfelder, J. R. McNeill, Daniel deB. Richter, Will Steffen, James Syvitski, Davor Vidas, Michael Wagemann, Mark Williams, An Zhisheng, Jacques Grinevald, Eric Odada, Naomi Oreskes und Alexander P. Wolfe. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. In *Science*, Band 351(6269), 2016. ISSN 0036-8075. URL <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad2622>.
- [34] Katherine Richardson, Will Steffen und Diana Livermann. *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions*. Cambridge University Press, Berlin Heidelberg New York, 2011. ISBN 9780521198363.
- [35] WWF and the Zoological Society of London. The Living Planet Index database. 2017. URL <http://www.livingplanetindex.org>.
- [36] Food und Agriculture Organization of the United Nations. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome, Italy, 2016. URL <http://www.fao.org/3/a-i5555e.pdf>.
- [37] Derek P. Tittensor, Matt Walpole, Samantha L. L. Hill, Daniel G. Boyce, Gregory L. Britten, Neil D. Burgess, Stuart H. M. Butchart, Paul W. Leadley, Eugenie C. Regan, Rob Alkemade, Roswitha Baumung, Céline Bellard, Lex Bouwman, Nadine J. Bowles-Newark, Anna M. Chenery, William W. L. Cheung, Villy Christensen, H. David Cooper, Annabel R. Crowther, Matthew J. R. Dixon, Alessandro Galli, Valérie Gaveau, Richard D. Gregory, Nicolas L. Gutierrez, Tim L. Hirsch, Robert Höft, Stephanie R. Januchowski-Hartley, Marion Karmann, Cornelia B. Krug, Fiona J. Leverington, Jonathan Loh, Rik Kutsch Lojenga, Kelly Malsch, Alexandra Marques, David H. W. Morgan, Peter J. Mumby, Tim Newbold, Kieran Noonan-Mooney, Shyama N. Pagad, Bradley C. Parks, Henrique M. Pereira, Tim Robertson, Carlo Rondinini, Luca Santini, Jörn P. W. Scharlemann, Stefan Schindler, U. Rashid Sumaila, Louise S.L. Teh, Jennifer van Kolck, Piero Visconti und Yimin Ye. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. In *Science*, Band 346(6206):Seiten 241--244, 2014. ISSN 0036-8075. URL <http://dx.doi.org/10.1126/science.1257484>.
- [38] Ben Collen, Jonathan Loh, Sarah Whitmee, Louise McRae, Rajan Amin und Jonathan E. M. Baillie. Monitoring Change in Vertebrate Abundance: the Living Planet Index. In *Conservation Biology*, Band 23(2):Seiten 317--327, 2009. ISSN 1523-1739. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01117.x>.
- [39] Richard G. Pearson, Jessica C. Stanton, Kevin T. Shoemaker, Matthew E. Aiello-Lammens, Peter J. Ersts, Ned Horning, Damien A. Fordham, Christopher J. Raxworthy, Hae Yeong Ryu, Jason McNees und H. Resit Akcakaya. Life history and spatial traits predict extinction risk due to climate change. In *Nature Clim. Change*, Band 4(3):Seiten 217--221, 2014. ISSN 1758-678X. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2113>. Letter.

- [40] The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015-4. 2015. URL [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org).
- [41] L. Burke, K. Reytar, M. Spalding und A. Perry. *Reefs at risk revisited*. World Resources Institute: Washington, DC, 2011. ISBN 978-1-56973-762-0.
- [42] Ove Hoegh-Guldberg. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. In *Marine and Freshwater Research*, Band 50(8):Seiten 839--866, 1999. URL <http://dx.doi.org/10.1071/MF99078>.
- [43] David Dudgeon, Angela H. Arthington, Mark O. Gessner, Zen-Ichiro Kawabata, Duncan J. Knowler, Christian L ev eque, Robert J. Naiman, Anne-H el ene Prieur-Richard, Doris Soto, Melanie L. J. Stiassny und Caroline A. Sullivan. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. In *Biological Reviews*, Band 81(2):Seiten 163--182, 2006. ISSN 1469-185X. URL <http://dx.doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- [44] J. Baillie, J. Griffiths, S. Turvey, J. Loh, B. Collen, G.M. Mace und S.N. Stuart. *Evolution Lost: Status and Trends of the World's Vertebrates*. Zoological Society of London, 2010. ISBN 9780900881404.
- [45] Jan Willem Erisman, James N. Galloway, Sybil Seitzinger, Albert Bleeker, Nancy B. Dise, A. M. Roxana Petrescu, Allison M. Leach und Wim de Vries. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Band 368(1621), 2013. ISSN 0962-8436. URL <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0116>.
- [46] Stephen R Carpenter und Elena M Bennett. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. In *Environmental Research Letters*, Band 6(1):Seite 014009, 2011. URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/6/i=1/a=014009>.
- [47] Ralph F Keeling, Arne K ortzinger und Nicolas Gruber. Ocean deoxygenation in a warming world. In *Annual review of marine science*, Band 2:Seiten 199--229, 2010.
- [48] Jorge L Sarmiento, Tertia MC Hughes, Ronald J Stouffer und Syukuro Manabe. Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. In *Nature*, Band 393(6682):Seiten 245--249, 1998.
- [49] Ralph F Keeling und Hernan E Garcia. The change in oceanic O2 inventory associated with recent global warming. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Band 99(12):Seiten 7848--7853, 2002.
- [50] Frank A Whitney, Howard J Freeland und Marie Robert. Persistently declining oxygen levels in the interior waters of the eastern subarctic Pacific. In *Progress in Oceanography*, Band 75(2):Seiten 179--199, 2007.
- [51] John S Gray, Rudolf Shiu-sun Wu und Ying Ying Or. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. In *Marine Ecology Progress Series*, Band 238:Seiten 249--279, 2002.

- [52] S Winogradsky. Recherches sur les organismes de la nitrification. In *Ann. Inst. Pasteur*, Band 4(257):Seiten 11--12, 1890.
- [53] Cynthia Nevison, James H Butler und JW Elkins. Global distribution of N<sub>2</sub>O and the  $\Delta$ N<sub>2</sub>O-AOU yield in the subsurface ocean. In *Global Biogeochemical Cycles*, Band 17(4), 2003.
- [54] Nicolas Gruber. The marine nitrogen cycle: overview and challenges. In *Nitrogen in the marine environment*, Band 2:Seiten 1--50, 2008.
- [55] Sunke Schmidtko, Lothar Stramma und Martin Visbeck. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. In *Nature*, Band 542(7641):Seiten 335--339, 2017. ISSN 0028-0836. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature21399>. Letter.
- [56] Bund/LänderArbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA-Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ (LAWA-AO). Rahmenkonzeption zur Aufstellung von Monitoringprogrammen und zur Bewertung des Zustands von Oberflächengewässern, Teil A: Eckpunkte zum Monitoring und zur Bewertung von Oberflächengewässern. 2012. URL [http://www.wasserblick.net/servlet/is/142681/RAKON\\_A\\_22\\_08\\_12\\_final-02.pdf?command=downloadContent&filename=RAKON\\_A\\_22\\_08\\_12\\_final-02.pdf](http://www.wasserblick.net/servlet/is/142681/RAKON_A_22_08_12_final-02.pdf?command=downloadContent&filename=RAKON_A_22_08_12_final-02.pdf).
- [57] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373). 2016. URL [https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ogewv\\_2016/gesamt.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ogewv_2016/gesamt.pdf).
- [58] Umweltbundesamt. "Ökologischer Zustand der Flüsse und Bäche. 2016. URL <http://www.umweltbundesamt.de/print/daten/gewaesserbelastung/fliessgewaesser/oekologischer-zustand-der-fliessgewaesser>.
- [59] Woods Hole Oceanographic Institution. Ocean Instruments - How they work, what they do, and why they do it. 2017. URL <http://www.whoi.edu/science/instruments/>.
- [60] Sea and Sun Technology GmbH. CTD - Multi Parameter Probe. 2017. URL <http://www.sea-sun-tech.com/technology.html>.
- [61] Alexander Soloviev, Roger Lukas und Hiroshi Matsuura. Sharp frontal interfaces in the near-surface layer of the tropical ocean. In *Journal of Marine Systems*, Band 37(1-3):Seiten 47 -- 68, 2002. ISSN 0924-7963. URL [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00195-1](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00195-1). Physics and Biology of Ocean Fronts.
- [62] Peter Spain. Technology in Focus: Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). In *Widespread Applications Stem From Diverse Measurement Capabilities*, 2017. URL <https://www.hydro-international.com>.
- [63] GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Ozeanzirkulation und Klimadynamik - Mikrostruktursonde. 2017. URL <http://www.geomar.de/forschen/fb1/fb1-po/beobachtungssysteme/mikrostruktur/>.

- [64] Matthew Dunbabin und Lino Marques. Robots for environmental monitoring: Significant advancements and applications. In *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Band 19(1):Seiten 24--39, 2012.
- [65] Christoph Osterloh, Marek Litza und Erik Maehle. Hard- and Software Architecture of a Small Autonomous Underwater Vehicle for Environmental Monitoring Tasks. In *Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application* (herausgegeben von Torsten Kröger und Friedrich M. Wahl), Seiten 347--356. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-01213-6. URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-01213-6\\_31](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-01213-6_31).
- [66] Christoph Osterloh, Thilo Pionteck und Erik Maehle. MONSUN II: A small and inexpensive AUV for underwater swarms. In *ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics*, Seiten 1--6. 2012.
- [67] Christoph Osterloh und Erik Maehle. Low-Power Microcontroller-based Acoustic Modem for Underwater Robot Communication. In *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, Seiten 1--6. 2010.
- [68] Cedric Kevin Isokeit. *Entwicklung eines Brushless-Motor-Reglers für den autonomen Unterwasserroboter MONSUN II*. Bachelorarbeit, Institut für Technische Informatik, Universität zu Lübeck, 2012.
- [69] Marco Dorigo. Swarm robotics-special issue editorial. In *Autonomous Robots - ROBOTS*. 2004.
- [70] Woods Hole Oceanographic Institution. Oceanographic Tools: Sonar Single Beam. 2017. URL <http://www.divediscover.who.edu/tools/sonar-singlebeam.html>.
- [71] Henry M. Manik. Underwater Acoustic Detection and Signal Processing Near the Seabed. In *Sonar Systems* (herausgegeben von N. Z. Kolev), Kapitel 12. InTech, Rijeka, 2011. URL <http://dx.doi.org/10.5772/17499>.
- [72] Felix Schill, Uwe R Zimmer und Jochen Trumppf. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications. In *Proceedings of ACRA*, Seiten 1--8. 2004.
- [73] Universität Bielefeld. Funktionsprinzip eines Absorptionsspektrometers. 2017. URL <http://www.uni-bielefeld.de/chemie/lehre/basispc/media/Spektrometer/>.
- [74] Andrew Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 4th Auflage, 2002. ISBN 0130661023.
- [75] Jan Heitmann, Lucas Bublitz, Timo Kortbrae und Christian Renner. Evolution of an Acoustic Modem for Micro AUVs. In *Proceedings of the 16th GI/ITG KuVS Fachgespräch Sensornetze*, FGSN. Hamburg, Germany, 2017. URL [http://www.bcrenner.de/publications/2017\\_FGSN\\_AcousticModem.pdf](http://www.bcrenner.de/publications/2017_FGSN_AcousticModem.pdf).

- [76] Christian Renner und Alexander J. Golkowski. Acoustic Modem for Micro AUVs: Design and Practical Evaluation. In *Proceedings of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks and Systems, WUWNet*. Shanghai, China, 2016. URL [http://www.bcrenner.de/publications/2016\\_WUWNet\\_modem.pdf](http://www.bcrenner.de/publications/2016_WUWNet_modem.pdf).
- [77] Robin Murphy. *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2000.
- [78] Nils J Nilsson. Shakey the Robot. Technischer Bericht, SRI International Menlo Park CA, 1984.
- [79] Joseph L Jones. *Robot programming: a practical guide to behavior-based robotics*. McGraw Hill, 2004.
- [80] Jörg Kahlert. Crashkurs Regelungstechnik. 2015. ISBN 978-3800736423.
- [81] RL Steinberger. Acoustic Lloyd Mirror Effect in Deep Ocean Water. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 31(6):Seiten 838--838, 1959.
- [82] E. Chang. Echo Algorithms: Depth Parallel Operations on General Graphs. In *IEEE Transactions on Software Engineering*, Band 8:Seiten 391--401, 1982. ISSN 0098-5589. URL <http://dx.doi.org/10.1109/TSE.1982.235573>.



## Persönliche Informationen

### B.1. Curriculum Vitae

#### Persönliche Daten

---

Name	Benjamin Meyer
Anschrift	Sechseichener Weg 34, 23879 Mölln
Telefon	0162-2366473
E-Mail	benjaminmeyer1@gmx.de
Geburtsdaten	13.05.1987 in Hagenow
Staatsbürgerschaft	Deutsch
Familienstand	ledig
Führerschein	A, B
2011	<b>M.Sc.</b> , <i>Universität zu Lübeck</i> , Master of Science Informatik.

#### Ausbildung

---

2010-2011	<b>M.Sc.</b> , <i>Universität zu Lübeck</i> , Master of Science.
Masterarbeit	Ein Framework zur visuellen Erkennung von Umgebungszuständen mittels Sensorknoten
2006-2010	<b>B.Sc.</b> , <i>Universität zu Lübeck</i> , Bachelor of Science.
Bachelorarbeit	Klassifizierung der Health Signale der sechsbeinigen Laufmaschine OSCAR

## **Berufserfahrung**

---

- 2011-jetzt **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, *Institut für Technische Informatik*, Universität zu Lübeck.
- 2007-2011 **Hilfswissenschaftler**, *Institut für Technische Informatik*, Universität zu Lübeck.

## **Sprachen**

---

- Deutsch Muttersprache
- Englisch C1

## **IT Kompetenzen**

---

- Betriebssysteme (embedded-)Windows, (embedded-)Linux
- EDA 3D-CAD-Konstruktionssoftware SolidWorks inkl. 3D-Druck Kompetenz, CadSoft EAGLE
- Programmierung C, C++, ROS, Atmel AVR, Arduino, QT 4/5
- Textverarbeitung Microsoft Office, Latex Textsatzsystem

## **Auszeichnungen**

---

- 07/2012 Innovationspreis beim europäischen Student Autonomous Underwater Challenge Europe Unterwasserroboterwettkampf mit dem Roboter SMART-E
- 07/2011 Erster Platz beim europäischen Student Autonomous Underwater Challenge Europe Unterwasserroboterwettkampf mit dem Roboter HANSE

## **Weiterführende Tätigkeiten**

---

- 06/2016 Mitglied der internationalen Expedition Uhrwerk Ozean unter der Leitung des Instituts für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht



B. Meyer