

Sachbericht

Seewasser-Qualitätsmonitoring und -Management – Sea Water Quality Monitoring and Management (SALMON)

Förderkennzeichen: TNA VIII-3/2011

Projektpartner:



Technische Universität Ilmenau
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Fachgebiet Systemanalyse
Fachgebiet Regelungstechnik



Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung IOSB
Institutsteil Angewandte Systemtechnik



-4H- JENA engineering GmbH



Havforskningsinstituttet
Institute of Marine Research
Norwegen



University of Southern Denmark
Mads Clausen Institute
Dänemark

Projektlaufzeit: 01.01.2011 – 31.12.2013

Juni 2014

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014200102

Projektbeteiligte

Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Systemanalyse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament
Dr.-Ing. Mike Eichhorn
Dr.-Ing. Matthias Schneider
M.Sc. Ralf Taubert

Fachgebiet Regelungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Johann Reger
M.Sc. Remon Al Azrak

Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Institutsteil Angewandte Systemtechnik

Dr.-Ing. Torsten Pfützenreuter
Dr. Divas Karimanzira
Dipl.-Ing. Marco Jacobi

-4H- JENA engineering GmbH

Dipl.-Ing. Michael Boer
Dipl.-Biologin Kornelia Bley
Dipl.-Ing.(FH) Samuel Gebhardt

Havforskningsinstituttet
Institute of Marine Research
Norwegen

Dr. Henning Wehde

University of Southern Denmark
Mads Clausen Institute
Dänemark

Dr. Jerome Jouffroy

Impressum

Dr.-Ing. Mike Eichhorn
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik und Automatisierung
Fachgebiet Systemanalyse
Helmholtzplatz 5
Zusebau
98693 Ilmenau
Deutschland
mike.eichhorn@tu-ilmenau.de
Telefon: +49 3677 69-4103

Inhalt

Zusammenfassung	V
Abstract	VI
1 Planung und Ablauf des Vorhabens	1
2 Zusammenarbeit mit europäischen Partnern	3
3 Erzielte Ergebnisse	4
3.1 Spezifikation	4
3.2 Aufbau eines Konzentrationsmodells	7
3.3 Aufbau einer Simulation	8
3.3.1 Testphasen	8
3.3.2 Modultest unter Simulink	9
3.3.3 Fahrzeugsimulator	10
3.4 Entwicklung eines miniaturisierten Sensorsystems	18
3.4.1 Ausgangssituation	18
3.4.2 Aufgabenstellung	18
3.4.3 Mechanik	19
3.4.4 Elektrik	24
3.4.5 Software	30
3.4.6 Integration des Moduls in das Gesamtsystem	33
3.5 Machbarkeitsstudie zur Zustandsschätzung	35
3.6 Navigation und Bahnverfolgung	35
3.6.1 Reglerentwurf	35
3.6.2 Modellbasierter Entwurf des Autopiloten	41
3.6.3 Interfacekonzept	42
3.7 Missionsplanung und -validierung	43
3.7.1 Planungstool	43
3.7.2 Manöverprozessor	44
3.8 Datenbankintegration	46
3.8.1 Datenfiles	46
3.8.2 Quality Bits	47
3.9 Systemintegration und Test	48
3.10 Abschlusstest	53
3.10.1 Autonome Führung des Fahrzeuges	53
3.10.2 Sensorsystem	57
4 Verwertungsmöglichkeiten	61
5 Durchgeführte bzw. geplante Veröffentlichungen	63
Abkürzungsverzeichnis	64
Literatur	65

Zusammenfassung

Das Ziel des SALMON Projektes war die Entwicklung einer Systemlösung zur automatischen Überwachung und Analyse der Wasserqualität auf der Basis eines autonomen Unterwasserfahrzeuges (AUV). Dabei wurde bei der Entwicklung des Sensorsystems auf die vorhandene Expertise von -4H- JENA engineering GmbH (4HJE) bei der optischen *in situ*-Detektion von Nitrat zurückgegriffen. Eine Herausforderung für 4HJE war es, ein miniaturisiertes Komplettsystem zur Messung der Wasserqualität zu entwickeln, welches in das bestehende Unterwasserfahrzeug integriert werden kann und den Umwelteinflüssen Unterwasser (Druck, Temperatur) standhält. Dazu wurde Sensorik unterschiedlicher Hersteller und miniaturisierte Industrie-PCs in das Nutzlastsegment implementiert und die erforderliche Software zur automatischen Wasserqualitätsmessung und -auswertung entwickelt.

Der Versuchsträger, das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug (ROV) „CWolf“, wurde vom Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau (AST) zur Verfügung gestellt. Durch die große Erfahrung bei der Entwicklung von Unterwasserfahrzeugen war das AST maßgeblich an der Spezifikation der Soft- und Hardware-Schnittstellen zum Versuchsträger AUV „CWolf“ beteiligt. Für die Arbeitsgruppe am AST bestand die Aufgabe darin, das Fahrzeug für die Aufnahme des Sensormoduls und den autonomen Betrieb umzurüsten. Des Weiteren übernahm das AST die Betreuung des Fahrzeuges während der Systemintegration, den Schubtests im AST-Testbecken, den Testfahrten in regionalen Talsperren sowie beim Abschlusstest in Norwegen.

Die Projektkoordination und die Entwicklung der autonomen Führungsalgorithmen wurden am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt. Dazu entwickelte das Fachgebiet Systemanalyse (SAG) ein menügeführtes Planungstool für die Offlineplanung von Fahrzeugmissionen. Die C++-Programmierung der notwendigen Fahrzeugsoftware zur autonomen Führung und deren Überprüfung im entwickelten Simulationssystem war ein weiterer Arbeitsschwerpunkt der Forschergruppe. Das Fachgebiet Regelungstechnik (CEG) erstellte für den Autopiloten des Fahrzeuges ein Konzept einer robusten Folgeregelung basierend auf einer Störungs- und Zustandsschätzung. Dabei konnte auf die Expertise bei der Überwachung und Steuerung von Unterwasserfahrzeugen im küstennahen Bereich des Mads Clausen Institute (MCI) zurückgegriffen werden.

Die erarbeitete Systemlösung zur Integration eines Sensorsystems in ein Unterwasserfahrzeug zeichnet sich durch ein modulares Konzept im Bereich der Hard- und Software aus. So ist es auch möglich, andere Applikationsaufgaben mit einem Minimum an hard- und softwaretechnischen Schnittstellen zwischen Nutzlastsegment und Fahrzeug zu lösen.

Eine erste Anwendung des entwickelten Systems war die Analyse der Wasserqualität in der Umgebung von Fischfarmen in Norwegen. Das Norwegische Institute of Marine Research (IMR) unterstützte mit seiner Erfahrung bei der Erstellung eines Anforderungskataloges und stellte die Infrastruktur und ein Seegebiet für den Abschlusstest zur Verfügung.

Während der gesamten Seetests arbeitete das Sensorsystem zuverlässig und lieferte auswertbare Messungen zur Wasserqualität. Durch die praktischen Erfahrungen der Projektgruppe mit dem System, dem erkannten Verbesserungspotential und den Gesprächen mit dem norwegischen Partner als möglicher Anwender, wurde die Weiterführung des Projektes zwischen den Thüringer Partnern und IMR beschlossen. Dazu werden z.Z. mögliche Förderinstrumente und passende Ausschreibungen im neuen EU-Förderprogramm geprüft.

Abstract

The objective of the SALMON project was the development of a system for the automated detection and analyses of water quality parameters using an autonomous underwater vehicle. 4H- JENA engineering GmbH (4HJE) has carried out extensive research on optical *in situ*-detection of nitrates, an expertise utilized in this project. The development of a miniaturized sensor system for water quality parameters represented a significant challenge for 4HJE, as it was to be integrated in the payload unit of the autonomous underwater vehicle in compliance with the underwater environmental conditions (pressure, temperature). In order to do this, sensors of various manufacturers and miniaturized industrial PCs were implemented in the payload segment and the required software for the automatical water quality measurement and analyses were developed.

As a carrier platform the remote operated vehicle (ROV) “CWolf” from Fraunhofer IOSB-AST (AST) was deployed. Due to AST’s vast experience in the development of underwater vehicles, AST has played a significant role in the specification of the soft- and hardware interfaces to the carrier platform AUV “CWolf”. The AST working group was responsible for the implementation of the sensor module in the vehicle and its modification for the autonomous operation. Furthermore, the AST was in charge of the support for the vehicle during the system integration, the towing tests in the AST test pool, the trials in regional reservoirs as well as during the final trials in Norway.

The project was coordinated by the Institute of Automation and Systems Engineering of Technische Universität Ilmenau. The Institute was also responsible for the development of the autonomous guidance algorithms. To achieve this, the System Analyses Group (SAG) developed a menu-guided planning tool for the offline planning of vehicle missions. The C++ programming of the necessary vehicle software for an autonomous guidance and their verification in a developed simulation system was an additional work package of the group. The Control Engineering Group (CEG) developed a concept of a robust follow-up control based on a disturbance and state estimation for the vehicle autopilot. The Mad Clausen Institute (MCI) with its expertise in observation and control of underwater vehicles supported this work.

The developed system solution to integrate a sensor system in an underwater vehicle is characterized by a modular concept in hard- and software. This concept allows an easy integration of other application tasks with a minimum of hard- and software technical interfaces between the payload segment and the vehicle.

The developed system was first applied in the analyses of water quality around fish farms in Norway. The Norwegian Institute of Marine Research (IMR) supported the preparation of a catalog of requirements and provided the location and its infrastructure for the final tests.

The sensor system worked very reliably during the sea trials and produced usable test results regarding the water quality. The practical experience of the project group in relation to the system, the recognized potential for improvement and the fact that the Norwegian partner may use the system in the future, led to the decision to continue the project between the Thuringian partners and IMR. Therefore, possible promotion schemes and suitable calls for proposal within the new EU research and innovation program are currently being investigated.

1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Eine umfassende und kosteneffiziente Erfassung der Wasserqualität der europäischen Küsten- und küstennahen Gewässer ist im Hinblick auf die Einführung der europäischen maritimen und marinen Direktiven von wachsender Bedeutung, um sie auch bei intensiver wirtschaftlicher Nutzung als Lebensraum zu erhalten. In diesem Vorhaben sollte auf Basis der vorhandenen Expertise der beteiligten thüringischen, norwegischen und dänischen Partner eine auf autonomen Unterwasserfahrzeugen gründende Systemlösung für die automatisierte Überwachung und Erhaltung der Wasserqualität entwickelt werden. Die in Norwegen ansässigen Fischfarmen (Aquakulturen) mit deren Einleitung von Nährstoffen in die Natur stellen in diesem Projekt den ersten thematischen Schwerpunkt. Auf diesem Gebiet bestehen sowohl der Bedarf als auch die Notwendigkeit, die für die Fischzucht notwendige Nährstoffeinspeisung zu optimieren sowie den Abfluss ins Meer und damit gleichbedeutend die Beeinträchtigung der Umwelt durch Abfallstoffe so gering wie möglich zu halten. Einen weiteren Schwerpunkt bilden die in Norwegen ansässigen Bergwerke und deren Abfalleinleitung in lokale Fjorde. Diese Einleitungen werden derzeit kaum überwacht, wodurch ein erheblicher Schaden an der Umwelt entstehen kann. Dies zeigt die Notwendigkeit für flexible, ressourcenschonende Frühwarnsysteme, die eine zeitnahe Einschätzung der Situation und gezielte Gegenmaßnahmen ermöglichen. Ein engmaschiges Überwachungs- und Messsystem kann dies gewährleisten.

Die Garantie der Sauberkeit der Ozeane ist von entscheidender Bedeutung, wenn diese nachhaltig als Lebensraum erhalten werden sollen. Es ist zu erwarten, dass küstennahe Gewässer zukünftig in noch wesentlich stärkerem Maße für landwirtschaftliche Aufgaben oder zur Rohstoffgewinnung genutzt werden. Beispiele hierfür sind die Fischzucht in Aquakulturen, der Bergbau oder die Offshore-Ölgewinnung. Es müssen Konzepte der Abfallvermeidung entwickelt werden, die den Eintrag von Schadstoffen in Gewässer minimieren. Die Notwendigkeit solcher Maßnahmen zum Schutz bzw. zur Verbesserung der Umweltqualität wird durch ein stark wachsendes Interesse, beispielsweise durch europäische Agenturen, unterstrichen. So fordert das europäische Wasser-Informationssystem (WISE) unter anderem detaillierte Informationen zum Status der Wasserqualität küstennaher Ozeangewässer an. Eine hochfrequente Erfassung von Wasserqualität und ihrer biologischen Einflussgrößen ist erforderlich, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen, welche die europaweit eingeführten Direktiven im marinen und maritimen Bereich erfüllen werden. Dies gilt insbesondere für die europäischen Küstenregionen, die sowohl in der Fischereiwirtschaft als auch im Fremdenverkehr eine besondere Aufmerksamkeit erfahren. Da zukünftig eine gleichzeitig zunehmende anderweitige wirtschaftliche Nutzung wie z.B. durch Offshore-Ölplattformen und Aquakulturen absehbar ist, muss eine im Vergleich zu heutigen Methoden kosteneffiziente Lösung zur engmaschigen Überwachung der Wasserqualität gefunden werden.

In der Entwicklung maßgeschneiderter technischer Lösungen sahen die Projektpartner einen erheblichen Bedarf. Ziel war es, im Rahmen dieses Vorhabens konkrete technische Kompetenzen auf dem Gebiet der „Green Technologies“ aufzubauen, die nicht nur einen Beitrag zur Abfallvermeidung leisten, sondern auch eine zukünftige Vermarktung dieses Knowhows durch die beteiligten Partner eröffnen.

Stand der Technik ist heute die Nutzung spezialisierter Forschungsschiffe, um derartige Untersuchungen durchführen zu können. Dies erfordert einen enorm hohen Ressourceneinsatz auf der einen Seite, auf der anderen Seite bedarf deren Einsatz einer vergleichsweise langen Vorbereitungszeit. Daher wurde die Entwicklung eines automatisierten Messsystems initiiert, um bestehende Plattformen (Fähren, Containerschiffe, etc.) kostenorientiert und ohne zusätzlichen technischen Aufwand nutzen zu können.

Das von der EU geförderte Projekt „FerryBox“ (www.ferrybox.com) zeigt einen möglichen Lösungsansatz auf dem Gebiet der automatisierten Wasserqualitätsmessung. In diesem Projekt entwickelte -4H- JENA engineering GmbH (4HJE) das Komplettsystem zur Messung der Wasserqualität. Dies beinhaltet die Sensorik unterschiedlicher Hersteller und deren softwaretechnische Auswertung. Der FerryBox-Ansatz bietet eine hervorragende Ausgangssituation, ist jedoch durch die Nutzung der genannten Trägerfahrzeuge nur auf deren Routen einsetzbar und daher unflexibel. Individuell abgestimmte Messungen, vor allem von küstennahen Gewässern, sind somit nicht möglich.

Durch die Miniaturisierung dieses Messsystems und dessen Kombination mit der Flexibilität autonomer Unterwasserfahrzeuge sollte die Grundlage für eine automatisierte und engmaschige Überwachung von küstennahen Gewässern, Fjorden und Binnengewässern geschaffen werden. Dabei eignen sich Unterwasserfahrzeuge in besonderer Weise, da sie selbsttätig sowohl abseits von Schifffahrtsrouten als auch gefahrungsfrei innerhalb von befahrenen Gewässern eingesetzt werden können. Des Weiteren erlaubt der Einsatz solcher Unterwasserfahrzeuge die Bestimmung der Wasserqualität in beliebigen Tiefen und nicht nur in der Nähe der Wasseroberfläche. Dies führt zu erweiterten Informationen und erlaubt dadurch eine verbesserte Analyse der Umweltqualität. Diese Fahrzeuge ermöglichen weiterhin die Lokalisierung des Schadstoffeintrages (z.B. Leckage einer Ölpipeline, Positionsbestimmung eines versenkten Containers mit Schadstoffen, Ermittlung der Einleitstelle an der Küste).

Für Aquafarmen, die in diesem Projekt einen thematischen Schwerpunkt darstellten, ist somit die Möglichkeit gegeben, die derzeit nicht optimierte Nährstoffeinspeisung auf einen akzeptablen Wert zu reduzieren. Auf diese Weise erreicht man eine maximale Biomasseproduktion bei minimalem Aufwand. Auf der anderen Seite werden sowohl die ungewollten Zuleitungen überflüssiger Nährstoffe als auch die Ausscheidungen der Kulturen, die ein erhebliches Abfallpotential darstellen, auf ein Minimum verringert. Weiterhin kann ein solches System zur engmaschigen und vor allem kostengünstigen Überwachung eingesetzt werden.

Ein Manko der aktuell vorhandenen Beobachtungsdaten ist die fehlende Integration der Daten auf europäischer Ebene. Daten werden meist noch immer in lokalen Datenbasen der beobachtenden Institute gespeichert und der länderübergreifende Austausch von Daten ist beschränkt auf individuellen Austausch zwischen Institutionen oder sogar Individuen. Zur Überwindung dieses Mangos existieren verschiedene Initiativen für eine übergreifende Verfügbarkeit von Datensätzen. Beispielhaft neben anderen Initiativen wie EModNet seien hier die EU geförderten Seadatanet (<http://www.seadatanet.org/>) und MyOcean (<http://www.myocean.eu.org/>) Projekte genannt, in denen das Norwegische Institute of Marine Research (IMR) für die Arktischen Daten federführend involviert ist. Besonders in küstennahen Gebieten, mit einer sehr ausgeprägten Variabilität, ist die vorhandene Datendichte nicht ausreichend. Es bestand daher dringender Bedarf, eine kosteneffiziente Methodik zu etablieren, mit deren Hilfe Wasserqualitätsparameter erfasst werden können.

Neben den gezeigten Referenzen der Partner 4HJE und IMR waren für die Umsetzung dieses Projekts hohe analytische und regelungstechnische Kenntnisse notwendig. Diese waren durch eine Zusammenarbeit der Technische Universität Ilmenau – Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik und der dänischen University of Southern Denmark – Mads Clausen Institute gegeben. Das Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau realisierte die hardwarespezifischen Aspekte des Projekts. Somit zeichnete sich das Konsortium durch das hohe system- und regelungstechnische Verständnis sowie das für dieses Projekt notwendige methodische Wissen aus.

Für die Durchführung des Projektes mit seinen komplexen Fragestellungen war ein Bearbeitungszeitraum von insgesamt 3 Jahren vorgesehen. Die Realisierung des Vorhabens erfolgte arbeitsteilig auf der Grundlage von zwischen den beteiligten Einrichtungen abgestimmten Arbeitsplänen. Die Arbeiten wurden zu Arbeitspaketen (AP) zusammengefasst. Die Koordination und administrative Verwaltung des Vorhabens oblag der Technischen Universität Ilmenau – Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik. Die terminliche Planung ist dem Arbeitsplan in Abbildung 3.2 zu entnehmen. Die Feingliederung der einzelnen Arbeitspakete mit ihren Wechselwirkungen ist im PERT-Diagramm in Abbildung 3.3 dargestellt.

2 Zusammenarbeit mit europäischen Partnern

Der norwegische Partner IMR (Institute of Marine Research) erarbeitete zusammen mit den einzelnen Forschungspartnern aus Thüringen zu Projektbeginn ein Aufgabenszenario für eine autonome Mission eines Unterwasserfahrzeuges zur Bestimmung der Nitratverteilung in der Umgebung von Aquafarmen. Hierbei wurden die notwendigen Parameter, wie zu bestimmende Messgrößen, die Missionsdauer und das Tauchprofil definiert. Bei der logistischen Vorbereitung des Abschlusstests bekam die Gruppe die erforderliche Unterstützung von IMR. So wurde das notwendige Seekartenmaterial zur Verfügung gestellt und die interessierenden Seegebiete besprochen. Für den Abschlusstest wurde dem Forschungsteam ein Seegebiet vom norwegischen Partner für zwei Wochen zur Verfügung gestellt. Auch erhielt die Gruppe während dieser Zeit jegliche notwendige Unterstützung von IMR bei den durchzuführenden Seetests, bei der Verpflegung und Unterbringung. Die während der zwei Wochen aufgenommenen Wasserqualitätsmessungen wurden mit dem IMR ausgewertet. So konnten die Missionsprofile und das Operationsgebiet gezielt verändert werden, um möglichst aussagekräftige Informationen über die Nitratverteilung um Aquafarmen zu erhalten. Durch die vielversprechenden Ergebnisse während des Abschlusstests wurde die Weiterführung des Projektes u.a. im Rahmen von HORIZONT 2020 zwischen den Thüringer Partnern und IMR beschlossen. Dazu werden z.Z. mögliche Förderinstrumente und passende Ausschreibungen im neuen EU-Förderprogramm geprüft.

Der Kooperationspartner am Mads Clausen Institute (MCI) brachte seine profunde Expertise bei der Überwachung und Steuerung von Unterwasserfahrzeugen im küstennahen Bereich ein und lieferte für das Projekt erste Ideen für Algorithmen zur Zustandsschätzung. Das für die robuste Folgeregelung verwendete Konzept zur Störungs- und Zustandsschätzung geht auf diese Zusammenarbeit zurück (siehe Abschnitt 2.6). Anfang 2011 wurden am Mads Clausen Institute aber eine Reihe von unerwarteten Umstrukturierungsmaßnahmen mit sehr großen personellen Veränderungen vorgenommen. Im Zuge dessen wurde die maritime Forschung am Institut zugunsten einer Neuausrichtung der Forschung in Richtung energietechnischer und leistungselektronischer Systeme weitgehend aufgelöst. Dies betraf auch den Kooperationspartner am Mads Clausen Institute.

3 Erzielte Ergebnisse

3.1 Spezifikation

Zu Beginn des Projektes wurden im Kickoff Meeting am 20.01.2011 die einzelnen Arbeitspakete und die Schnittstellen zu den Partnern abgestimmt und definiert (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3). Des Weiteren erfolgte mit dem norwegischen Partner IMR die Definition des Einsatzszenarios für das AUV. Dabei wurde als Schwerpunkt dieses Projektes die Bestimmung der Nitratverteilung um Aquafarmen beschlossen.

In Absprache zwischen den entsprechenden Partnern wurden im ersten Projektquartal die detaillierten Anforderungen definiert. Dabei hatte das Fraunhofer IOSB-AST die Federführung bei der Spezifikation der Soft- und Hardware-Schnittstellen zum Versuchsträger AUV „CWolf“. Es wurde der Nachrichtenaustausch zwischen der grundlegenden Fahrzeugsoftware, welche die Navigationsdaten und die Ansteuerung der Aktoren bereitstellt, mit der Software der Projektpartner definiert und später implementiert. Des Weiteren wurden zusammen mit 4HJE der Aufbau, die Abmaße und die Gewichtsverteilung des neuen Sensormoduls spezifiziert.

Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Programmen wurde UDP (User Data Protocol) verwendet. Dies erlaubt eine Betriebssystem- und Compilerunabhängigkeit der Programme. Abbildung 3.1 zeigt die Schnittstellen zwischen den einzelnen Programmen mit den definierten Nachrichtentelegrammen. Die eindeutige Identifikation der einzelnen Telegramme erfolgt durch einen Header, welcher am Anfang des Telegramms steht. Dieser Header beinhaltet eine Nachrichten ID und die Datenlänge der Nachricht. Der Control Computer (CC) verteilt alle 100 ms die aktuellen Navigationsdaten an den Scientific Computer (SC) und den Measurement Computer (MC). Nach Empfang der Navigationsdaten generiert der Autopilot im SC die notwendigen Kommandos für die einzelnen Antriebseinheiten des Fahrzeuges und sendet diese an den Low Level Controller im CC. Der SC aktiviert den MC und empfängt zyklisch die Sensordaten. Dies ermöglicht eine redundante Abspeicherung der Messdaten auf zwei separaten Computern.

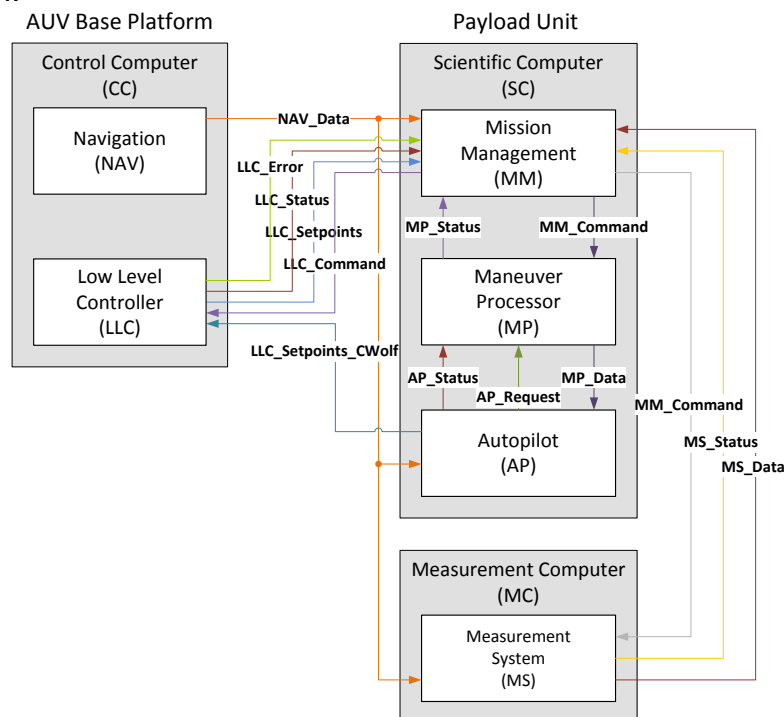


Abbildung 3.1: Schnittstellen und Datentelegramme zwischen den einzelnen Computern

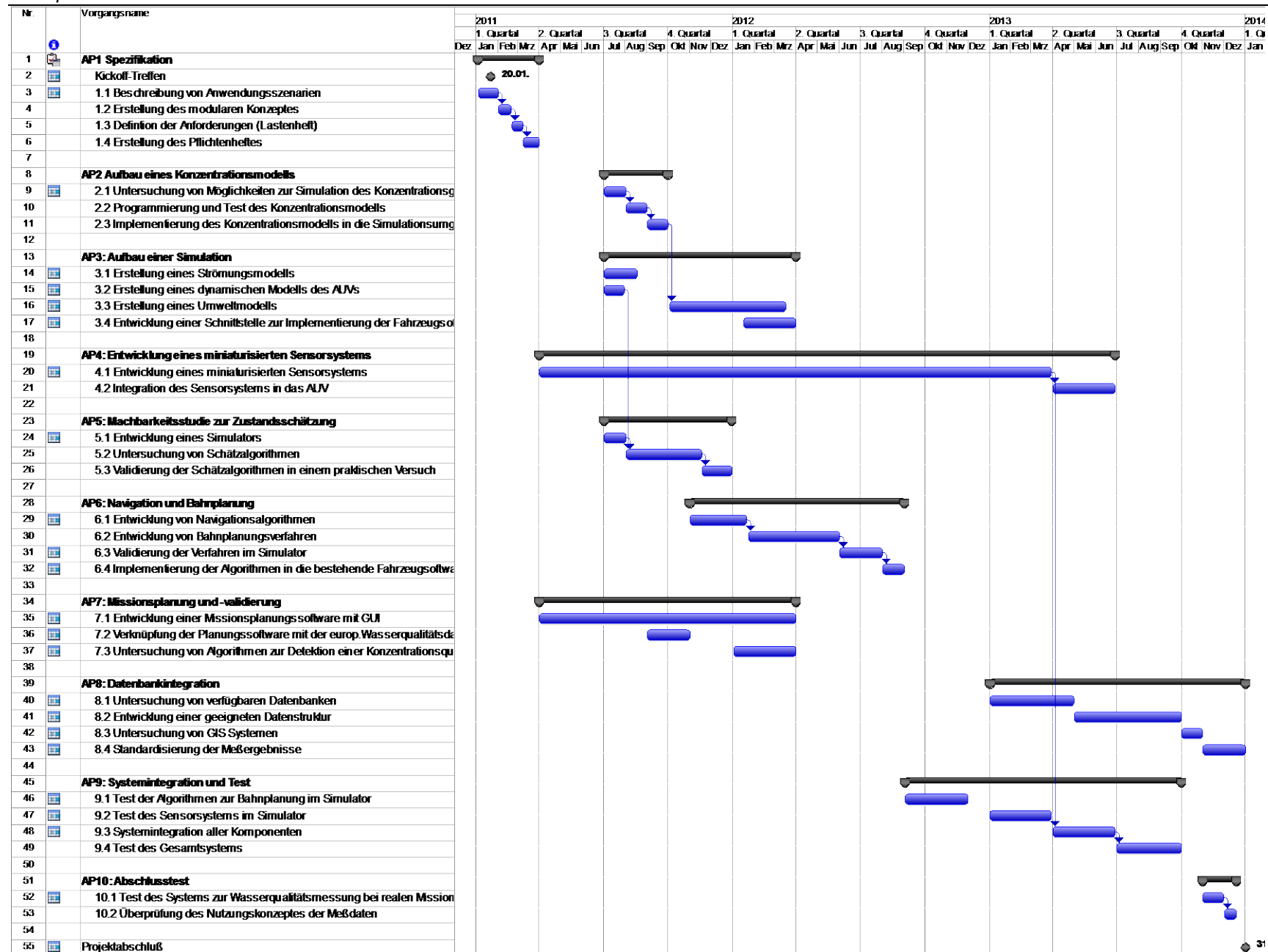


Abbildung 3.2: Arbeitsplan

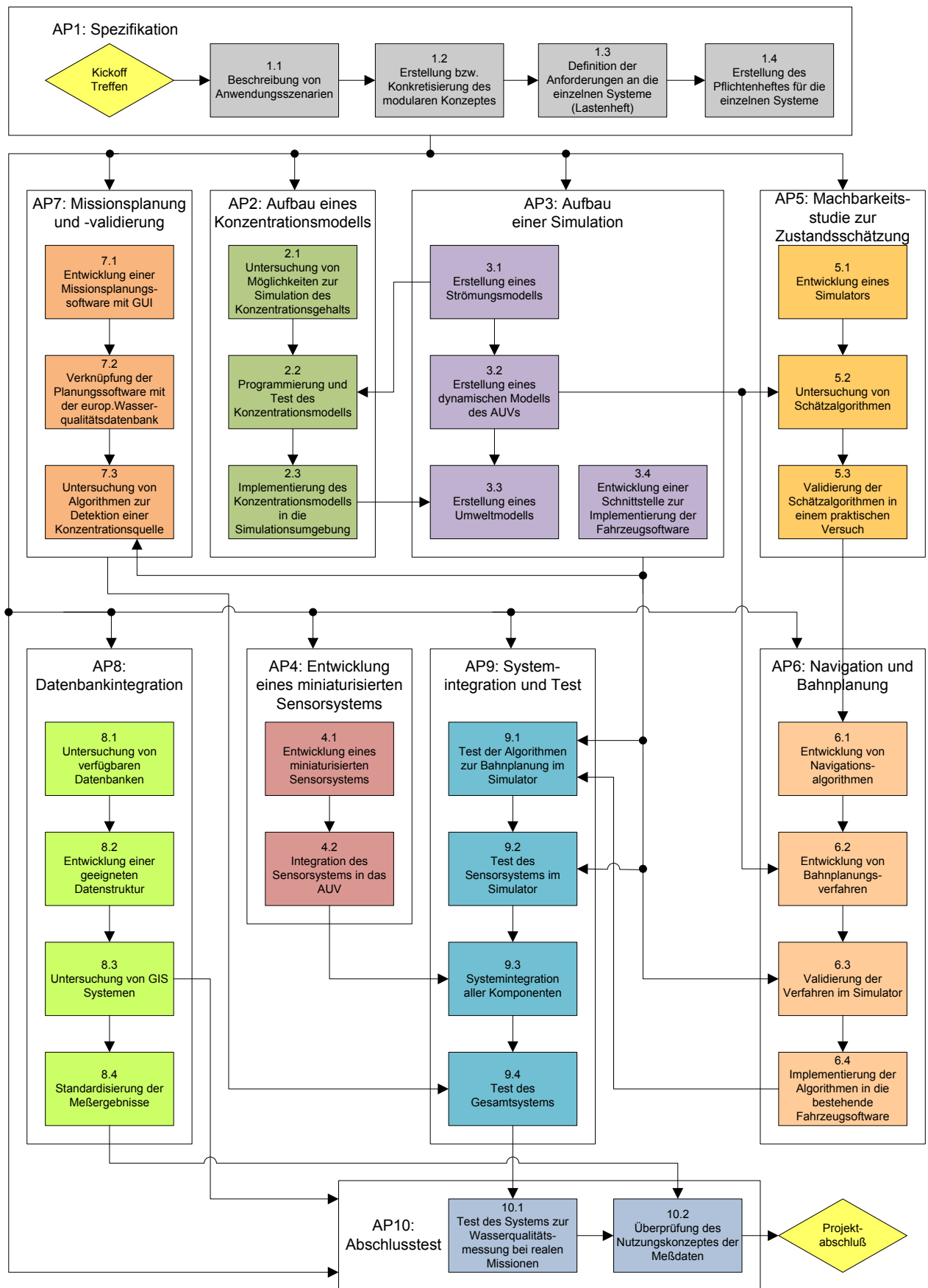


Abbildung 3.3: Pert Diagramm

3.2 Aufbau eines Konzentrationsmodells

Dieses Arbeitspaket resultiert aus den in der Antragstellung definierten thematischen Schwerpunkten. Neben der Untersuchung der Wasserqualität um Aquafarmen, bildete die Überwachung der Einspeisung von Abfällen norwegischer Bergwerke in lokale Fjorde den zweiten thematischen Schwerpunkt. Dieser Schwerpunkt wurde jedoch bei der Projektspezifikation (siehe Abschnitt 3.1) nicht favorisiert, so dass er nur simulativ im Rahmen von studentischen Arbeiten untersucht wurde. Dabei wurde eine Recherche zu bestehenden Konzentrationsmodellen durchgeführt und aussichtsreiche Ansätze in MATLAB programmiert und analysiert [7, 19, 20]. Die favorisierten Modelle, besitzen eine binäre Konzentrationsverteilung, wobei die Form der Konzentrationswolke durch die Seeströmungsrichtung definiert ist [16]. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Suche nur mit einem Fahrzeug durchgeführt werden soll, die interne Struktur der Konzentrationswolke unregelmäßig sein kann [20] und der favorisierte Ansatz aus [20] einen Schwellwert für die Konzentration verwendet, um die Schadstoffquelle zu detektieren.

Abbildung 3.4 zeigt den entwickelten Führungsalgorithmus, welcher unter MATLAB programmiert und unter Verwendung des entwickelten Konzentrationsmodells getestet wurde. Dabei gibt es mehrere Zustände in denen das Fahrzeug unterschiedliche Manöver ausführt. Wurde die Schadstoffwolke verlassen, findet eine spiralförmige Suche statt, um das Schadstoffgebiet wieder zu finden. In Abbildung 3.5 ist eine solche Suche anhand einer kegelförmigen Schadstoffverteilung dargestellt.

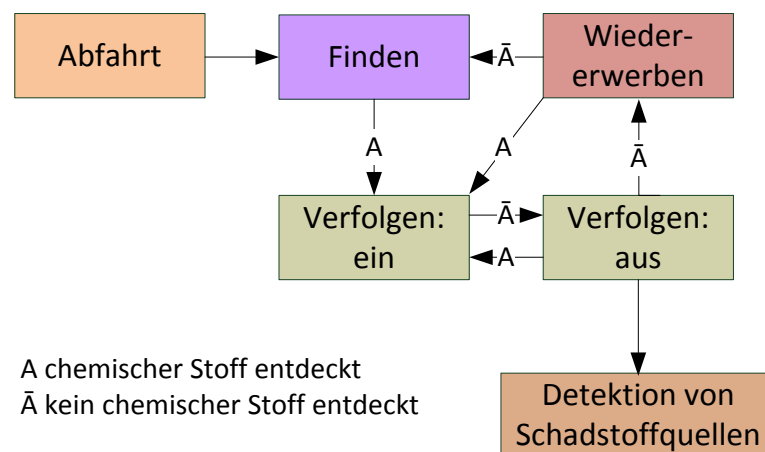


Abbildung 3.4: Führungsalgorithmus des AUVs zur Schadstoffdetektion

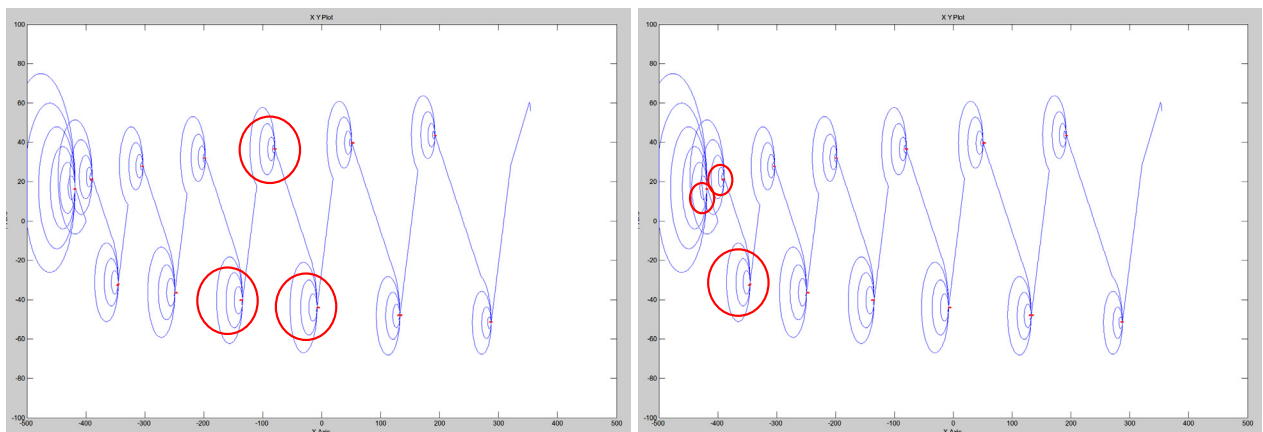


Abbildung 3.5: Bestimmung einer Schadstoffquelle

3.3 Aufbau einer Simulation

Der Test der einzelnen Softwarekomponenten ist eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung einer hohen Softwarequalität und sicherer Algorithmen. Hierfür wurde in diesem Projekt ein Testsystem entwickelt, welches aus mehreren Phasen besteht und als Kern eine Simulationsumgebung unter MATLAB/Simulink [21] beinhaltet. Das Testsystem dient zum Test der von SAG und CEG entwickelten Softwaremodule *ManeuverProcessor* und *Autopilot* und wird im Überblick im nächsten Abschnitt vorgestellt. Um den C++ Code der einzelnen Module unter Simulink testen zu können, wurde das in Abschnitt 3.6.3 beschriebene Interfacekonzept verwendet. Die Gründe und die einzelnen Implementierungsschritte zum Test des C++ Codes unter MATLAB/Simulink werden im Abschnitt 3.3.2 beschrieben. Eine Beschreibung des Fahrzeugsimulators welcher den Kern der Simulation bildet, erfolgt im Abschnitt 3.3.3.

3.3.1 Testphasen

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen zum Test der Module vorgestellt.

1) Modultest

Die erste Testphase beinhaltet den Test jedes einzelnen Moduls in Simulink. Dies erlaubt eine einfache Verifikation des Ein/Ausgangsverhaltens der Module unter Verwendung der vorhandenen IO Blöcke in Simulink. Es ist auch möglich Programmskripte zur Definition komplexer Testszenarien in MATLAB zu erstellen, welche dann automatisch das Simulink-System starten und nach Abschluss der Simulation eine Auswertung vornehmen.

2) Interaktion zwischen den Modulen

In dieser Phase werden Simulink-Systeme zur Überprüfung des geforderten Verhaltens zwischen den Modulen aufgebaut. Abbildung 3.65 zeigt ein solches Simulink-System zur Überprüfung der Interaktion zwischen *Autopilot* und *ManeuverProcessor*.

3) Kommunikationstest

Zum Test der einzelnen UDP-Schnittstellen werden in der Wrapper-S-Funktion des Moduls (siehe Abschnitt 3.3.2) anstelle der *SimulinkInputProcessor_C* und *SimulinkOutputProcessor_C* Klassen die *UDPInputProcessor_C* und *UDPOutputProcessor_C* Klassen verwendet (siehe Abschnitt 3.6.3). Das heißt, die einzelnen Module kommunizieren via UDP in Simulink.

4) Hardware-in-the-Loop (HIL) Test

Bei diesem Test laufen alle Module als ausführbare Dateien auf dem Scientific Computer (siehe Abbildung 3.1) und kommunizieren via UDP mit dem Fahrzeugsimulator (siehe Abschnitt 3.3.3), welcher unter Simulink ausgeführt wird.

5) Programmdateitest

Beim abschließenden Test werden alle ausführbaren Dateien im Zusammenspiel überprüft. Dazu übernimmt ein Simulator alle Funktionalitäten des AUV „CWolf“. D.h. dieses Programm generiert die Navigationstelegramme und empfängt die Aktuatortelegammes des *Autopiloten*. Für das dynamische Verhalten des AUVs wird der mittels MBD übersetzte C Code des Fahrzeugsimulators verwendet. Eine Socketverbindung zwischen dem Simulationsprogramm und der Virtuellen Realität CViewVR [11, 26] ermöglicht eine Überprüfung des Fahrzeugverhaltens während einer Mission. In allen Modulen werden die Nachrichten und Daten geloggt, um sie nach durchgeführter Simulation bzw. Mission (im realen Einsatz) analysieren zu können.

3.3.2 Modultest unter Simulink

Die ersten drei Testphasen des vorherigen Abschnittes verwenden Simulink zum Test der Module. Die Gründe für ein solches Vorgehen sind:

- Eine effektive Fehlersuche durch Anhängen des Visual Studio Debuggers an den MATLAB/Simulink Prozess, welcher außerhalb von Visual Studio läuft. (Jedes Modul hat ein eigenes Visual Studio Projekt zum Bau der C MEX S-Funktion unter Verwendung des moduleigenen C++ Codes. Dies erlaubt die Überwachung von einzelnen Programmvariablen sowie die Definition von Haltepunkten innerhalb des Modul-Codes im Debug-Modus.)
- Schrittweise Ausführung des Codes während des Debuggens.
- Abarbeitung der Module schneller als in Echtzeit. (Dies ist ein interessanter Fakt im Fall des Durchlaufs eines komplexen Testszenarios nach einer Programmänderung.)
- Separater Test der einzelnen Module.
- Einfache Analyse und Darstellung der Testergebnisse in MATLAB.
- Optimierung der Reglerparameter für den Autopiloten nach nutzerdefinierten Vorgaben.

Um den C++ Code der einzelnen Module in Simulink ausführen zu können, müssen die Module eine Klassenstruktur besitzen und eine Wrapper-S-Funktion geschrieben werden. So wird jedes Modul in einem separaten Simulink-Block abgearbeitet. Zur Erzeugung eines persistenten C++ Objektes eines Moduls in einer S-Funktion sind die folgenden Schritte notwendig:

1) Erzeugung eines Pointer-Work-Vectors zur Speicherung des C++ Objektes:

```
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    ...
    ssSetNumPWork(S, 1);
}
```

2) Erzeugung des Modulobjektes und Abspeicherung des Zeigers in den Pointer-Work-Vector:

```
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
    void **PWork = ssGetPWork(S);
    ...
    Autopilot_C* m_autopilot_p=new Autopilot_C();
    ...
    PWork[0] = m_autopilot_p;
}
```

3) Casten des Modulzeigers in jedem S-Funktionsaufruf, wo er benötigt wird:

```
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    void** PWork = ssGetPWork(S);
    ...
    Autopilot_C* m_autopilot_p=(Autopilot_C*)PWork[0];
    ...
    m_autopilot_p->ProcessEvent(m_navData_p);
    ...
}
```

4) Löschen des Objektes bei Beendigung der Simulation:

```
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
    void** PWork = ssGetPWork(S);
    ...
    Autopilot_C* m_autopilot_p=(Autopilot_C*)PWork[0];
    delete m_autopilot_p;
}
```

3.3.3 Fahrzeugsimulator

3.3.3.1 Dynamisches Fahrzeugmodell des AUVs

Das entwickelte Fahrzeugmodell basierte auf Vorarbeiten am Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau bei der Modellierung des AUVs „CWolf“ sowie auf langjährigen Erfahrungen am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik [6]. Die Erstellung des dynamischen Fahrzeugmodells war Teil der Masterarbeit von Ralf Taubert [24] und soll im Nachfolgenden kurz vorgestellt werden.

3.3.3.1.1 Modellansatz

Sämtliche mathematischen Herleitungen der Modellbildung gründen sich auf der nichtlinearen dynamischen 6DOF-Bewegungsgleichung (Gleichung (3.1)). Diese wird aus dem Newton-Lagrange-Ansatz entwickelt und stellt das dynamische Verhalten eines Starrkörpersystems als Kraft-Moment-Differential-Gleichungssystem dar [9].

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_E + \tau \quad (3.1)$$

mit	M	Massenträgheit
	$C(v)$	Coriolis- und Zentripetalkraft
	$D(v)$	Dämpfung
	$g(\eta)$	Gravitation
	τ_E	Umwelteinflüsse
	τ	Aktuatoren

Die Massenträgheitsmatrix M setzt sich additiv aus der Starrkörper-Trägheitsmatrix M_{RB} und der Trägheitsmatrix der additiven Massen M_A :

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.2)$$

zusammen. Die additiven Massen beschreiben die zusätzliche Arbeit an der Flüssigkeit, um das Fahrzeug im Wasser beschleunigen zu können. D.h. die Flüssigkeit, die das Wasserfahrzeug umgibt, wird während der Bewegung verdrängt bzw. beschleunigt, wozu Arbeit notwendig ist. Eine adäquate Aufteilung zwischen Starrkörper und virtuellen Massen gibt es auch bei den Coriolis und Zentripetaltermen, die die $C(v)$ -Matrix bilden:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (3.3)$$

Die hydrodynamische Dämpfung $D(v)$, die auf das Wasserfahrzeug wirkt, hat verschiedene Ursachen und lässt sich im Allgemeinen in vier Gruppen einteilen:

$$D(v) = D_P(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v). \quad (3.4)$$

mit	$D_P(v)$	Dämpfung aufgrund erzwungener Körperschwingungen (Oszillationen)
	$D_S(v)$	lineare (laminar) und quadratische (turbulent) Oberflächenreibung
	$D_W(v)$	Wellen-Strömung-Dämpfung
	$D_M(v)$	Dämpfung aufgrund von Wirbelbildung (vortex shedding)

Zur Vereinfachung wird der Einfluss durch Schwingungsdämpfung $D_P(v)$ und Wellen-Strömung-Dämpfung $D_W(v)$ vernachlässigt und die so resultierende hydrodynamische Dämpfung in einen linearen (durch laminare Umströmung) und nichtlinearen Term (durch turbulente Umströmung) geteilt.

Neben den Kräften durch Masse, Massenträgheit, Winkelbeschleunigung und Dämpfung spielen Auf- und Abtriebseffekte eine wesentliche Rolle bei der Modellierung von Wasserfahrzeugen. Die Gewichtskraft (Abtrieb) W deutet dabei immer zum Erdmittelpunkt und deshalb im erdfesten Koordinatensystem in z_e -Richtung. Die Auftriebskraft B ist dieser genau entgegen gerichtet und zeigt damit in negative z_e -Richtung (siehe Abbildung 3.6).

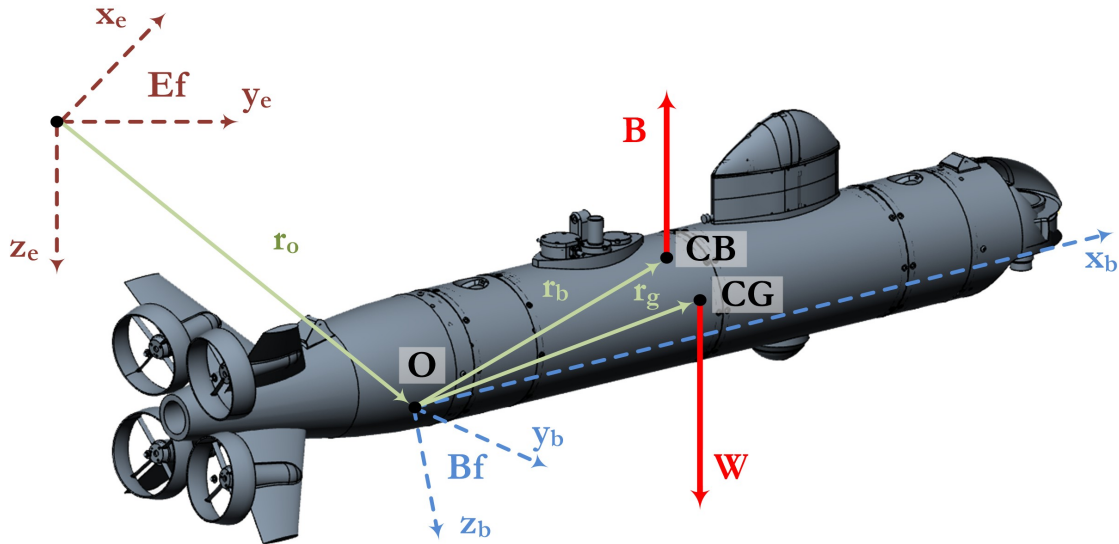


Abbildung 3.6: Darstellung der Auftriebs- und Abtriebskräfte nach [9, Seite 75]

Die Umwelteinflüsse τ_E , welche auf das Fahrzeug wirken, lassen sich in drei Gruppen einteilen. Diese sind die Einflüsse durch Wind, Wellen und Seeströmung. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug hauptsächlich in größeren Tiefen operiert, lassen sich die ersten beiden Einflüsse vernachlässigen. Der Einfluss der Seeströmung muss bei der Aufstellung der 6DOF-Bewegungsgleichung Berücksichtigung finden. Dies geschieht durch die Verwendung unterschiedlicher Geschwindigkeiten in der Starrkörper- und Hydrodynamik. Zur Darstellung der Bewegung mittels Starrkörperdynamik M_{RB} und $C_{RB}(\nu)$ ist die absolute Fahrzeuggeschwindigkeit ν notwendig. Dagegen wirkt sich die Relativgeschwindigkeit ν_r , welche das Ergebnis der Subtraktion der Strömungsgeschwindigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit im körperfesten Bezugssystem ist, auf die additiven (M_A , $C_A(\nu_r)$) und dämpfenden Terme $D(\nu_r)$ aus.

Mit der Integration des Strömungsverhaltens wird die Umwelteinflussgröße τ_E aus Gleichung (3.1) eliminiert und es ergibt sich:

$$\underbrace{M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu}_{\text{Starrkörper}} + \underbrace{M_A\dot{\nu}_r + C_A(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r}_{\text{Hydrodynamik}} + \underbrace{g(\eta)}_{\text{Hydrostatik}} = \tau \quad (3.5)$$

Wird nun angenommen, dass der Strömungsvektor sich nur langsam ändert, vereinfacht sich die 6DOF - Bewegungsgleichung wegen $\dot{\nu}_c \approx 0 \Rightarrow \dot{\nu}_r \approx \dot{\nu}$ [3] zu:

$$(M_{RB} + M_A)\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu + C_A(\nu_r)\nu_r + D(\nu_r)\nu_r + g(\eta) = \tau \quad (3.6)$$

Zur Steuerung eines Unterwasserfahrzeuges können unterschiedliche Arten von Aktuatoren, wie Propeller, Thruster oder Ruder eingesetzt werden. Die erzeugte Kraft der Aktuatoren ist je nach Art abhängig von Propellerdrehzahl, Ruderstellung und Flossenausrichtung, welche im Stellgrößenvektor u_A vereinigt sind. Die Position der Aktuatoren bezüglich des Fahrzeug-Schwerpunktes erzeugt zusätzlich zur Kraftwirkung ein oder mehrere Momente. Im 6DOF-Fall entsteht durch Superposition aller Aktuatoren der Kraft-Momenten-Vektor τ , der alle Einflüsse durch die Antriebselemente beschreibt:

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r \times f \end{bmatrix} = B(\nu)u_A \quad \text{mit} \quad \tau \in \mathbb{R}^n, u_A \in \mathbb{R}^r \quad (3.7)$$

Beispielhaft umfasst die Matrix B in Abbildung 3.7 drei Aktuatoren.

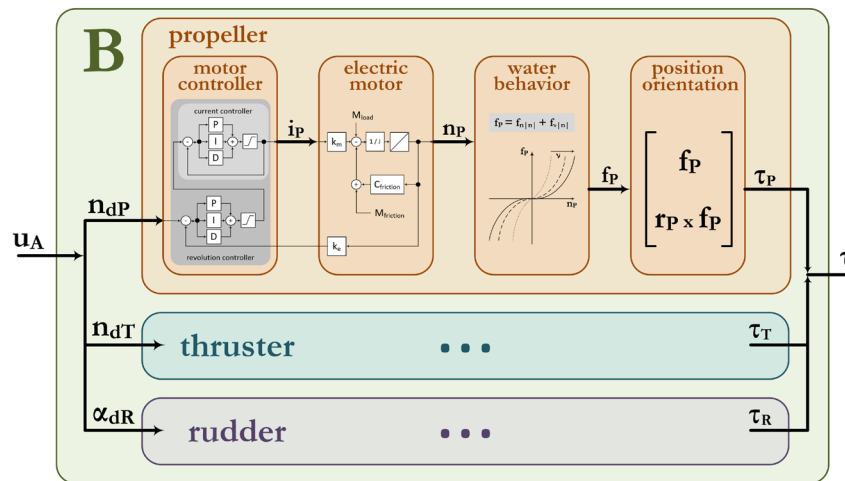


Abbildung 3.7: Blockschaltbild der B-Matrix mit drei Aktuatoren [24]

Der Propeller und das Strahlruder werden mit Drehzahlen (n_{dP} , n_{dT}) beaufschlagt, wohingegen das Ruder einen Winkel α_{dR} als Stellgröße erhält. Im Fall des Propellers erzeugt der Motor-Kaskaden-Regler bestehend aus Strom- und Drehzahlregler einen Strom i_P , der ein Drehmoment im Motor verursacht. Abzüglich des Lastdrehmoments M_{load} und der Reibungseinflüsse $M_{friction}$ erreicht der Propeller unter Einfluss der Trägheit J die gewünschte Drehzahl n_P . Um die Beziehung zwischen Drehzahl und Kraftwirkung f_P zu beschreiben, dient eine nichtlineare quadratische Motorkennlinie. Neben konstruktiven Eigenschaften des Propellers gehen dort die Strömungsgeschwindigkeit und Dichte des umströmenden Wassers ein. In Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit verschiebt sich diese Kurve. Die sich ergebende Kraft schlüsselt sich in die einzelnen Richtungskomponenten auf und erzeugt je nach Lage am Fahrzeug Drehmomente τ_P , die sich gemeinsam mit Strahlruder und Ruderausgängen (τ_T , τ_R) zu dem Gesamtkraft-Moment-Vektor τ zusammensetzen. Ziel dieser Beschreibung ist eine Verknüpfung der Stellgrößen mit der für die 6DOFBewegungsgleichung (3.6) notwendigen Kraft-Moment-Darstellung:

$$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D(v_r)v_r + g(\eta) = B(v)u_A. \quad (3.8)$$

Abbildung 3.8 zeigt das so entstehende Blockschaltbild mit anschließender Transformation ins erdfeste Koordinatensystem.

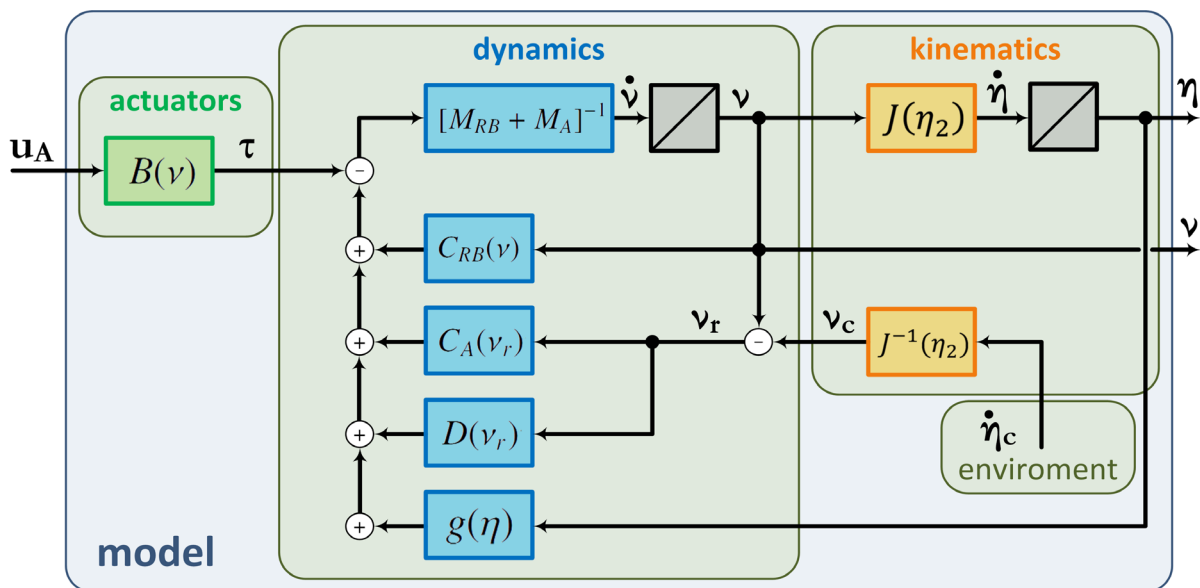


Abbildung 3.8: Allgemeine Blockschaltbild-Darstellung des AUV „CWolf“-Modells nach [8, Seite 106]

3.3.3.2 Modellierung und Parameteridentifikation

Basierend auf die einzelnen Beziehungen des Gleichungssystems (3.8) soll eine realistische Nachbildung des dynamischen Verhaltens des AUVs „CWolf“ erfolgen. Eine Forderung besteht dabei in der Erstellung eines modularen Systems in der Entwicklungsumgebung MATLAB/Simulink [21], dessen Konfiguration durch die Veränderung der Modellparameter über Masken benutzerfreundlich eingestellt werden kann. Im Ergebnis soll ein Fahrzeugmodell zur Verfügung stehen, das mittels Simulationen den Reglerentwurf erleichtert und damit die Parametrierung des Autopiloten ohne aufwendige Seeveruche ermöglicht [24]. Abbildung 3.9 zeigt die einzelnen Schritte der Modellierung. Dabei werden die Parameter der einzelnen Gleichungsterme unter Verwendung von geometrischen Näherungen, konstruktiven Beziehungen, Heuristiken und Experimenten bestimmt. Jeder Gleichungsterm entspricht dabei einem eigenen Modul in Simulink (siehe Abbildung 3.19). Diese sind in einer Simulink-Bibliothek hinterlegt und erlauben so den Aufbau komplexer hierarchischer Systeme, die durch ihre Übersichtlichkeit und eine einfache Erweiterbarkeit charakterisiert sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse bei der Parameteridentifikation vorgestellt. Für eine detailliertere Beschreibung sei hier auf die Masterarbeit von Ralf Taubert [24] und auf [25] verwiesen.

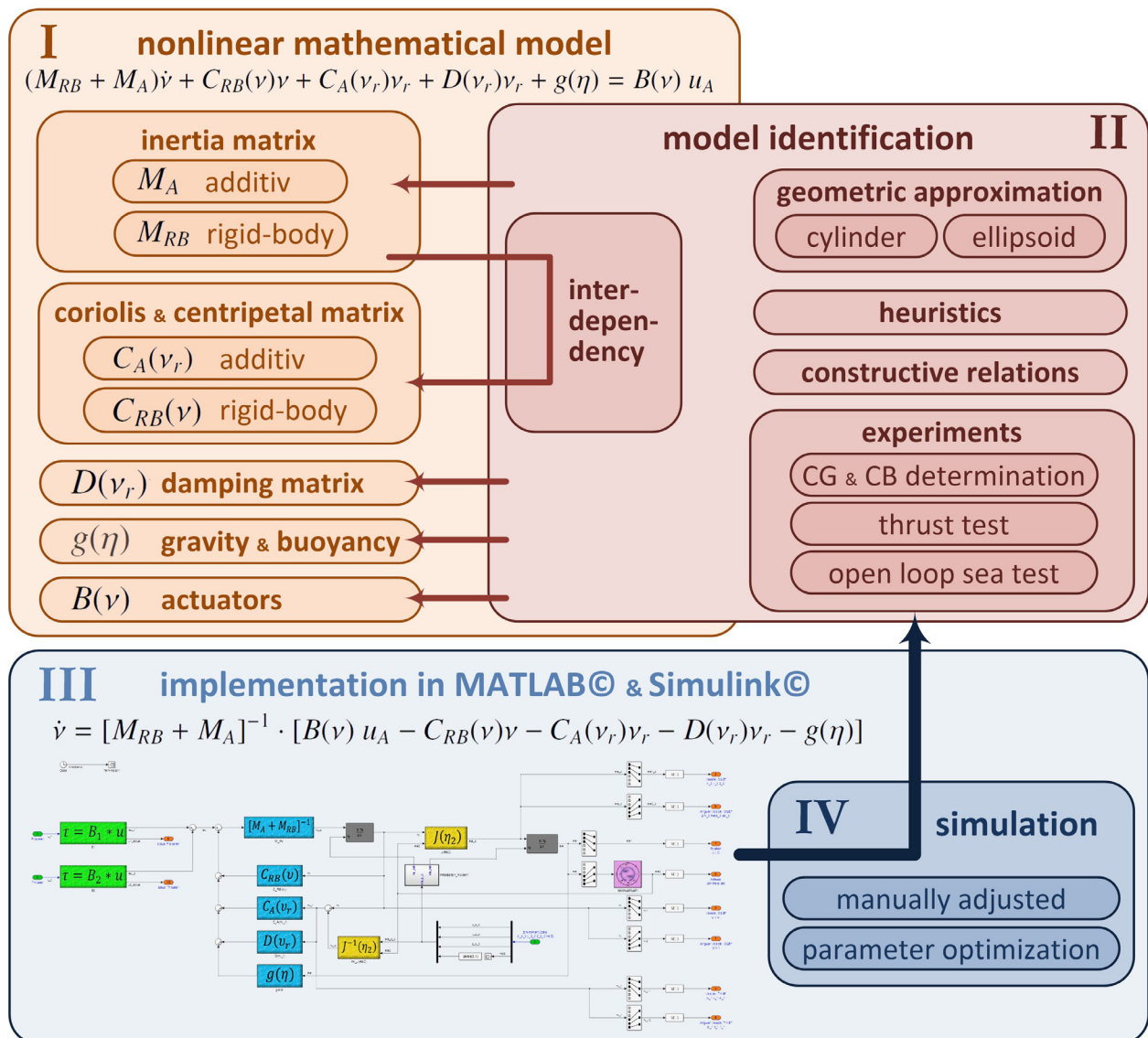


Abbildung 3.9: Schematischer Ablauf der Modellierung [24]

3.3.3.2.1 Aktuatoren

Das AUV „CWolf“ wird durch vier am Heck befindliche Propeller angetrieben. Diese Propeller gestatten gleichzeitig eine Drehung des Fahrzeuges um seine horizontale und vertikale Achse was ein Manövrieren des Fahrzeuges ohne Rudereinheiten ermöglicht. Durch die senkrecht angebrachten Hubtriebwerke ist ein Auf- und Abtauchen im Stand möglich.

Um die Kräfte und Momente der einzelnen Antriebe bestimmen zu können, führte die SAG Schleppversuche im AST-Testbecken mit Unterstützung der Fraunhofer Arbeitsgruppe durch. Abbildung 3.10 zeigt den Versuchsaufbau im AST-Testbecken. Dabei wurde das Fahrzeug in einem Gestell aus Aluminiumprofilen fixiert, um ein unkontrolliertes seitliches Ausbrechen während der Tests zu verhindern. Am Rumpf des AUV „CWolf“ ist an der Position des ausgemessenen Schwerpunktes eine Schelle mit Ösen angebracht. Daran erfolgt die Befestigung der Zugseile, die über Umlenkrollen mit einer Kraftmessdose außerhalb des Testbeckens verbunden sind. In vier Messungen wurden die Aktuatoren über den gesamten positiven und negativen Drehzahlbereich angesteuert und die sich ergebene Gesamtkraft gemessen:

- positive x-Richtung (Heck-Propeller vorwärts)
- negative x-Richtung (Heck-Propeller rückwärts)
- positive z-Richtung (Hubtriebwerke abwärts)
- negative z-Richtung (Hubtriebwerke aufwärts).

Aus diesen Gesamtkräften wurden unter Beachtung der geometrischen Einbaulage der Propeller bzw. Hubtriebwerke die sich ergebenden Einzelkräfte der Antriebe ermittelt. Zur Bestimmung des funktionellen Zusammenhangs zwischen der anliegenden Drehzahl n und der erzeugten Kraft F wurde die direkte Regression für einen Modellansatz 2. Ordnung verwendet. Dabei erfolgte die Ermittlung eines Parametersatzes jeweils für die positive und negative Drehrichtung. Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 zeigen die so ermittelten Kennlinien für die Heckpropeller und Hubtriebwerke.

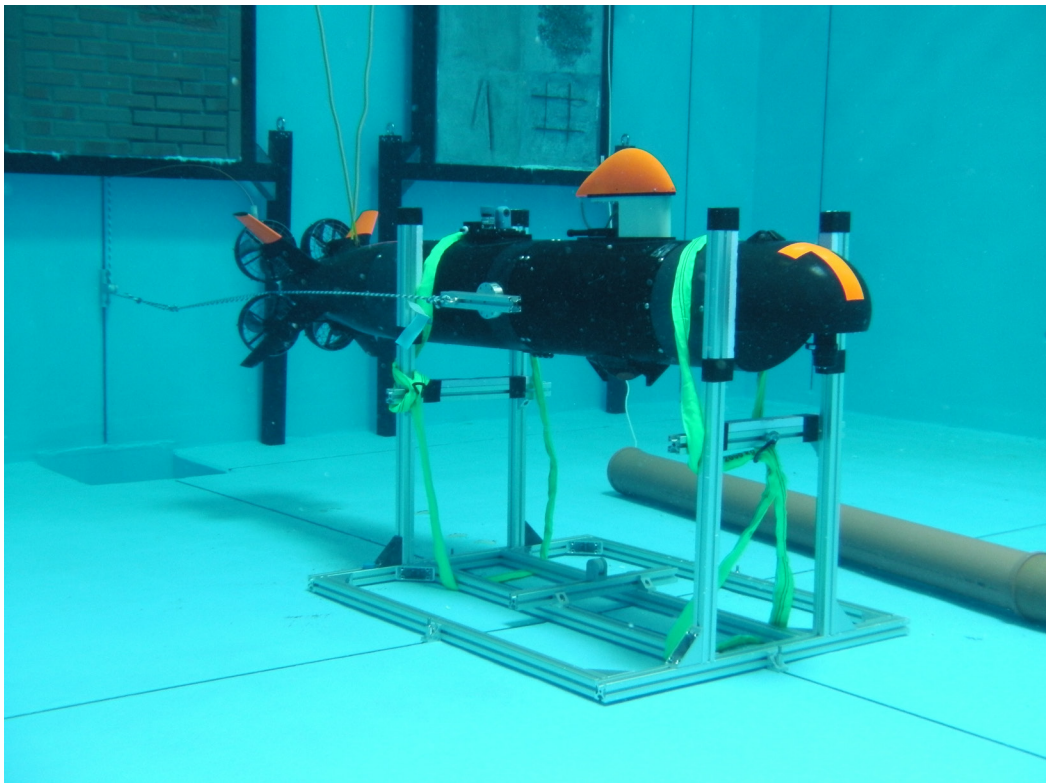


Abbildung 3.10: Aufbau im AST-Testbecken für die Vermessung der Kennlinien der Antrieb

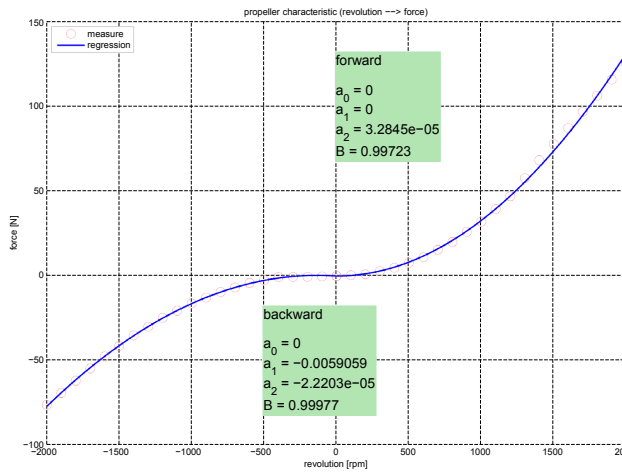


Abbildung 3.11: Motorkennlinie der Heck-Propeller geschätzt durch direkte Regression

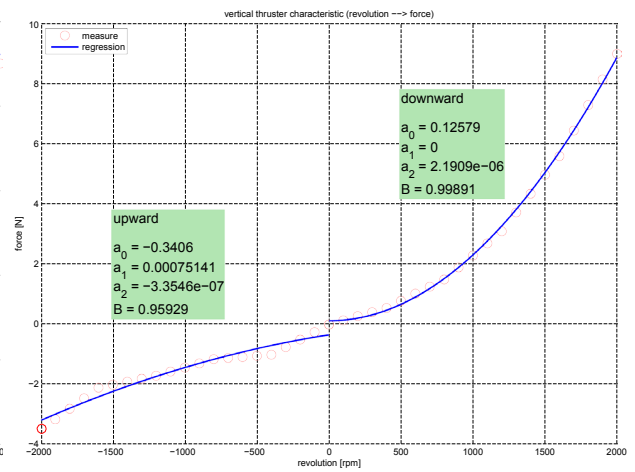


Abbildung 3.12: Motorkennlinie der Hubtriebwerke geschätzt durch direkte Regression

3.3.3.2.2 Starrkörperdynamik

Die Bestimmung der Masse m erfolgt durch Wiegen des Fahrzeuges. Für die Ermittlung der Massenträgheitsmomente wurde eine homogene Dichteverteilung im Fahrzeug angenommen und das Fahrzeug durch einen homogenen Kreiszylinder approximiert (siehe Abbildung 3.13). Unter der Annahme, dass der Massenschwerpunkt im körperfesten Koordinatensystem liegt ($CG=0$) und die Deviationsträgheitsmomente ($I_{xy}=I_{xz}=I_{yz}=0$) null sind ergibt sich für die Starrkörper-Trägheitsmatrix M_{RB} eine Diagonalstruktur:

$$M_{RB} = -\text{diag}\{m \quad m \quad m \quad I_x \quad I_y \quad I_z\}. \quad (3.9)$$

Die Bestimmung der Starrkörper-Coriolis- und Zentripetalmatrix $C_{RB}(\nu)$ kann durch Einsetzen der Elemente der Starrkörper-Trägheitsmatrix M_{RB} , der körperfesten Linear- und Winkelgeschwindigkeiten ν_1 und ν_2 sowie des Ortsvektors r_g (Beschreibung des Schwerpunktes, siehe Abbildung 3.6) in nachfolgender Gleichung [9]:

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(\nu_1) - mS(\nu_2)S(r_g) \\ mS(\nu_1) - m(r_g)S(\nu_2) & -S(I_o \nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

gelöst werden.

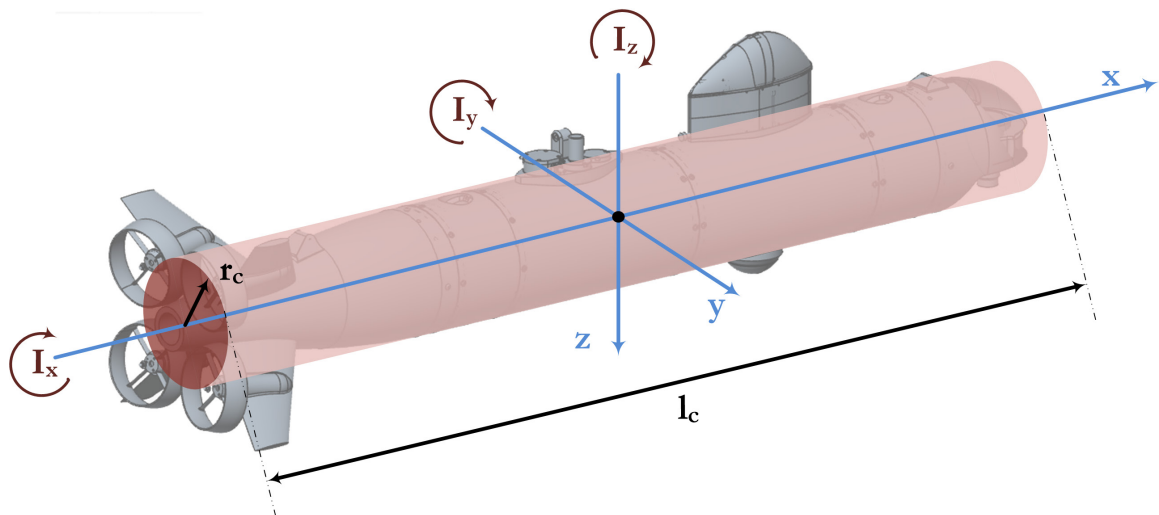


Abbildung 3.13: Darstellung der geometrischen Annäherung zum homogenen Kreiszylinder

3.3.3.2.3 Hydrodynamik

Die Modellierung der hydrodynamischen Terme erfolgte durch bekannte Heuristiken. Für die Modellierung der additiven Massenträgheiten M_A wurden Koeffizienten definiert, die einen Bezug zu den entsprechenden Starrkörpertermen besitzen:

$$M_A = -\text{diag}\{C_{X_u} m \quad C_{Y_v} m \quad C_{Z_w} m \quad C_{K_p} m \quad C_{M_\theta} I_y \quad C_{N_r} I_z\}. \quad (3.11)$$

Für die Bestimmung der linearen Dämpfungsterme wurden die folgenden Koeffizienten festgelegt:

$$D_{lin}(v_r) = -\text{diag}\{X_u \quad X_v \quad Z_w \quad K_p \quad M_q \quad N_r\}. \quad (3.12)$$

Die quadratischen Dämpfungsterme wurden aus den bekannten hydrodynamischen Beziehungen bei der Umströmung von Standardformen ermittelt. Die dabei zu bestimmenden Widerstandskoeffizienten waren, zusammen mit den oben beschriebenen Koeffizienten, Bestandteile einer Parameteroptimierung. Da die einzelnen Koeffizienten nur einen Einfluss in einer Zustandsgröße haben, erfolgte eine fünfstufige Parameteroptimierung unter Verwendung der FCD-Toolbox. Dabei wurden spezielle Manöver (Vorwärtsfahrt, Kurvenfahrt) durch definiertes Beaufschlagen der einzelnen Antriebe durchgeführt und die Zustandsgrößen aufgezeichnet. Dann erfolgte eine Optimierung der Koeffizienten, die einen direkten Einfluss auf das Manöver haben (siehe untere Abbildungen). Abschließend werden noch einmal alle Koeffizienten unter Verwendung aller Manöververfahren optimiert. Als Optimierungsverfahren wurden Evolutionsstrategien und der Simplexalgorithmus eingesetzt.

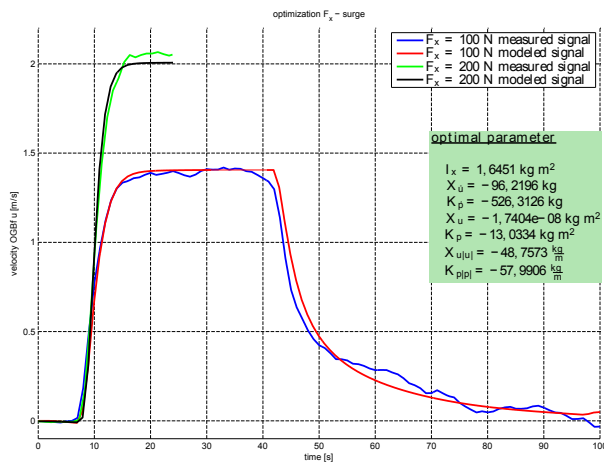


Abbildung 3.14: Optimierung durch Vorwärtsfahrt anhand der Geschwindigkeit

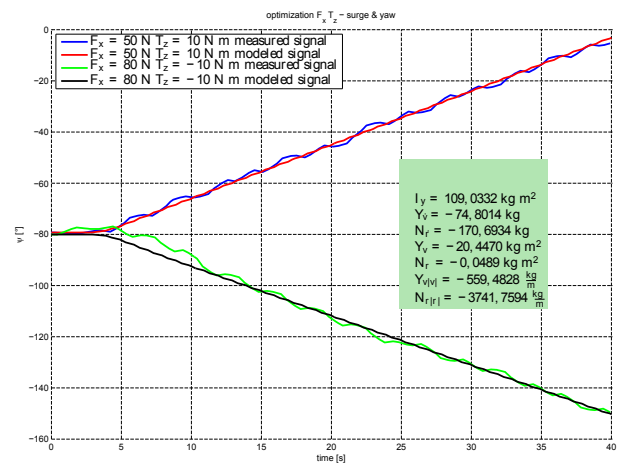


Abbildung 3.16: Optimierung der Kurvenfahrt anhand des Kurswinkels

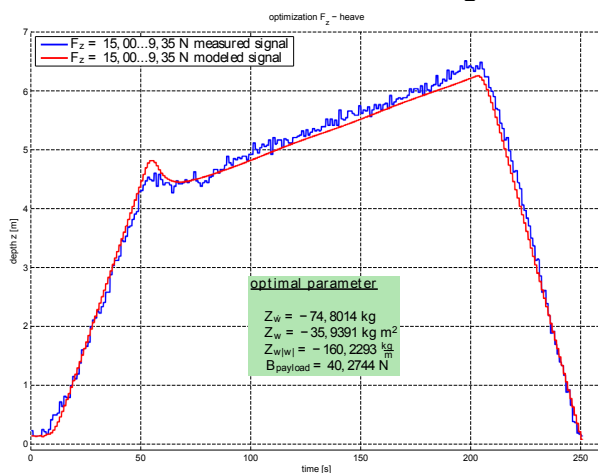


Abbildung 3.15: Optimierung durch Tauchfahrt mittels HTWs anhand der Tiefe

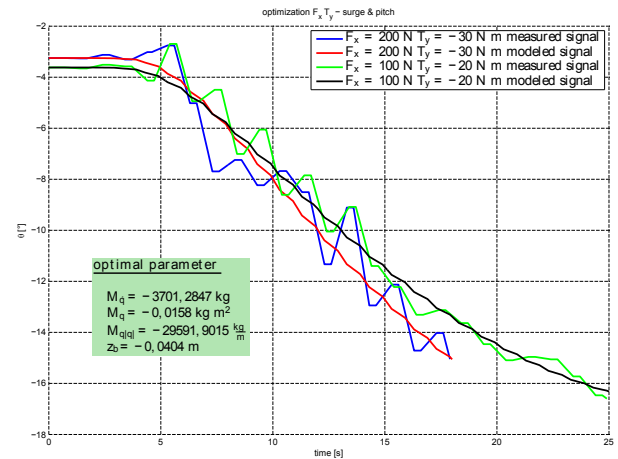


Abbildung 3.17: Optimierung der Tauchfahrt anhand der Nicklage

3.3.3.2.4 Simulinksystem

Die Abbildung 3.19 zeigt das erstellte Fahrzeugmodell unter Simulink. Dabei ist deutlich der modulare Aufbau der einzelnen Terme aus Gleichung (3.8) zu erkennen. Neben der Verwendung dieses Modells zum Reglerentwurf und zum Test der Fahrzeugsoftware unter Simulink wurde es mittels MBD in Analogie zum Autopiloten (siehe Abschnitt 3.6.2) in C übersetzt und in den AST-Fahrzeugsimulator eingebunden. So war ein realistischer Programmdateitests (5. Testphase in Abschnitt 3.3.1) möglich.

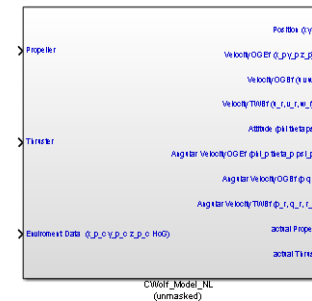


Abbildung 3.18: Simulinkblock des Fahrzeugmodells

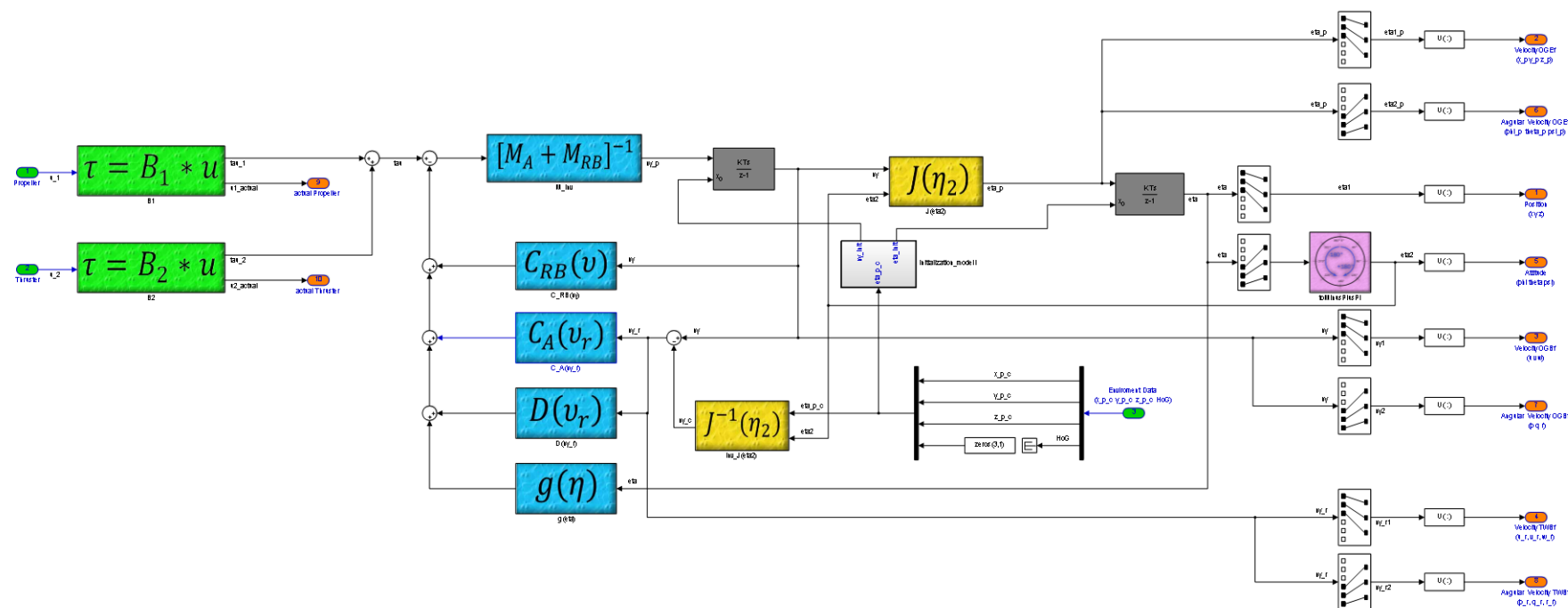


Abbildung 3.19: Simulinksystem des Fahrzeugmodells

3.4 Entwicklung eines miniaturisierten Sensorsystems

3.4.1 Ausgangssituation

Die Firma -4H- JENA engineering GmbH (4HJE) entwickelt und fertigt PC-basierte Systeme zur langfristigen Überwachung von Gewässerqualitätsparametern. Meist wird hierfür eine Messstrecke verwendet. Das zu untersuchende Wasser wird mittels einer Pumpe über ein Rohrleitungssystem durch verschiedene Messkammern geführt. Hier detektieren die eingesetzten Sensoren die entsprechenden Parameter, z.B. Temperatur, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit (daraus berechnet: Salzgehalt) und Nitratkonzentration.

Tabelle 1: Gemessene Parameter und entsprechendes Messprinzip

Parameter	Messprinzip
Nitrat	UV-Absorption
Sauerstoff	Optisch (LDO)
Leitfähigkeit	Magnetisch-Induktiv
Temperatur	Thermistor

Einige dieser Parameter sind mit Standardsensorik, die auf dem Markt verfügbar ist, gut detektierbar (z.B. Temperatur, Sauerstoff, Leitfähigkeit). Die Analyse anderer Parameter (z.B. Nitrat) gestaltet sich schwieriger. Zwar sind hier über nasschemische Verfahren sehr genaue Analysen möglich, jedoch eignet sich dieses Verfahren nicht für den mobilen Einsatz unter Wasser. Von 4HJE wurde schon im Vorfeld ein optisches Verfahren umgesetzt, das aber zu Beginn des Projektes auch noch nicht für den mobilen Einsatz geeignet war.

3.4.2 Aufgabenstellung

Die Entwicklung des miniaturisierten Sensorsystems gliedert sich somit in folgende Teilaufgaben:

1. Mechanik
 - a. Integration der benötigten Sensorik, Elektronik und Elektrik in ein Rumpfsegment vorgegebener Größe.
 - b. Redesign der Nitratmessung für den mobilen Einsatz.
2. Elektrik
 - a. Auswahl bzw. Entwicklung geeigneter Komponenten für Datenerfassung und Energieverteilung.
 - b. Einbindung in das elektrische Gesamtkonzept.
3. Software
 - a. Steuerung und Bedienung der Sensorik.
 - b. Aufnahme und Weiterleitung der erfassten Daten.
 - c. Neufassung der Software für die Nitratmessung.
 - d. Umsetzung des Daten- und Informationsaustauschs mit der übergeordneten Steuerung.

3.4.3 Mechanik

3.4.3.1 Integration der Komponenten in das Rumpfsegment

2.4.3.1.1 Aufbau und Größe des Rumpfsegments

Das Rumpfsegment ist den Außenabmaßen nach an den gesamten Tauchkörper angepasst. Er ist in den Rumpf eingefügt (in entsprechende ringförmige Adapterstücke) und wird jeweils durch einen radialen Dichtring abgedichtet und radial verschraubt.

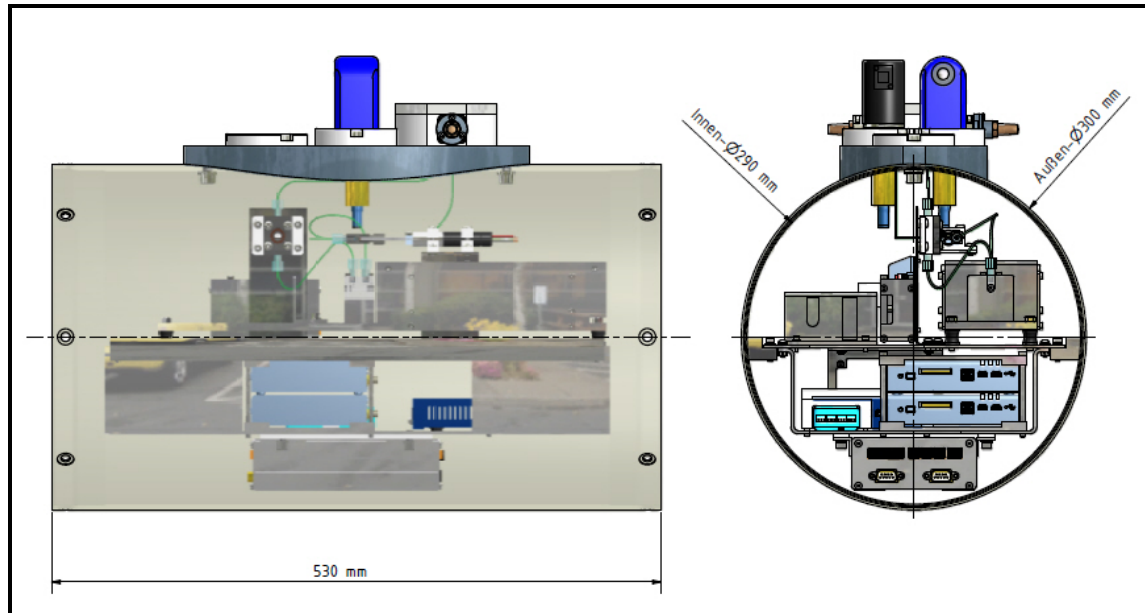


Abbildung 3.20: Abmaße des Rumpfsegments

2.4.3.1.2 Elemente und Messapparaturen

Die hier aufgeführte Sensorik lässt sich von außen warten und wechseln, ohne dass es erforderlich ist, das Segment aus dem Tauchkörper auszubauen.

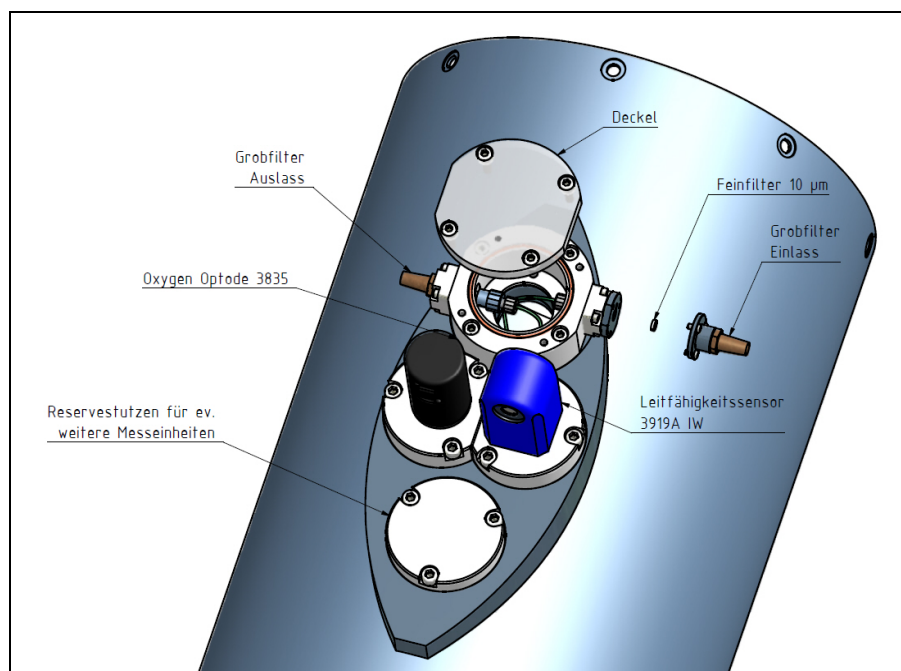


Abbildung 3.21: Außerhalb des Tauchkörpers befindliche Elemente

Ebenso kann ein Wechsel der Filter (Einlass – Fein- und Grobfilter, Auslass – Grobfilter) erfolgen. Der Auslass ist durch ein Rückschlagventil gesichert.

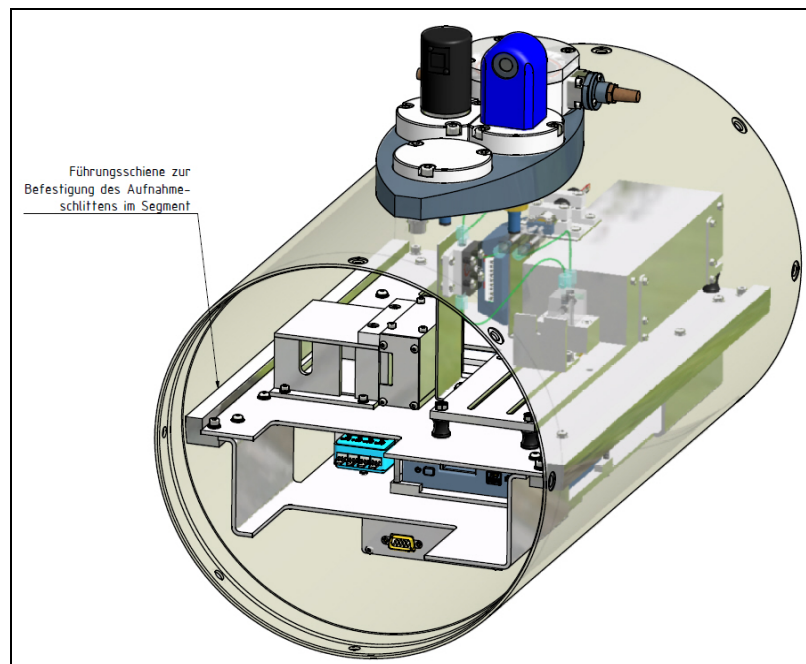


Abbildung 3.22: Kombination Außen- und Innenelemente

Die innen liegenden Messapparaturen und die dazu gehörige Elektronik sind auf einem 2-etagigen Trägerschlitten angeordnet, der auf 2 Führungsschienen verschraubt ist.

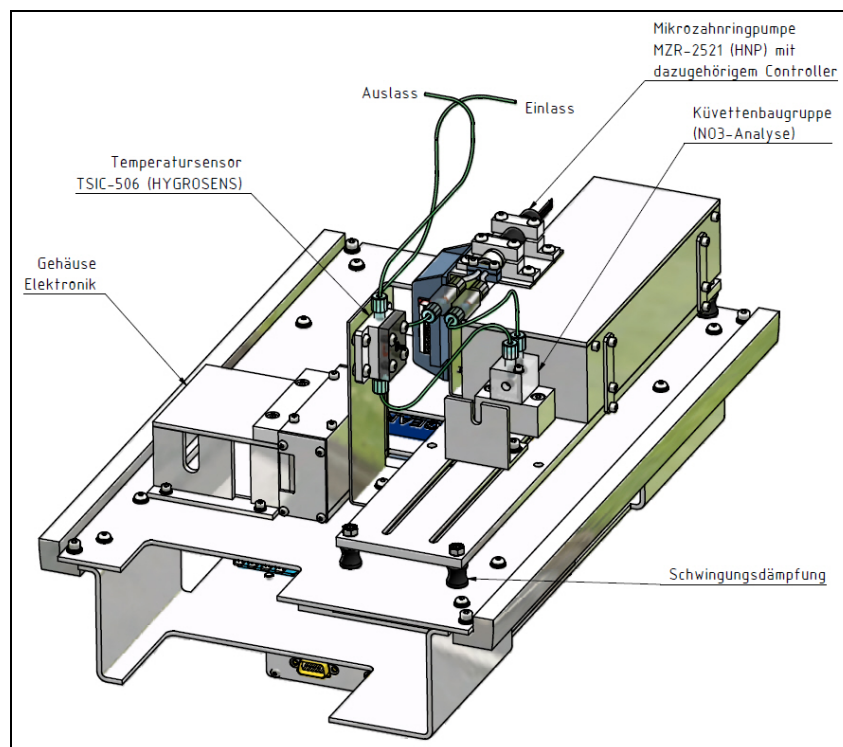


Abbildung 3.23: Innen liegende Messapparaturen, obere Etage

Der Weg des zu analysierenden Wassers geht wie folgt:
 Einlass (mit Grob- und Feinfilter) → Mikrozahnpumpe → Küvettenbaugruppe (NO_3 -Analyse) → Temperatursensor möglichst nah an der Analyse → Auslass mit Rückschlagventil und Grobfilter. Die Verschlauchung erfolgt mit PFA-Schlauch Außendurchmesser 1/16" (Ausnahme Adaptierung an Pumpe 1/8").

Die Kabelführung erfolgt unter der 2. Etage, die Kopplung zu den anderen Segmenten erfolgt über ODU-Stecker und –Buchsen.

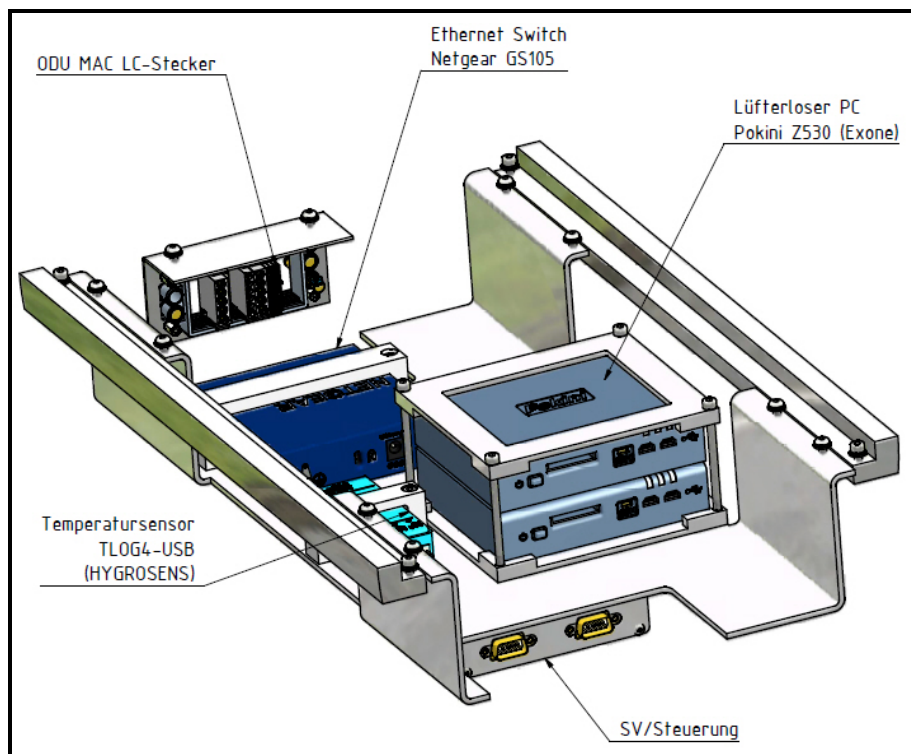


Abbildung 3.24: Innen liegende Messapparaturen, untere Etage

3.4.3.2 Redesign Nitratmessung

Die zu Projektbeginn vorhandene Analysestrecke zur optischen *in situ*-Detektion von Nitrat wurde von 4HJE entwickelt. Jedoch entsprach die zu Beginn eingesetzte Software nicht mehr dem aktuellen Stand. Die Hardware war für den Einsatz im Labor entwickelt, nicht für mobile Zwecke.

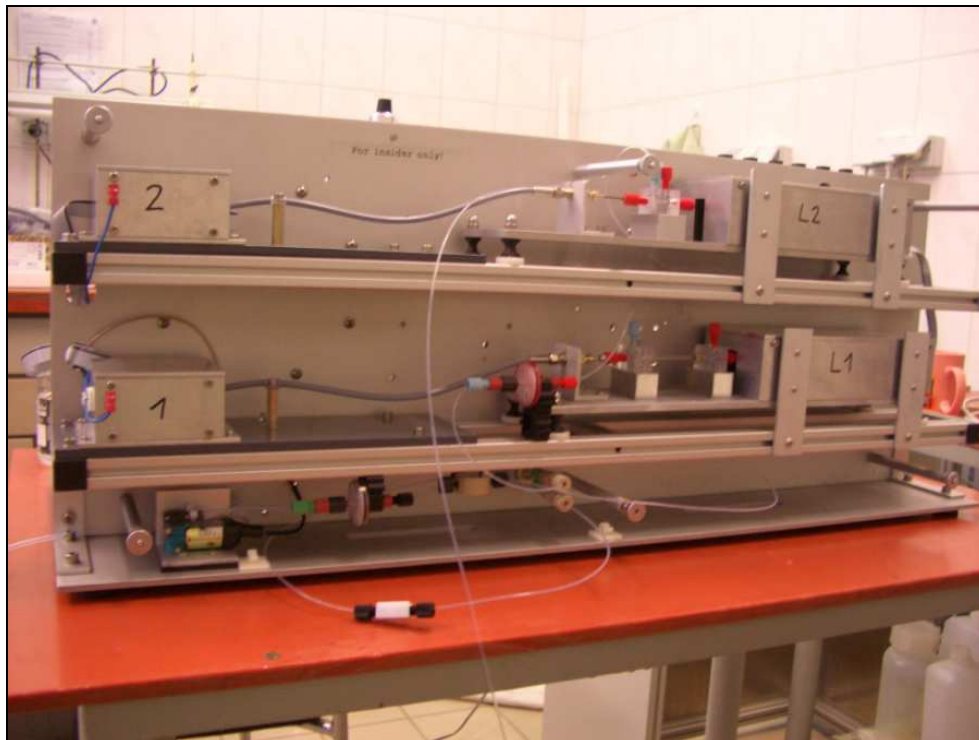


Abbildung 3.25: Nitratmessung im Labor

3.4.3.2.1 Prinzip der optischen Nitratmessung

Wie bereits erwähnt, handelt es sich hierbei um ein optisches Verfahren. Das zu messende Medium (Wasser) wird über ein Schlauchsystem durch eine Messküvette gepumpt.

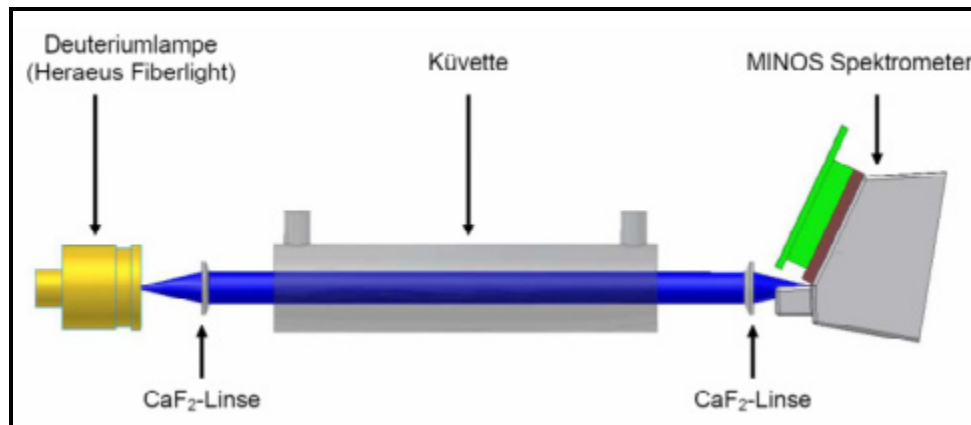


Abbildung 3.26: Messprinzip der Nitratanalyse [18]

In der Küvette trifft ultraviolette Strahlung einer Deuteriumlampe auf das Medium. Einige Wellenlängen werden in Nitrat stärker absorbiert als andere. Das nachgeschaltete Spektrometer detektiert die Intensität der verschiedenen Wellenlängen. Mit Hilfe hinterlegter Spektren von Reinst- oder Meerwasser mit bekannten Nitratkonzentrationen, kann im PC die aktuell vorhandene Nitratkonzentration berechnet werden. Zusätzliche Einflussfaktoren sind hier die Temperatur des gemessenen Mediums, sowie weitere Komponenten im Meerwasser. Diese werden bei der Berechnung berücksichtigt.

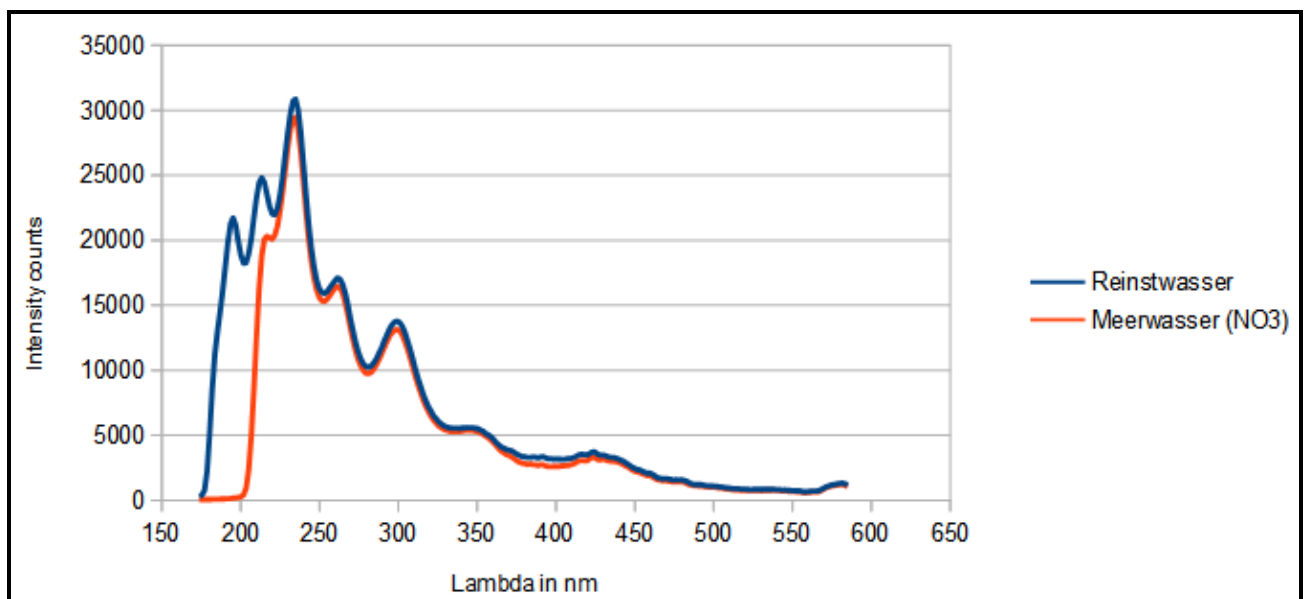


Abbildung 3.27: Spektren von Reinst- und Meerwasser

Um den Messbereich des Systems anzupassen, muss die Länge der Küvette entsprechend gewählt werden. In einer längeren Küvette wird auch bei geringer Nitratkonzentration mehr Strahlung absorbiert, also steigt die Empfindlichkeit. Ist die Küvette jedoch zu lang, wird zu viel Strahlung absorbiert und das Spektrometer empfängt insgesamt zu wenig Werte für die Berechnung.

3.4.3.2.2 Umbau der vorhandenen Strecke

Die vorhandene Analyseeinheit wurde für den Laboreinsatz und einen möglichst großen Messbereich entworfen. Das Medium wurde durch zwei Messstrecken mit Küvetten unterschiedlicher Länge geführt.

Tabelle 2: Küvetten der Laboranalyse

Küvettenlänge	Konzentration (min)	Konzentration(max)
10 cm	4,3 µg/l NO ₃ -N	143 µg/l NO ₃ -N
0,5 cm	86µg/l NO ₃ -N	2857 µg/l NO ₃ -N

Um die Komplexität zu verringern, wird in der mobilen Analyseeinheit nur eine Küvette verwendet. Diese wurde auf den zu erwartenden Messbereich angepasst.

Tabelle 3: Küvette der mobilen Analyse

Küvettenlänge	Konzentration (min)	Konzentration(max)
1 cm	43 µg/l NO ₃ -N	1429 µg/l NO ₃ -N

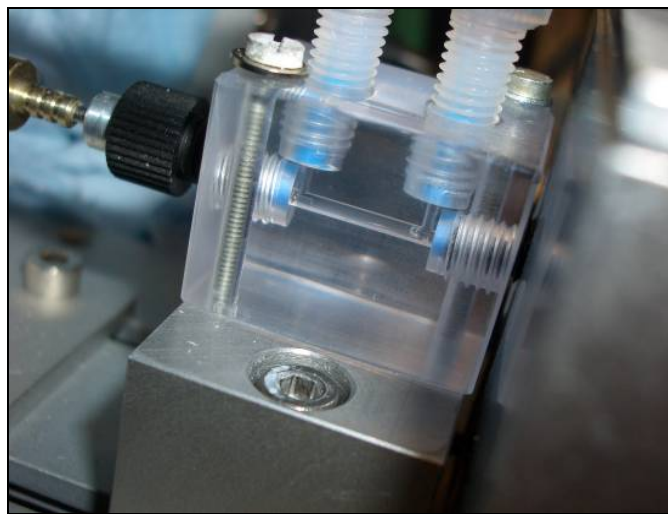


Abbildung 3.28: 1cm-Küvette der Nitratmessung

Zudem wurde der bisher lineare Aufbau des Gesamtsystems so umstrukturiert, dass alle Elemente im Messsegment Platz finden (siehe Abschnitt 3.4.3.1 „Integration der Komponenten in das Rumpfsegment“).

Da bei der mobilen Messung größere Temperaturunterschiede zwischen Medium (von außen hereingeführt) und Messstrecke (im Tauchkörper) bestehen können, wurde eine zusätzliche Temperaturmessstelle in das Schlauchsystem integriert.

Als Pumpe wird eine Mikrozahnringpumpe verwendet. Sie ermöglicht genaues Dosieren des Mediums bei geringer Leistungsaufnahme und kompakter Bauform.

Zur Vermeidung von Verunreinigungen in der Messstrecke und Schäden an beweglichen Teilen (Pumpe) ist das Schlauchsystem am Einlass mit einem Grob- und einem Feinfilter (10 µm Porengröße) ausgestattet.

Ein wichtiger Aspekt beim Umbau war auch die Dichtheit aller verwendeten Komponenten. Das zu messende Medium wird von außen in den Tauchkörper gepumpt, hier analysiert und anschließend wieder ausgestoßen. In der Messstrecke muss sichergestellt werden, dass keine Feuchtigkeit oder größere Mengen an Wasser aus der Messstrecke ins Fahrzeuginnere geraten. Entsprechende Drucktests konnten die Erfüllung dieser Forderung bestätigen.

3.4.4 Elektrik

Stromversorgung und Kommunikationsschnittstellen sind im miniarisierten Sensorsystem untergebracht und aufeinander abgestimmt.

Es wurde ein Konzept für die spezifischen Aufgaben des Moduls erarbeitet, welches in der folgenden Übersicht dargestellt ist.

O ₂	Sauerstoffsensor
LF	Leitfähigkeitssensor
T	Temperatursensor
JETI	Spektrometerinterface der Firma „JETI Technische Instrumente GmbH“

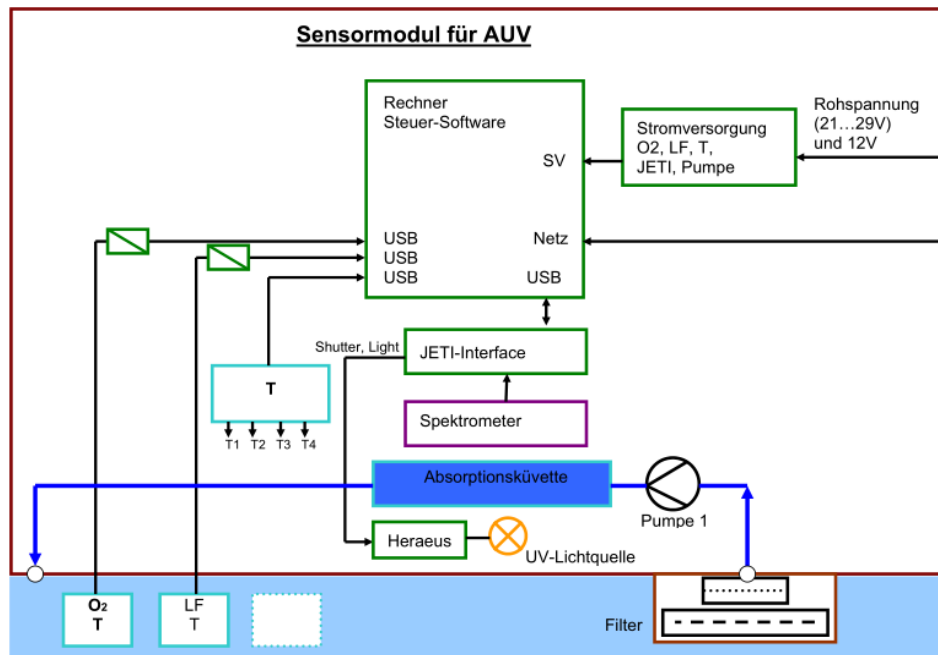


Abbildung 3.29: Prinzipskizze Sensormodul

3.4.4.1 Stromversorgung

An die Stromversorgung werden entsprechend den Sensoren und Aktoren verschiedene Anforderungen gestellt.

- Sensor 1, 12V schaltbar, Sauerstoffsensor
- Sensor 2, 12V schaltbar, Leitfähigkeitssensor
- Sensor 3, 12V schaltbar, Reserve
- Pumpe, 24V schaltbar
- JETI-Interface und Spektrometer, 12V / 100mA
- Lampen-Ansteuerung, 12V / 600mA
- Temperaturmodul, 12V
- PC1, Pokini, Sensorsteuerung und Auswertung, 12V / 10W
- PC2, Pokini, AUV-Steuerung, 12V / 10W

Die Stromversorgung wird in einem Steuermodul von 4HJE realisiert. Die Anbindung an den PC1 erfolgt über eine USB-Schnittstelle. Die Funktionen werden mit einem Softwareprotokoll durch einen Mikrocontroller R8C von Renesas realisiert.

Im Projekt wurden ein Leiterplattenlayout und die Software für den Mikrocontroller entwickelt.

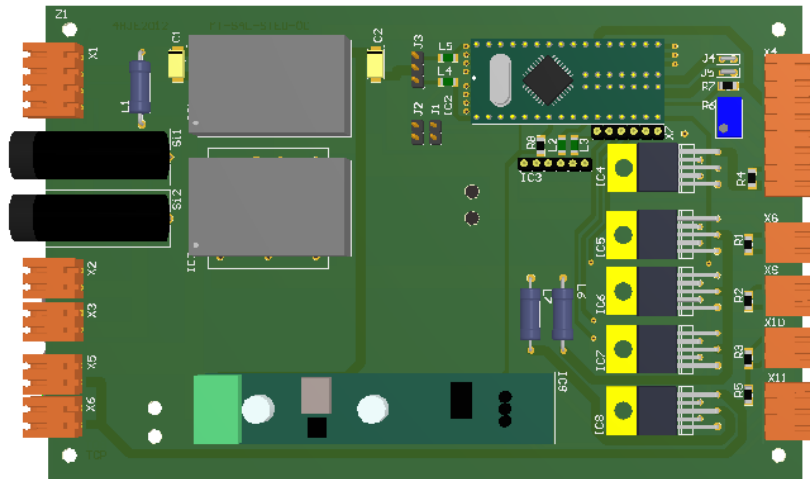


Abbildung 3.30: Leiterplatte Steuerung

3.4.4.2 Schnittstellen

Im miniaturisierten Sensormodul sind unterschiedliche Schnittstellen zwischen dem PC und den Sensoren und Aktoren vorhanden.

- SIO Sensor 1, Sauerstoffsensor
- SIO Sensor 2, Leitfähigkeitssensor
- SIO Sensor 3, Reserve
- Digital Pumpe
- USB JETI-Interface und Spektrometer
- Digital Lampen-Ansteuerung
- USB 4HJE Steuermodul
- USB Temperaturmodul
- USB, SIO, Netzwerk PC1, Pokini
- USB, SIO, Netzwerk PC1, Pokini

Die seriellen Sensoren werden über SIO / USB Konverter angeschlossen, welche im Steuermodul von 4HJE untergebracht sind. Digitale Signale zur Ansteuerung des Motorcontrollers der Pumpe werden durch den Mikrocontroller im Steuermodul 4HJE realisiert. Die digitalen Signale der Lampenansteuerung werden direkt durch das Spektrometerinterface von JETI realisiert. Die USB Schnittstellen werden zum Teil direkt auf den PC oder über einen USB-Hub zum Rechner angeschlossen.

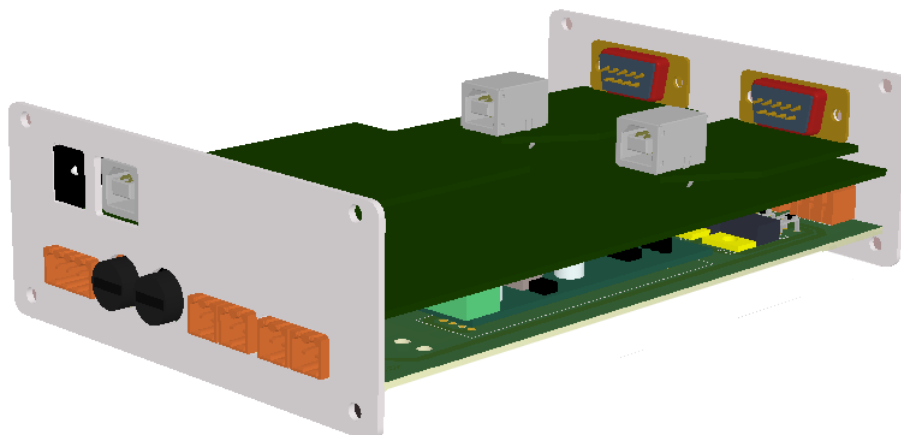


Abbildung 3.31: 4H Steuermodul mit SIO / USB Schnittstellen

3.4.4.3 Sensoren und Aktoren

Entsprechend den Anforderungen des miniaturisierten Sensormoduls wurden geeignete Sensoren, Aktoren und Komponenten recherchiert oder Module selbst entwickelt.

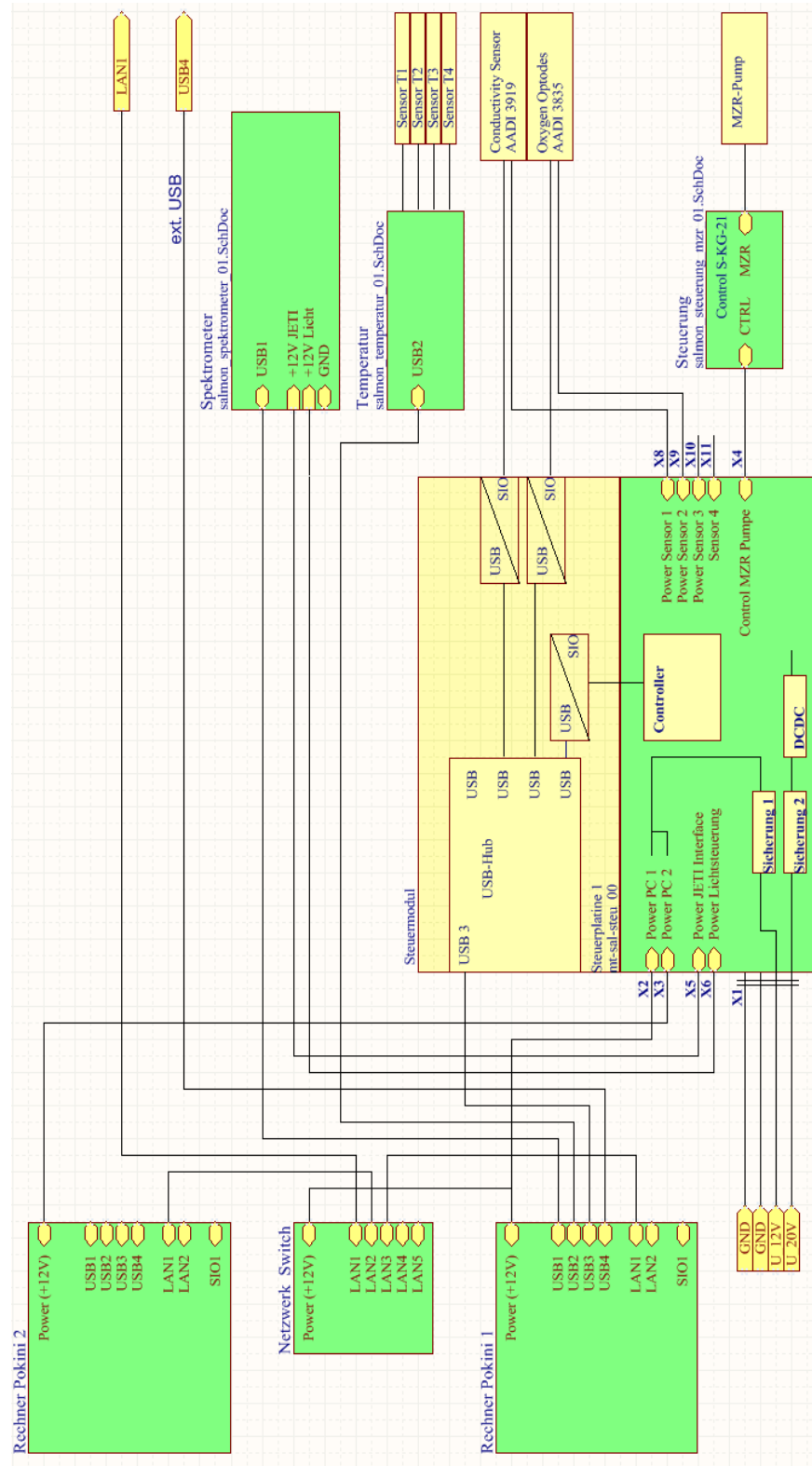


Abbildung 3.32: Übersicht Sensormodul

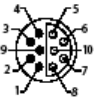
3.4.4.3.1 Leitfähigkeitssensor

Zur Erfassung der Leitfähigkeit wurde ein Sensor 3919 von AADI (Aanderaa Data Instruments, Norwegen) [1] eingesetzt. Dieser erfüllt die Anforderung des AUV und besitzt eine serielle Schnittstelle.



PARAMETER	CONDUCTIVITY SENSOR 3919ASW/3919AIW/3919ADW 3919BSW/3919BIW/3919BDW
CONDUCTIVITY	
Measuring Range:	0-7.5 S/m (0-75 mS/cm) ¹⁾
Resolution:	0.0002 S/m (0.002mS/cm) ²⁾
Accuracy:	Model A: ± 0.005 S/m (± 0.05 mS/cm) Model B: ± 0.0018 S/m (± 0.018 mS/cm)
Settling Time (90%):	< 3 sec ³⁾
TEMPERATURE	
Range:	-5°C to +40°C (23°F - 104°F) ⁴⁾
Resolution:	0.01°C (0.018°F) ⁵⁾
Accuracy:	$\pm 0.1^\circ\text{C}$ ($\pm 0.18^\circ\text{F}$) ⁶⁾
Settling Time (63%):	< 10 sec
Operating Temperature:	-5°C-40°C (23°F-104 °F)
Operating Depth:	SW: 0-300m (985 ft) IW: 0-2000m (6,560 ft) DW: 0-6000m (19,690 ft)
Sampling Rate:	SR10: controlled by the datalogger. RS-232: From 1 sec to 255min

Pin Configuration:
Receptacle, exterior view;
pin = ●, bushing = ○



A) Ground for SR10
B) Supply for RS-232
C) Ground for RS-232
D) Supply for SR10

3919
1: Positive Supply ^{A), B)}
2: Ground ^{C)}
3: -9V ^{D)}
4: SR10 (Temperature)
5: Bridge Voltage (BV)
6: Reserved, Do Not Connect
7: RXD (RS-232)
8: TXD (RS-232)
9: Control Voltage
10: SR10 (Conductivity)

AADI
AANDERAA DATA INSTRUMENTS

Abbildung 3.33: Leitfähigkeitssensor 3919 [1]

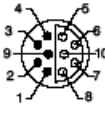
3.4.4.3.2 Sauerstoffsensor

Zur Erfassung des Sauerstoffs wurde ein Sensor 3835 von AADI [2] eingesetzt. Dieser erfüllt die Anforderung des AUV und besitzt eine serielle Schnittstelle.



PARAMETER	OXYGEN OPTODE 3835	
OXYGEN	O ₂ -Concentration	Air Saturation
Measuring Range:	0 - 500μM ¹⁾	0 - 120% ²⁾
Resolution:	<1μM	0.4%
Accuracy:	<8μM or 5 % ³⁾ whichever is greater	<5% ⁴⁾
Settling Time (63%):	<25s	
TEMPERATURE		
Range:	-0°C to +36°C	
Resolution:	0.01°C	
Accuracy:	$\pm 0.05^\circ\text{C}$	
Settling Time (63%):	<10s	
Operating Temperature	0 - 40°C (32 - 104°F)	
Operating Depth:	0 - 300m (984.3ft)	
Sampling Rate:	SR10: controlled by the datalogger. RS-232: From 1s to 255 minutes	

pin = ●, bushing = ○



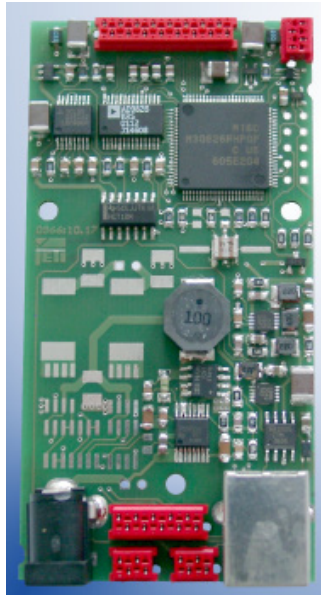
3835
1: Positive Supply ^{A), B)}
2: Ground ^{C)}
3: -9V ^{D)}
4: Reserved, Do Not Connect
5: Bridge Voltage (BV)
6: Reserved, Do Not Connect
7: RXD (RS-232)
8: TXD (RS-232)
9: Control Voltage
10: SR10 (Oxygen)

AADI
AANDERAA DATA INSTRUMENTS

Abbildung 3.34: Sauerstoffoptode 3835 [2]

3.4.4.3.3 Spektrometer

Im Projekt SALMON wird ein UV-MINOS Spektrometer mit einer Zeile S390x von Hamamatsu eingesetzt. Zur Ansteuerung wird ein JETI Interface Versapic [15] mit einem Condition Unit verwendet.



Electrical Parameters

Power supply	USB-Hub powered or +6 ... 16V DC
Operation current	<100 mA (on USB)
Quiescent current (power down)	<5 mA (interface dependent)

Analog to Digital Conversion Unit

Resolution	16 bit, 2 bit RMS*, 4bit INL, no missing code
Sampling speed	10 MS/sec.
Sampling mode	Sample and Hold:1, 4 - fold prog. Oversampling or Correlated Double Sampling
Inputs	2 (odd and even), programmable for positive or negative video signals
Input full scale range	2V or 4V, programmable
Gain	1...5 programmable in 64 steps
Offset	External compensation or programmable up to +/-300mV

Interfaces

USB 2.0	Full speed (12 Mbit/sec)
RS232	8,N,1, RxD,TxD, no flow control up to 115200 bit/sec.
TTL-UART	up to 921600 bit/sec.
SPI	up to 5 Mbit/sec.

Process control

Trigger input	TTL, slope programmable
Shutter output	TTL, programmable state and delay
Flash lamp control	programmable flash length, programmable burst

Abbildung 3.35: Spektrometerinterface Versapic [15]

3.4.4.3.4 Lichtquelle und Lampenansteuerung

Zur Erzeugung des UV Lichts für das Spektrometer wird eine Lampe DTM6/10 der Firma Heraeus Noblelight [12] eingesetzt. Die Ansteuerung erfolgt durch zusätzlich implementierte Befehle direkt durch das JETI Interface.



FiberLight with deuterium and tungsten lamp

DTM 6/10

Light exit	SMA 905
D2 lamp spectral output (nm)	200-400; option: 185-400
D2 lamp radiant intensity (W/sr @ > 5 x 10 ⁻⁸ 240 nm)	
D2 lamp stability (AU)	< 1 x 10 ⁻³
D2 lamp drift (%/h)	0.25
Tungsten lamp spectral output (nm)	400 - 1100
Aperture diameter (mm)	1.0
Recommended fiber diameter (µm)	400 - 600
Power consumption (W)	6
Power requirements	12 Vdc/ 0.6 Adc
Control	TTL
Window material	fused quartz; option: synthetic quartz
Cooling	not required
Lifetime (h)	1000

Abbildung 3.36: FiberLight [12]

3.4.4.3.5 Temperaturerfassung

Die Temperatur im System wird durch ein Temperaturmesssystem der Firma Hygro-sens erfasst. Es stehen 4 Kanäle für die Erfassung der Temperatur zur Verfügung. Als Temperatursensor wird der TSIC506 mit einer Auflösung von $0,034^{\circ}\text{C}$ und Genauigkeit von $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ bei 40°C eingesetzt. Durch die Erfassung der Temperatur des Spektrometers und der Lampe kann eine Temperaturabhängigkeit der Messwerte kompensiert werden.

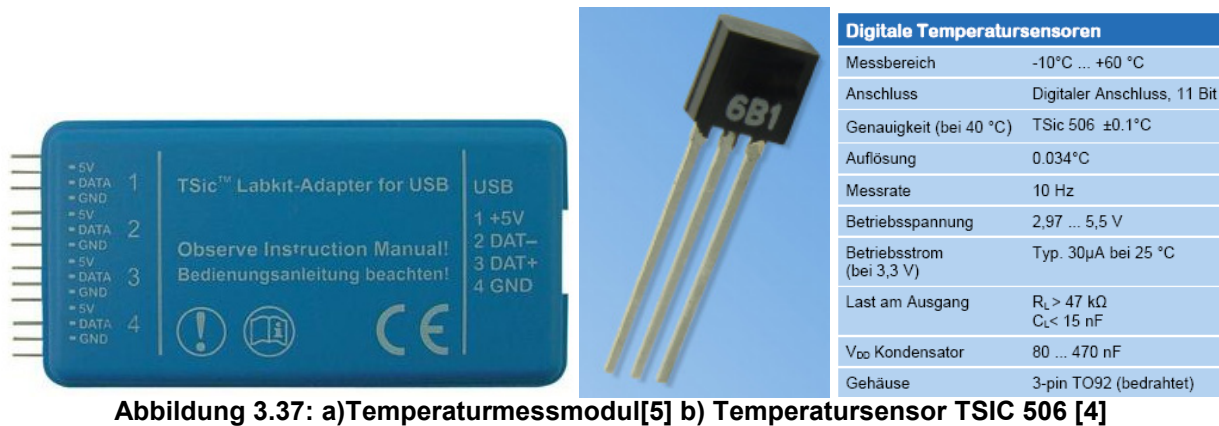


Abbildung 3.37: a) Temperaturmessmodul[5] b) Temperatursensor TSIC 506 [4]

3.4.4.3.6 Pumpe und Ansteuerung

Im Projekt SALMON wird eine Pumpe vom Typ mzz-2521 der Firma HNP Mikrosysteme GmbH eingesetzt. Zur Sicherung der Partikelfreiheit wird ein 2-stufiges Filter auf der Ansaugseite verwendet.

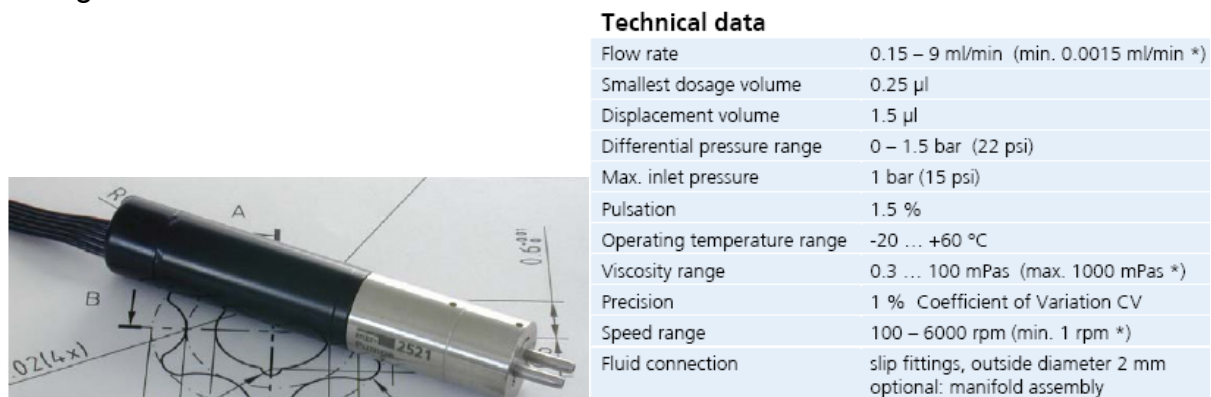


Abbildung 3.38: Mikrozahnringpumpe mzz-2521 [13]

Die Ansteuerung der Pumpe erfolgt durch den Controller S-KG und das 4HJE-Modul.



Abbildung 3.39: Controller S-KG [14]

3.4.5 Software

Für den Betrieb der Messeinheit wurde eine entsprechende Software entwickelt. Sie läuft auf dem Messrechner (Measurement Computer). Es handelt sich hierbei um einen industrietauglichen PC, auf dem Windows 7 als Betriebssystem läuft. Die Software wurde in der grafischen Programmiersprache LabVIEW erstellt. Bedient wird der Measurement Computer (bzw. die darauf laufende Software) per Remote-Zugriff auf die Benutzeroberfläche (Abbildung 3.40) oder mit konkreten Befehlen über definierte Netzwerkschnittstellen (siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.40: Benutzeroberfläche des Measurement Computer

An diesen Rechner angeschlossen sind die verwendeten Sensoren und die Elektronik (s. Abschnitt 3.4.4 Elektrik).

Die Hauptaufgabe der Software besteht darin, nach Aufforderung durch einen Benutzer (oder einen anderen Rechner) mit dem Erfassen, Ablegen und Weiterleiten der Sensordaten zu beginnen bzw. dieses zu beenden. Die aufgenommenen Werte müssen zudem mit Informationen aus dem System (Orts- und Zeitangaben, NAV_Data in Abbildung 3.1) versehen werden.

Weitere Funktionen sind

- die Berücksichtigung der aktuellen Tiefe, um in Oberflächennähe das Ansaugen von Luft in die Messstrecke zu verhindern
- ein SLEEP-Modus, bei dem unnötige elektrische Verbraucher deaktiviert werden
- Wartung und Inbetriebnahmeprozeduren, z.B. das Spülen der Messstrecke mit Reinstwasser

3.4.5.1 Prozesssteuerung

Einen Überblick über die verschiedenen Zustände im System und mögliche Übergänge geben Tabelle 4 und Abbildung 3.41.

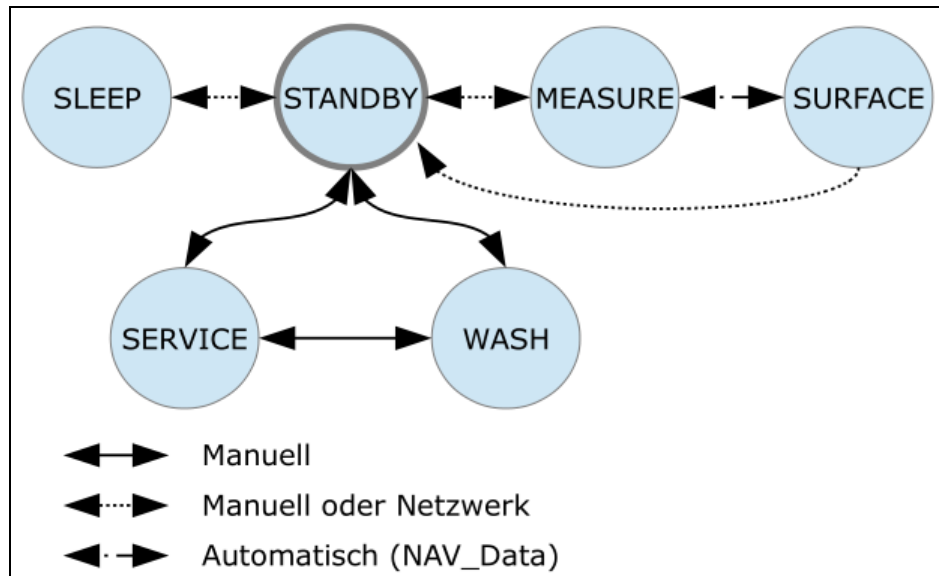


Abbildung 3.41: Betriebszustände und mögliche Übergänge

Tabelle 4: Beschreibung der Systemzustände

Zustand	Anmerkung
Standby	Messsystem ist bereit und wartet auf Befehle.
Measure	Messungen wurden gestartet (durch Benutzereingabe oder über das Netzwerk vom Scientific Computer (SC)).
Surface	Modus zum Schutz der Messsystems. Ist die aktuelle Tauchtiefe kleiner als 2m, schaltet die interne Pumpe ab. Anderenfalls besteht die Gefahr, Luft anzusaugen. Diese stört die Nitratmessung wesentlich und ist in vielen Fällen nur schwer wieder aus dem System zu entfernen.
Wash	Im WASH Modus läuft nur die interne Pumpe für die Nitratmessung. So kann das System mit Reinstwasser oder anderen Flüssigkeiten gespült werden. Befehle vom Scientific Computer (über das Netzwerk) werden ignoriert.
Service	Der SERVICE-Modus ist für manuelle Messungen, Kalibriervorgänge und sonstige Wartungsaufgaben gedacht. Die Pumpe läuft nicht. Befehle vom Scientific Computer (über das Netzwerk) werden ignoriert.
Sleep	Abschaltung der Lampe für die Nitratmessung zur Erhöhung deren Lebensdauer.

Das System startet normalerweise in den STANDBY-Modus. Es wartet auf Eingaben vom Benutzer oder Befehle über das Netzwerk, um in einen anderen Zustand zu wechseln. Dieser Zustand wird an die anderen Softwaremodule weiter gegeben. Diese reagieren entsprechend darauf, z.B. Starten der Pumpe und der Messungen im MEASURE-Modus; Stoppen von Pumpe und Messung in Oberflächennähe (SURFACE-Modus).

3.4.5.2 Nitrat

Auch für die Nitratmessung musste eine neue Software (Modul) erstellt und in das Gesamtsystem eingebunden werden.

Neben der eigentlichen Messung des Nitratgehalts durch Ansteuerung einer Lampe und eines Spektrometers, musste hierfür auch die Pumpe gesteuert und die zusätzliche Temperaturmessung ausgelesen werden. Auch Servicefunktionen wie das Spülen der Messstrecke mit Reinstwasser und Kalibrierfunktionen wurden implementiert.

Die verschiedenen Zustände sind in Abbildung 3.42 dargestellt

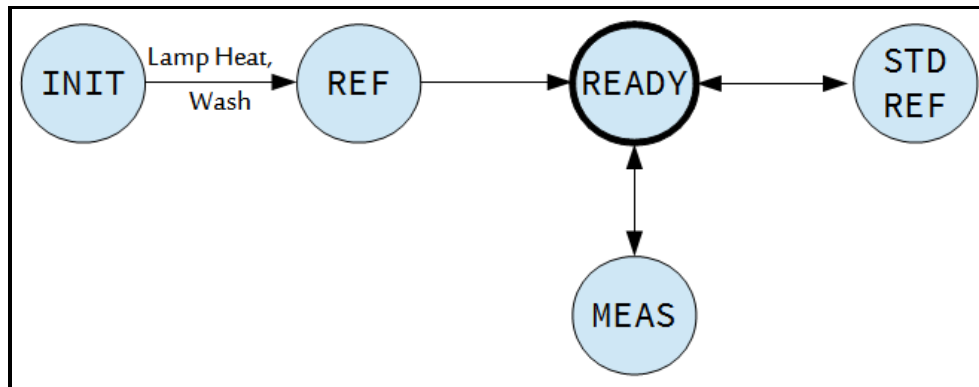


Abbildung 3.42: Zustände und Übergänge der Nitratmessung

Tabelle 5: Zustände der Nitratmessung

Zustand	Anmerkung
INIT	Einschalten des Systems.
REF	Durchführen einer Referenzmessung mit Reinstwasser.
READY	System ist bereit, Lampe hat Betriebstemperatur erreicht.
STD REF	Durchführen einer Referenzmessung (Reinstwasser) oder einer Messung mit einer anderen Standardlösung (Meerwasser, Meerwasser mit bekannter Nitratkonzentration).
MEAS	Nitratwerte werden gemessen.

Zu Beginn initialisiert sich das System. Die Lampe wird eingeschaltet, das Spektrometer detektiert und die Lampentemperatur gemessen. Erreicht die Lampe ihre Betriebstemperatur, muss das System mit Reinstwasser gespült werden. Dann wird manuell eine Referenzmessung durchgeführt. Diese ist nötig, um eventuelle Änderungen der Lampenintensität zu filtern. Danach ist die Nitratmessung betriebsbereit. Falls gewünscht, können weitere Kalibrierungen (z.B. mit Meerwasser bekannter Nitratkonzentration) auch wiederholt werden.

Die Berechnung der Nitratkonzentration erfolgt mit Hilfe der hinterlegten Spektren bekannter Lösungen. Durch eine Multikomponentenanalyse wird die aktuell vorhandene Nitratkonzentration bestimmt. Nach dem Einsatz muss das System wieder mit Reinstwasser gespült werden. Diese Funktion führt die Prozesssteuerung aus.

Das Bedienfenster der Nitratmessung dient hauptsächlich zu Informationszwecken (siehe Abbildung 3.43). Es werden verschiedene Statusinformationen angezeigt (z.B. Spektrometer ist vorhanden, Lampe ist an, Lampe ist warm), sowie das zuletzt gemessene Spektrum dargestellt. Zudem werden die daraus berechnete Nitratkonzentration und die Qualität der Messung angezeigt. Als Benutzerfunktion steht hier die Durchführung von Messungen zur Verfügung. Normale Nitratmessungen können durchgeführt werden, sowie Messungen mit Referenz- und Standardlösungen. Letztere werden auf dem Rechner hinterlegt und für zukünftige Messungen berücksichtigt.

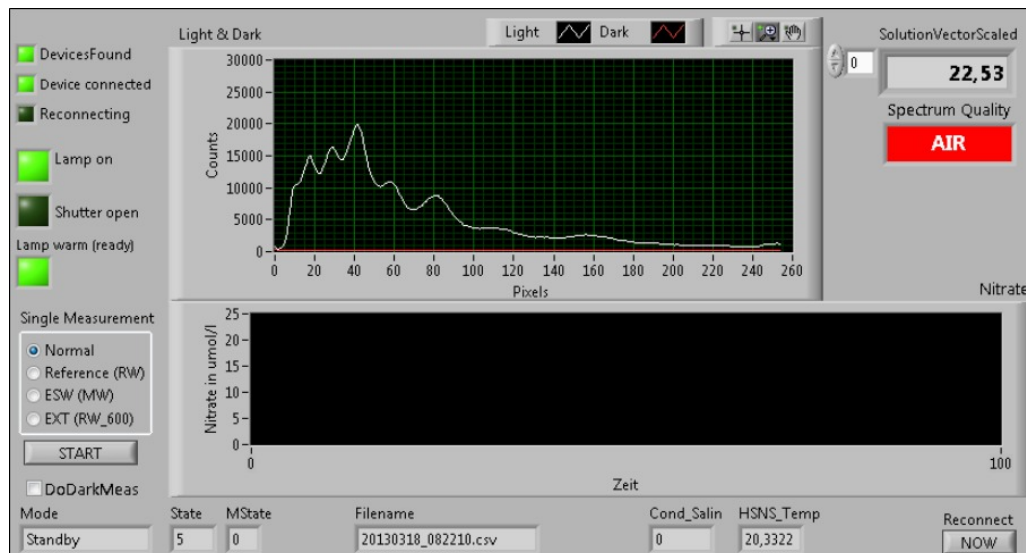


Abbildung 3.43: Hauptfenster der Nitratmessung

3.4.6 Integration des Moduls in das Gesamtsystem

Nach erfolgreichem Test des Sensormoduls im Standalone-Betrieb konnte die Integration in das AUV erfolgen.

3.4.6.1 Trockentest

Die mechanischen Randbedingungen waren durch das zur Verfügung gestellte Rumpfmodul klar definiert. Einschränkungen gab es hier jedoch aufgrund zusätzlicher Elemente, die im 4HJE-Modul untergebracht werden mussten:

- Einerseits waren ausreichend Raum und Fixiermöglichkeiten für einen weiteren Rechner (Scientific Computer) vorzusehen.
- Andererseits war genügend Platz für die Durchführung der Energie- und Datenleitungen frei zu halten.

Von elektrischer Seite wurde die Anbindung der Stromversorgung des 4HJE-Moduls an das Gesamtsystem getestet.



Abbildung 3.44: AUV in der Testphase (Zusammenführung von Modulen)

Softwareseitig wurde der Measurement Computer (4HJE) im Netzwerk des AUV betrieben. Kommandos (z.B. ‚Messung starten‘) und Navigationsdaten wurden erfolgreich vom Scientific Computer (TUI) bzw. Control Computer (AST) an den Measurement Computer gesendet. Dieser erwiderte die Anfragen mit der Ausgabe seines aktuellen Systemstatus bzw. der aktuell erfassten Messwerte.

3.4.6.2 Tauchtest

Nach erfolgreicher Überprüfung aller Schnittstellen an Land (Trockentest) konnte das AUV als Komplettsystem montiert und im Wasser (Versuchsbecken) in Betrieb genommen werden. Die Überwachung aller für den Betrieb relevanten Parameter (inkl. Leckagesensor) konnte stets live (per Netzwerk) erfolgen.



Abbildung 3.45: AUV in der Testphase (über dem Versuchsbecken)

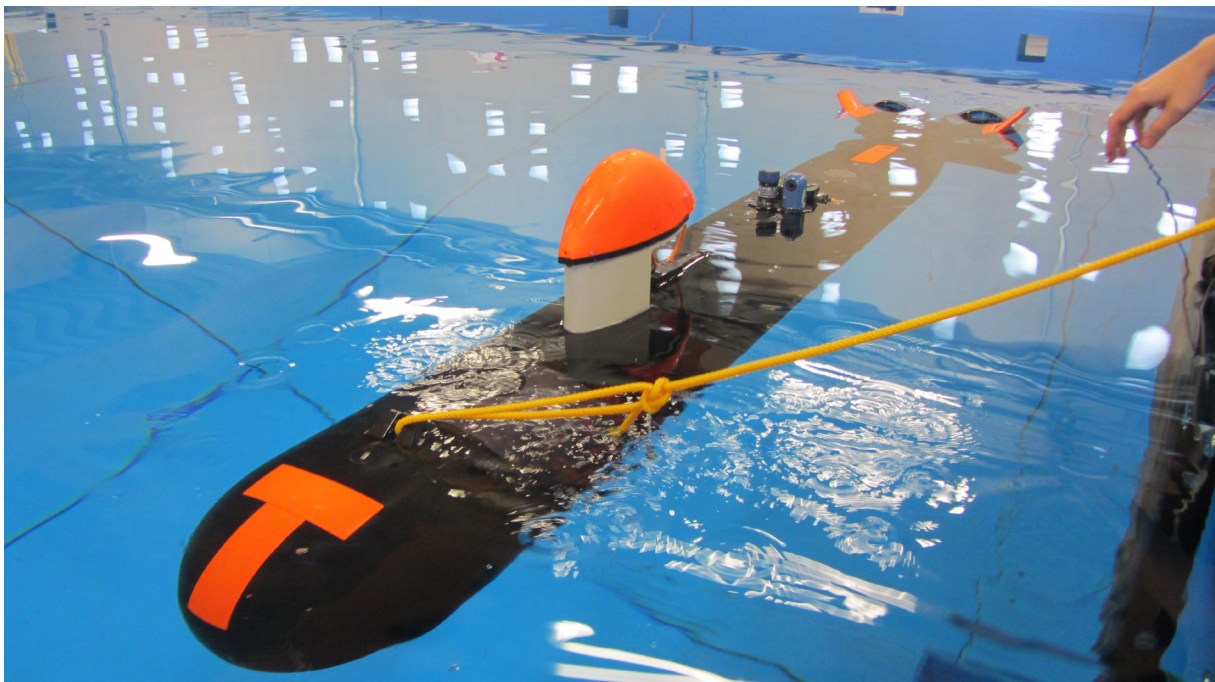


Abbildung 3.46: AUV in der Testphase (im Versuchsbecken)

Nach den Tauchtests im Versuchsbecken wurden noch weitere Tests in regionalen Talsperren durchgeführt.

3.5 Machbarkeitsstudie zur Zustandsschätzung

Der Kooperationspartner am Mads Clausen Institute brachte seine profunde Expertise bei der Überwachung und Steuerung von Unterwasserfahrzeugen im küstennahen Bereich ein und lieferte für das Projekt erste Ideen für Algorithmen zur Zustandsschätzung. Das für die robuste Folgeregelung verwendete Konzept zur Störungs- und Zustandsschätzung geht auf diese Zusammenarbeit zurück (siehe Abschnitt 3.6). Anfang 2011 wurden am Mads Clausen Institute aber eine Reihe von unerwarteten Umstrukturierungsmaßnahmen mit sehr großen personellen Veränderungen vorgenommen. Im Zuge dessen wurde die maritime Forschung am Institut zugunsten einer Neuausrichtung der Forschung in Richtung energietechnischer und leistungselektronischer Systeme weitgehend aufgelöst. Dies betraf auch den Kooperationspartner am Mads Clausen Institute. Aus diesem Grund mussten verbleibende Aufgaben von Projektpartnern übernommen werden.

3.6 Navigation und Bahnverfolgung

Am Fachgebiet Regelungstechnik der TU Ilmenau (CEG) wurde ein robuster Algorithmus für die echtzeitfähige Bahnplanung und Folgeregelung entwickelt. Auf Basis der zur Laufzeit zur Verfügung gestellten Wegpunkt- und Manöverinformationen (vertikal, 2D oder 3D Manöver) stellt der Algorithmus in Echtzeit parametrisierte Sollbahnkurven und Solltrajektorien für die Vorsteuerungskomponente des Reglers zur Verfügung. Der Entwurf der Folgeregelung erfolgt auf Grundlage einer Vorwärts-Euler-Diskretisierung an einem üblichen nichtlinearen Prozessmodell. Die am Fachgebiet Regelungstechnik entworfene PD-Folgeregelung mit Vorsteuerung kompensiert dabei die Nichtlinearitäten des diskreten Prozessmodells. Darüber hinaus wurde der Regelalgorithmus zur dynamischen Kompensation von nicht messbaren, auf die Aktuatoren einwirkenden Störungen um einen Störbeobachter mit einer Deadbeat-Beobachterfehlerdynamik erweitert. Neben einer Schätzung von Störungen vermag der entwickelte Beobachter auch dynamische Schätzwerte von nicht messbaren Zuständen des Prozesses zu liefern. Auf diesem Weg ist es möglich, das Regelungsziel auf Basis laufender Messungen von Positions- und Orientierungsdaten zu erreichen.

3.6.1 Reglerentwurf

3.6.1.1 Systemdynamik

Die Dynamik des AUVs wird durch die Bewegungsgleichung für Starrkörper beschrieben:

$$\begin{aligned} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) &= \tau \\ \dot{\eta} &= J(\eta)v \end{aligned} \quad (3.13)$$

$M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Trägheitsmatrix (von der Masse und den Trägheiten abhängig)

$C(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Matrix von Coriolis- und Zentripetaltermen

$D(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Dämpfungsmatrix (enthält lineare und nichtlineare Terme)

$g(\eta) \in \mathbb{R}^6$: Vektor der Gravitationskräfte und Gravitationsmomente

$J(\eta) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Rotationsmatrix zwischen earth-fixed-Koordinaten und body-fixed-Koordinaten

$\tau \in \mathbb{R}^6$: Stellgrößenvektor

$\eta \in \mathbb{R}^6$: Positions- und Orientierungsvektor in den earth-fixed-Koordinaten $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$

$v \in \mathbb{R}^6$: Lineargeschwindigkeits- und Winkelgeschwindigkeitsvektor in den body-fixed-Koordinaten $v = [u, v, w, p, q, r]^T$

Basierend auf der Kinematik des AUV-Modells wird die durch die vorgegebenen Wegpunkte laufende Bahn in der Trajektoriengenerierung bestimmt. Um die Stetigkeit und

die zweifache Differenzierbarkeit der Referenztrajektorien sicher zu stellen, werden Polynome 5. Ordnung für die Koordinatenachsen x , y und z verwendet. Dabei sind $x(\Theta)$, $y(\Theta)$ und $z(\Theta)$ Polynome 5. Ordnung, die von der Bahnvariable Θ abhängen. Für vorgegebene Punkte im (x, y, z) Raum werden die Koeffizienten der Polynome $x(\Theta)$, $y(\Theta)$ und $z(\Theta)$ über einen Online Bahnplanungsalgorithmus bestimmt. Mit Hilfe der Kinematik des Modells und des gewünschten Geschwindigkeitsprofils lässt sich die Bahnvariable Θ als Funktion von der Zeit t beschreiben. D.h. die Polynome werden als Zeitfunktionen (Referenztrajektorien) definiert. Die nachfolgende Abbildung erklärt den Online-Algorithmus der Polynomgenerierung für 6 Wegpunkte in x -Richtung. In der ersten Iteration für $j=1$ wird nur a_1 betrachtet, für $j=2$ wird nur a_2 betrachtet, aber in der letzten Iteration für $j=3$ werden a_3 , b_3 und c_3 betrachtet, wobei a_1 , a_2 , a_3 , b_3 und c_3 die Vektorparameter des Polynoms 5. Ordnung sind.

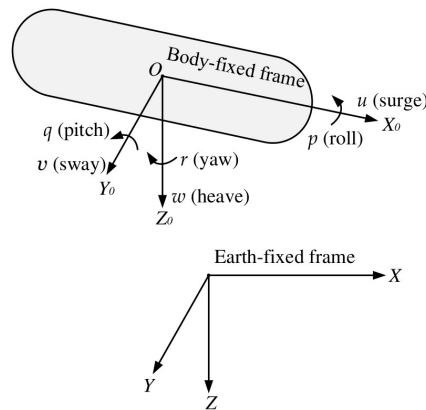


Abbildung 3.47: Body-fixed und earth-fixed Referenzkoordinaten

3.6.1.2 On-Line-Bahnplanung

Durch das Polynom 5. Ordnung werden die Bahn bzw. die Trajektorien bestimmt, die durch vorgegebene Wegpunkte laufen:

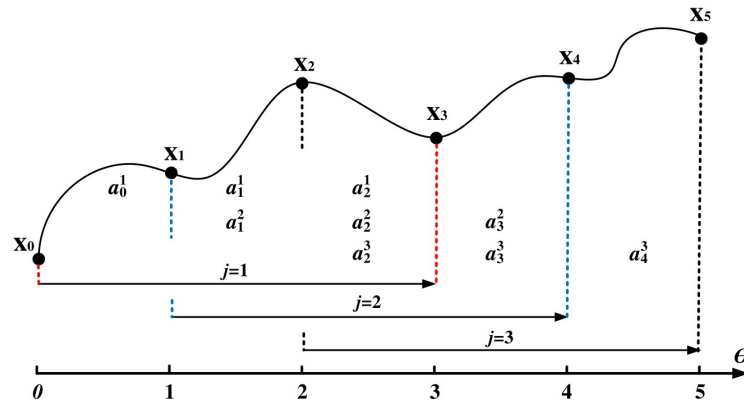


Abbildung 3.48: Polynomgenerierung für 6 Wegpunkte in x -Richtung

Für ein (x,y) -Manöver (für $z=\text{konstant}$ und für sway-Geschwindigkeit $v=0$) kann die Bahnvariable Θ durch Lösung der Differentialgleichung

$$\dot{\Theta} = u_d(t) / (\cos\psi(\Theta)(\partial x(\Theta) / \partial \Theta) + \sin\psi(\Theta)(\partial y(\Theta) / \partial \Theta)) \quad (3.14)$$

bestimmt werden, wobei $u_d(t)$ das gewünschte Geschwindigkeitsprofil beschreibt. Ersetzt man die Lösung Θ in den Polynomen von $x(\Theta)$ und $y(\Theta)$, kann man x und y als Zeitfunktionen beschreiben. Für ein (x, y, z) Manöver ist es auch möglich die Bahn im Raum zu generieren, d.h. $z(\Theta)$ ist nicht mehr konstant sondern ein Polynom 5. Ordnung.

3.6.1.3 Reglerentwurf

Für den Autopiloten wurde ein Folgeregler-Entwurf im FG CEG durchgeführt. Anhand der Vorwärts-Euler-Diskreditierung [9] bekommt man ein nichtlineares 6 DOF Modell:

$$\begin{aligned}\eta(k+1) &= \eta(k)TJ(\eta(k))v(k) \\ v(k+1) &= v(k) - TM^{-1}(C(v(k)) + D(v(k)))v(k) - TM^{-1}g(\eta(k)) + TM^{-1}(\tau(k) + d(k))\end{aligned}\quad (3.15)$$

wobei $d(k)$ die zusätzliche Eingangsstörung und T die Abtastzeit beschreibt. Basierend auf dem Systemmodell des AUVs wurde ein diskreter "Computed Torque" Regler entworfen.

$$\tau(k) = MJ^{-1}(\eta(k+1))\gamma(k) + g(\eta(k)) + [C(k) + D(k) + (M/T)J^{-1}(\eta(k+1))J(k) - M/T]v(k) \quad (3.16)$$

Die Variable $\gamma(k)$ stellt dabei einen neuen Eingang dar, welcher als ein diskreter PID Regler mit Vorsteuerung gewählt wurde. Abbildung 3.65 zeigt das SIMULINK-Modell des geregelten Fahrzeugmodells. Der Block *ManoeuvreProcessor* generiert anhand der Wegpunkte x_i, y_i, z_i und der Geschwindigkeit u_i für $i=1..N$ die Referenzsignale für den Autopiloten. Der Autopilot erzeugt eine geeignete Stellgröße τ , um den Referenzsignalen zu folgen. Der Stellgrößenvektor τ "Kräfte und Momente" wird auf die entsprechenden Drehzahlen für die Propeller und Thruster durch die sogenannte "Control Allocation Matrix" umgerechnet.

Im gestörten Fall wird die nicht gemessene Störung durch einen Beobachter geschätzt werden, diese Schätzung wird im modifizierten Regelgesetz verwendet, um den Einfluss der Störung zu kompensieren. Für die Schätzung der Störung wird eine diskrete Version von (Generalized Extended State Observer (GESO)) hergeleitet. Das modifizierte Regelgesetz (mit Störung) lautet:

$$\tau(k) = g(\eta(k)) + \left(C(v(k)) + D(v(k)) - \frac{1}{T}M \right) v(k) + MJ^{-1}(\eta(k+1))\left(\gamma(k) + \frac{1}{T}J(\eta(k))v(k) \right) \quad (3.17)$$

mit $\gamma(k) := \bar{\gamma}(k) - \frac{1}{T^2}(0 \ I) \hat{d}(k)$ wobei $\hat{d}(k)$ die Schätzung der Störung ist.

Das Regelgesetz $\bar{\gamma}(k)$ ist ein diskreter PD-Regler im nominellen Fall.

3.6.1.4 Simulationsergebnisse

Die Simulation wird für 11 Wegpunkte durchgeführt. Die Wegpunkte und die zugehörigen Geschwindigkeiten sind in Tabelle 6 enthalten. Die definierten Wegpunkte und die gewünschte Bahn in 3-D Raum ist in Abbildung: 3.49 dargestellt.

Tabelle 6: Wegpunkte für Simulation

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x	0	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360
y	0	0	60	80	60	80	80	80	80	80	80
z	0	20	20	20	20	20	20	30	40	50	40
u	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0

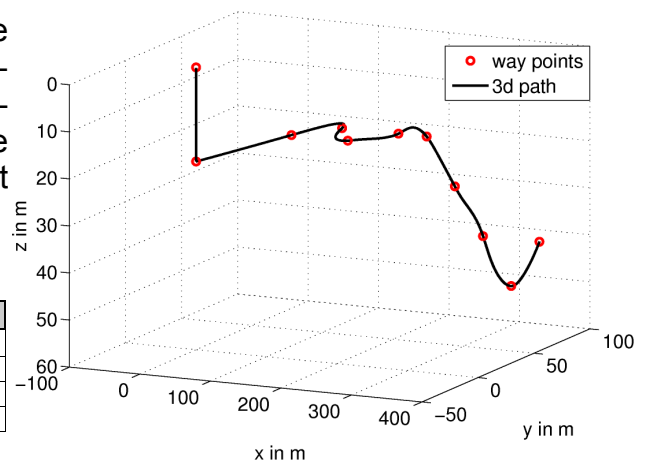


Abbildung: 3.49: Wegpunkte und gewünschte Bahn in 3D-Raum

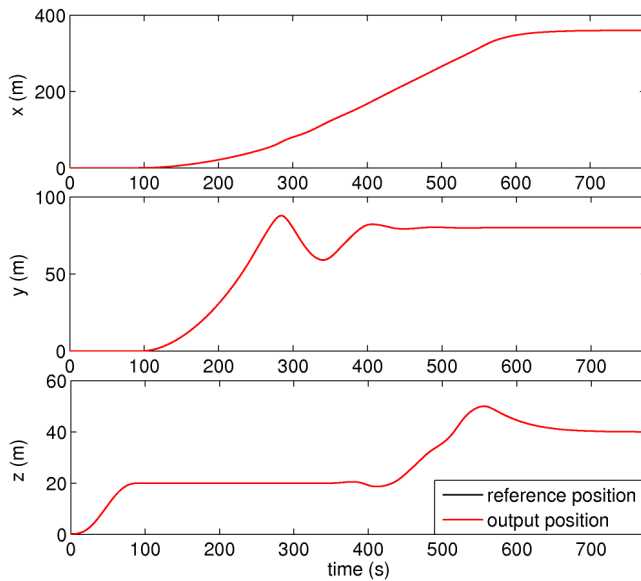


Abbildung 3.50: Position

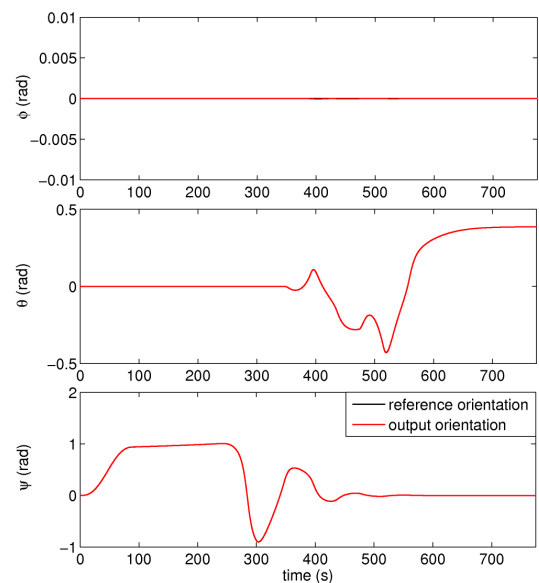


Abbildung 3.51: Orientierung

Die Ist-Position (x, y, z) und Ist-Orientierung (ϕ, θ, ψ) werden bezüglich der Referenzen in Abbildung 3.50 und Abbildung 3.51 dargestellt werden. Die Geschwindigkeitsverläufe werden in Abbildung 3.52 und Abbildung 3.53 gezeigt.

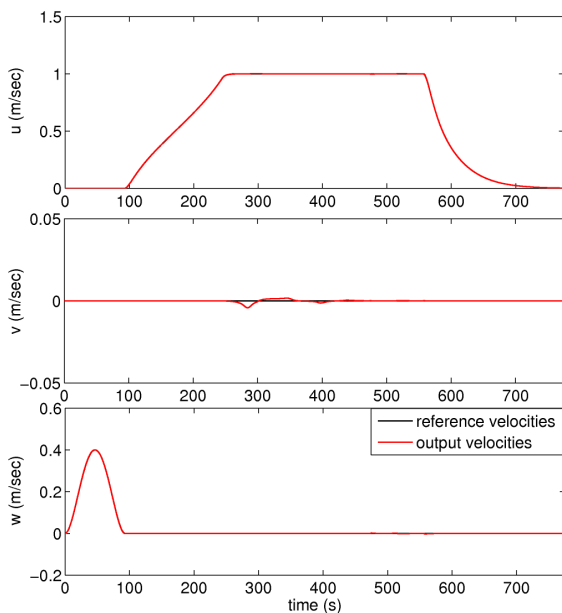


Abbildung 3.52: Translatorische Geschwindigkeiten

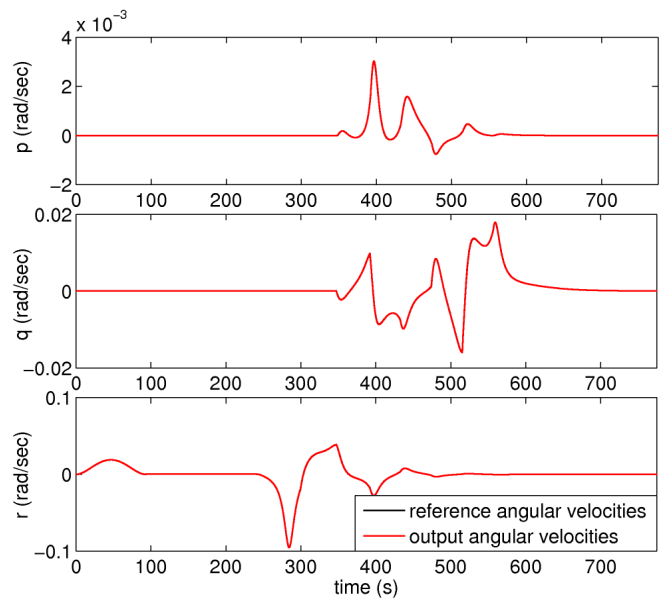


Abbildung 3.53: Rotatorische Geschwindigkeiten

Die 6 zugehörigen Stellgrößen, d.h. die Kräfte in x, y, z -Richtungen und die Momente um die x, y, z -Achsen werden in Abbildung 3.54 dargestellt.

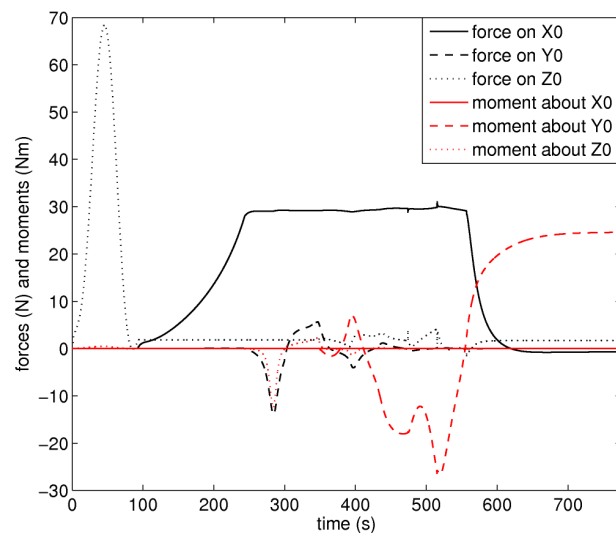


Abbildung 3.54: Stellgröße, nomineller Fall (PD-Regler)

Wir nehmen an, dass eine sinusförmige-Störung $d_1(t) = 10\sin(2\pi 0.01)N$ auf dem 1. Kanal, und $d_6(t) = 10\sin(2\pi 0.01)Nm$ auf dem 6. Kanal der Stellgröße wirken.

Die Position und Orientierung unter Einfluss der Störung (die Störung tritt ab Zeitpunkt 300 s auf) werden in Abbildung 3.55 und Abbildung 3.56 mit und ohne Schätzer gezeigt.

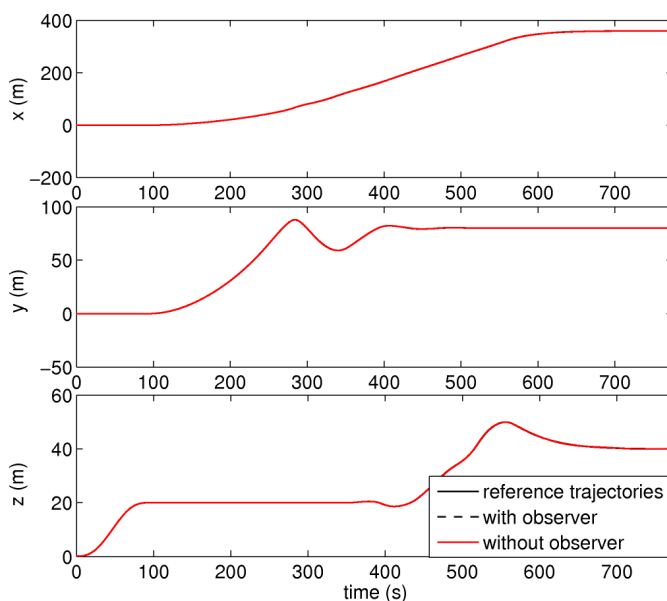


Abbildung 3.55: Position unter Störung

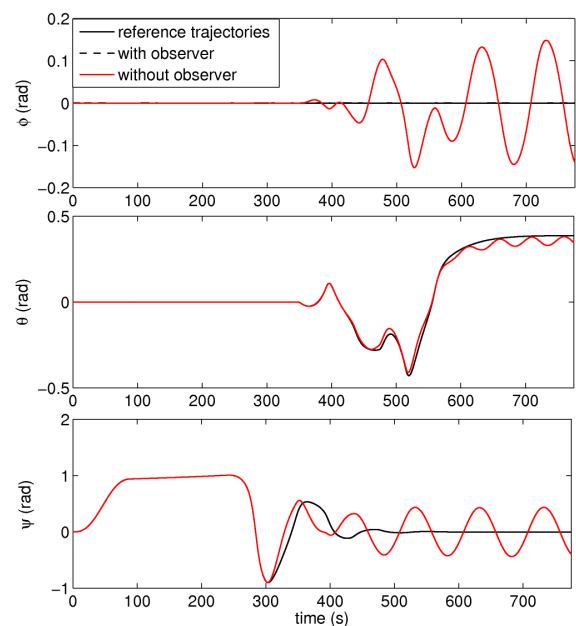


Abbildung 3.56 : Orientierung unter Störung

Hier kann man sehen, dass die Störung zu einem instabilen Verhalten führt! Mit dem Schätzer wird die Störung geschätzt und dann im Regelgesetz kompensiert.

Die Geschwindigkeiten ohne und mit Schätzer sind in Abbildung 3.57 und Abbildung 3.58 dargestellt.

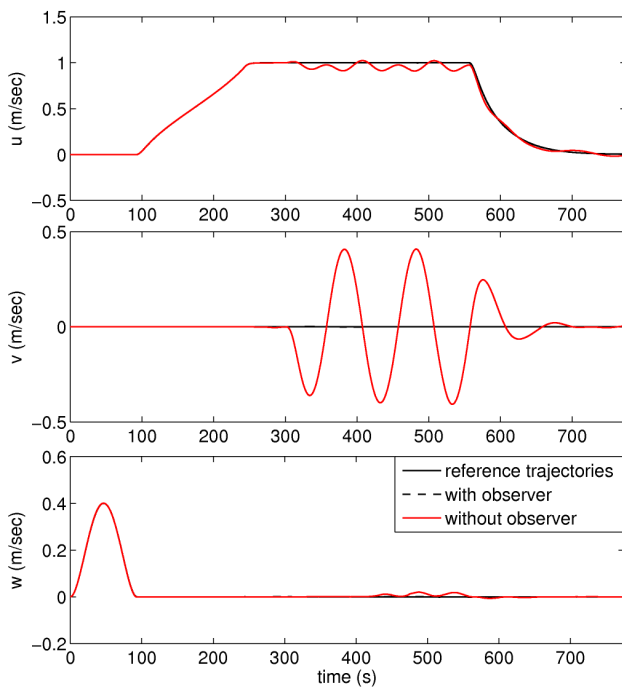


Abbildung 3.57: Tran. Geschwindigkeiten

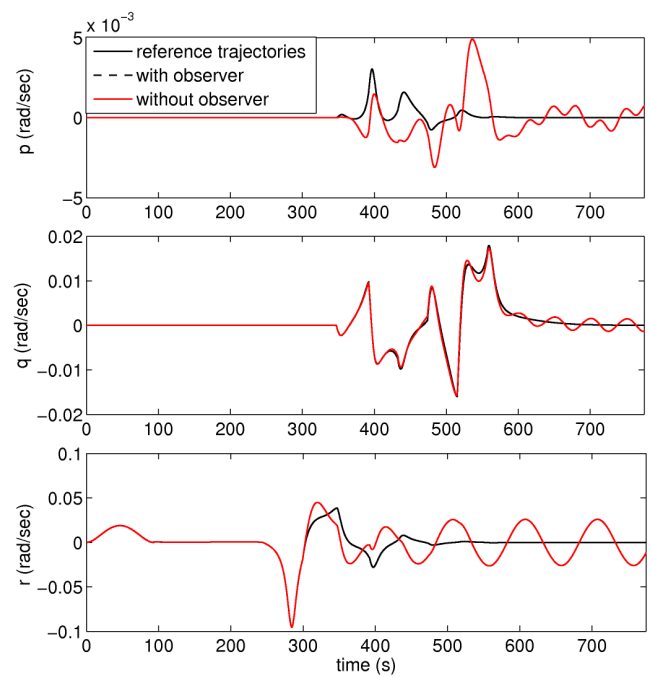
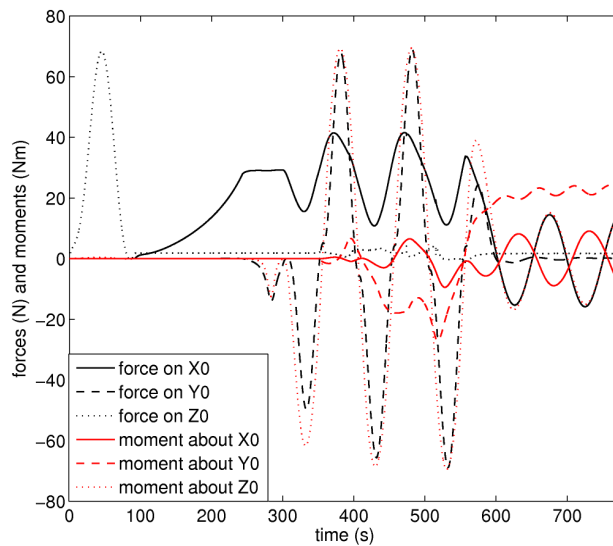
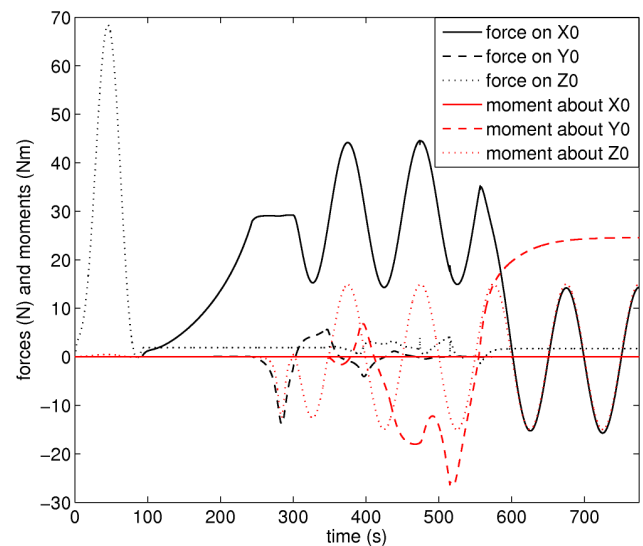


Abbildung 3.58: Rota. Geschwindigkeiten

Die Stellgrößenverläufe mit Störung und Schätzer zeigt Abbildung 3.59 und Abbildung 3.60.



**Abbildung 3.59: Stellgröße unter Störung
(PD-Regler ohne Schätzer)**



**Abbildung 3.60: Stellgröße unter Störung
(PD-Regler mit Schätzer)**

3.6.2 Modellbasierter Entwurf des Autopiloten

Anspruchsvolle und hochkomplexe Projekte machen kurze Entwurfszyklen notwendig. Irrtümliche oder unvollständige Umsetzungen der Anforderungen führen oftmals zu Fehlern, welche erst spät im Entwicklungsprozess entdeckt werden [24]. Eine Detektion und Behebung von Fehlerzuständen zu einem frühen Zeitpunkt würde zu einer erheblichen Einsparung von Zeit und Kosten führen. Model-Based Design (MBD) ist ein Konzept, das diese Anforderungen erfüllen kann, da es die Verifikation und Validierung in jeder Entwicklungsphase ermöglicht. Dieses Konzept wurde deshalb auch für die Entwicklung des Autopiloten in diesem Projekt eingesetzt.

Im Projekt SALMON wurde der Autopilot unter MATLAB/Simulink [21, 23] entwickelt. Die blockorientierte Struktur in Simulink ermöglichte es, vordefinierte Funktionsblöcke zu verwenden, die komplexe Regelungsstruktur übersichtlich aufzubauen sowie Modifikationen am Autopiloten leicht vorzunehmen. Nach dem Aufbau des Autopiloten in ein Simulink-System kann das Regelverhalten unter Verwendung eines Fahrzeugmodells (siehe Abschnitt 3.3.3.1) simuliert und analysiert werden.

Nach der Entwurfsphase erfolgt die Implementierung des entwickelten Autopiloten in die Fahrzeugsoftware. Dazu erzeugt MATLAB/Simulink unter Verwendung des Simulink Coders™ [22] (früher Real-Time Workshop®) aus dem Simulink-System automatisch C-Code. Die erzeugten Header- und Quellcode-Dateien reproduzieren die gesamte Funktionalität des Autopiloten in zwei Hauptfunktionen (*initialize* and *step*). Diese Funktionen werden in eine *Autopilot_C* Klasse eingebunden. Anschließend erfolgt die Erzeugung einer Bibliothek, welche zum einen in eine C-Mex-S-Function verwendet werden kann, um die korrekte Übersetzung in MATLAB/Simulink zu überprüfen. Zum anderen wird mit dieser Bibliothek das im Fahrzeug laufende Programm des Autopiloten *Autopilot.exe* gebaut. Abbildung 3.61 zeigt noch einmal die einzelnen Entwurfsschritte des Autopiloten. Für die Ankopplung des Autopiloten an die entsprechende Zielplattform wurde ein Interfacekonzept entwickelt, welches eine Unabhängigkeit zwischen Programmcode und Schnittstellentypen ermöglicht (siehe Abschnitt 3.6.3).

MBD ermöglichte es, das komplexe Simulink-System des Autopiloten mit einem Minimum an manueller C++-Codeentwicklung für die Zielplattform zu übersetzen. So konnte der Entwurf und die Implementierung vollkommen getrennt durchgeführt werden. Programmtechnische Kenntnisse in C++ waren für den Entwicklungsprozess des Autopiloten am Fachgebiet CEG nicht erforderlich, was den Entwicklungsprozess erleichterte. Die Implementierung und der Test des Autopiloten wurde am Fachgebiet SAG durchgeführt. Modifikation oder Erweiterungen am Autopiloten konnten so während des Inbetriebnahmeprozesses (siehe Abschnitt 3.9) schnell durchgeführt werden.

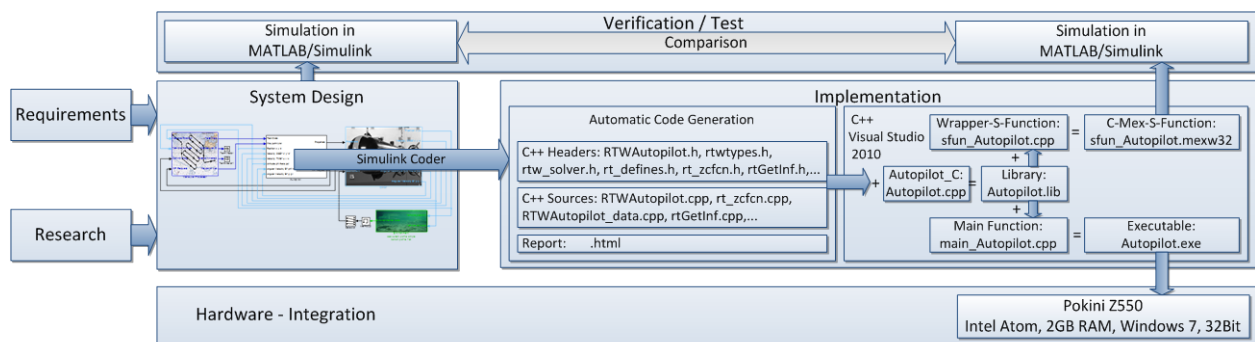


Abbildung 3.61: Modellbasierter Entwurf des Autopiloten

3.6.3 Interfacekonzept

Das entwickelte Interfacekonzept für den Autopiloten basiert auf dem Brückenmuster [10] und wurde auch für das Modul *ManoeuvreProzessor* (siehe Abschnitt 3.7.2) und *Fahrzeugmodell* (siehe Abschnitt 3.3.3) eingesetzt. Bei diesem Muster existieren abstrakte C++ Klassen, welche die öffentlichen Schnittstellen definieren. Das bedeutet, jedes Programm besitzt eine abstrakte Klasse *InputProcessor_C* und *OutputProcessor_C*. Die Ableitungen dieser Klassen beinhalten den spezifischen Code des verwendeten Schnittstellentypes. So ist es leicht möglich, andere Schnittstellentypen (Serielle Schnittstelle, TCP/IP, UDP, CORBA,...) zu verwenden, ohne dass am Programmcode eine Änderung vorgenommen werden muss. Dieses Konzept ermöglicht auch einen einfachen Test des entwickelten Programmcodes in Simulink. Hierzu wurden Schnittstellenklassen abgeleitet, welche eine Umwandlung der im Programm verwendeten Strukturen in die S-Function Datenstrukturen ermöglichen. Abbildung 3.62 zeigt dieses Konzept am Beispiel des Autopiloten Systems.

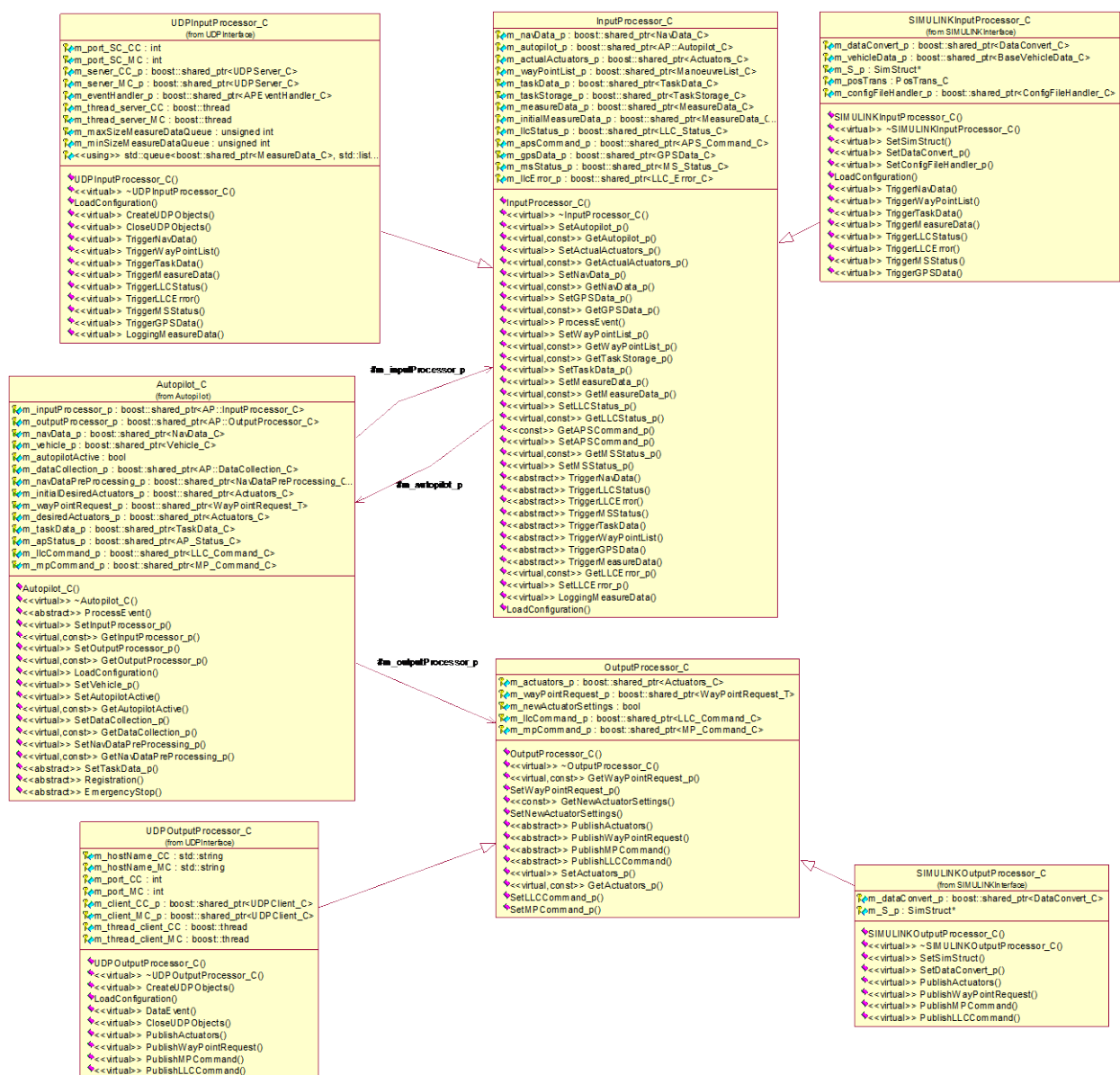


Abbildung 3.62: Klassendiagramm des Autopiloten Systems

3.7 Missionsplanung und -validierung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung von Algorithmen zur autonomen Führung des AUVs. Dabei mussten aus Nutzervorgaben über das zu untersuchende Operationsgebiet konkrete Ansteuerkommandos für den Autopiloten (siehe Abschnitt 3.6) des Fahrzeuges generiert werden. Diese Aufgabe untergliederte sich in zwei Teile: zum einen die Offline-Wegeplanung unter Verwendung eines entwickelten Planungstools (siehe Abschnitt 3.7.1), zum anderen der Onboard-Missionsabarbeitung durch einen Manöverprozessor (siehe Abschnitt 3.7.2).

3.7.1 Planungstool

Am Fachgebiet Systemanalyse der TU Ilmenau (SAG) wurde ein Planungstool für die Offlineplanung von Fahrzeugmissionen entwickelt. Dieses System ist menügeführt und erlaubt so eine einfache Erstellung und Modifikation von Missionsplänen. Der Nutzer wird schrittweise durch die einzelnen Planungsstufen geführt und erhält die dafür notwendigen Informationen über Dialogfenster. Eine typische Planungssequenz enthält drei Stufen:

1. Definition des Seegebietes
2. Selektion des Fahrzeuges
3. Aufbau eines Missionsplanes aus vordefinierten Missionselementen.

Der obere Teil von Abbildung 3.63 zeigt die möglichen Missionsbasiselemente. Die verfügbaren Elemente beinhalten ein Start- und Zielelement zur Definition der Start- und Zielposition der Mission. Des Weiteren stehen drei Basismanöverelemente (Wegpunkt, Strecke, Kreisbogen) und das komplexe Missionselement Mäander zur Verfügung. Die Einbindung der einzelnen Manöver in dem Missionsplan erfolgt durch die Auswahl des entsprechenden Elementsymbols im oberen Teil des Nutzermenüs. Dabei wird ein Menüfenster geöffnet, welches die Konfiguration der einzelnen manöverspezifischen Parameter ermöglicht. Der erstellte Plan wird im unteren Teil des Nutzermenüs dargestellt.

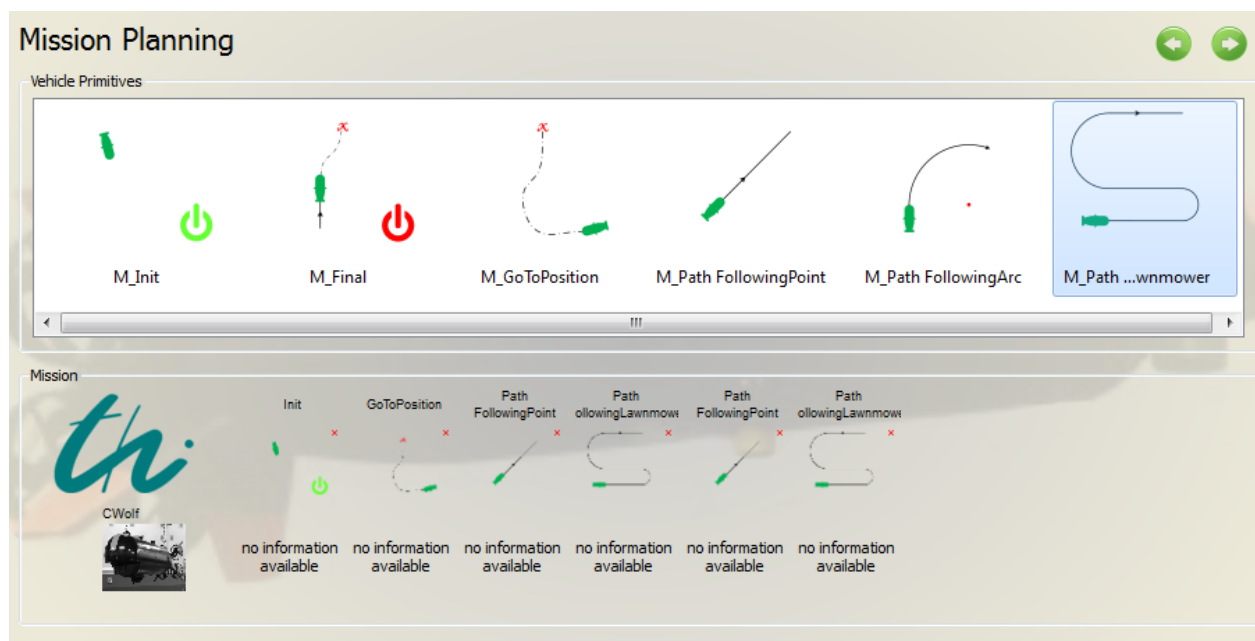


Abbildung 3.63: Nutzermenü für die elementbasierte Planung einer Mission

Abbildung 3.64 zeigt die Planungsoberfläche nach abgeschlossener Missionsdefinition. Der generierte Missionsplan wird als Textdokument gespeichert und an das Fahrzeug vor Missionsstart übergeben.

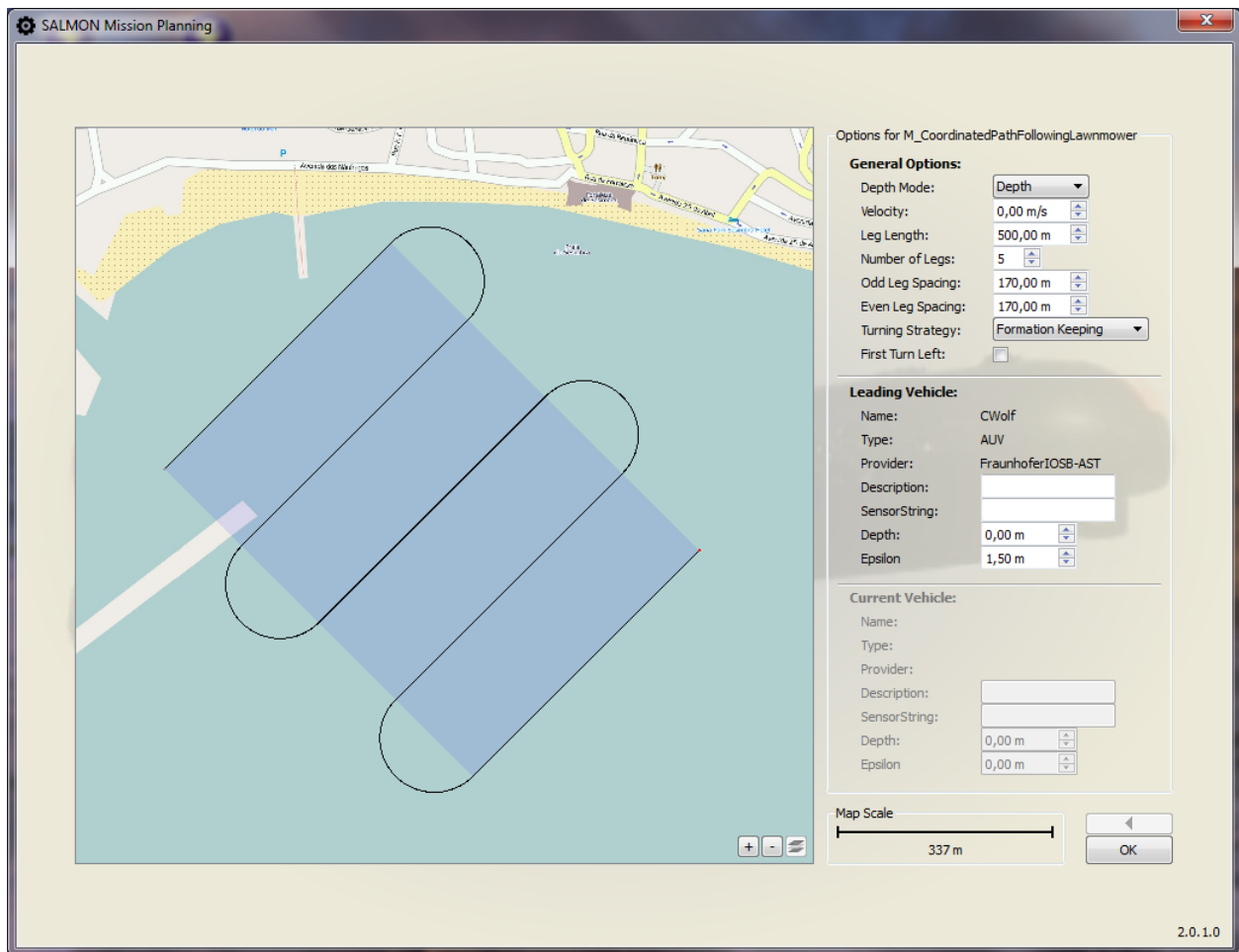


Abbildung 3.64: Planungsoberfläche für Messmissionen

3.7.2 Manöverprozessor

Die Führung des Fahrzeuges erfolgt über eine zustandsbasierte PD-Folgeregelung (siehe Abschnitt 3.6). Dieses Regelungskonzept erfordert eine abfahrbare stetig differenzierbare Solltrajektorie, welche durch einzelne Wegpunkte definiert werden kann. Um sicherzustellen, dass die erzeugte Solltrajektorie möglichst gut mit dem aus Strecken und Kreisbögen definierten Missionsplan übereinstimmt, sind charakteristische Wegpunkte entlang der Manöverelemente zu definieren.

Die Zerlegung der Strecken und Kreisbögen in charakteristische Wegpunkte sowie deren Abarbeitung während einer Mission erfolgt im Modul *ManoeuvreProcessor* (MP). Während einer Mission fordert der Autopilot eine definierte Anzahl von Wegpunkten vom Manöverprozessor an, dieser übergibt einen Wegpunktvektor an den Autopiloten und schaltet dabei auf die nächsten Manöverelemente weiter. Dieses Programm wurde im FG SAG in C++ entwickelt und in der bestehenden SIMULINK Simulationsumgebung unter Verwendung eines definierten Missionsplanes getestet (siehe Abbildung 3.65). Dabei wurde das in Abschnitt 3.6.3 vorgestellte Schnittstellenkonzept eingesetzt, um die programmspezifischen Datenstrukturen in die Simulink-Strukturen umzuwandeln.

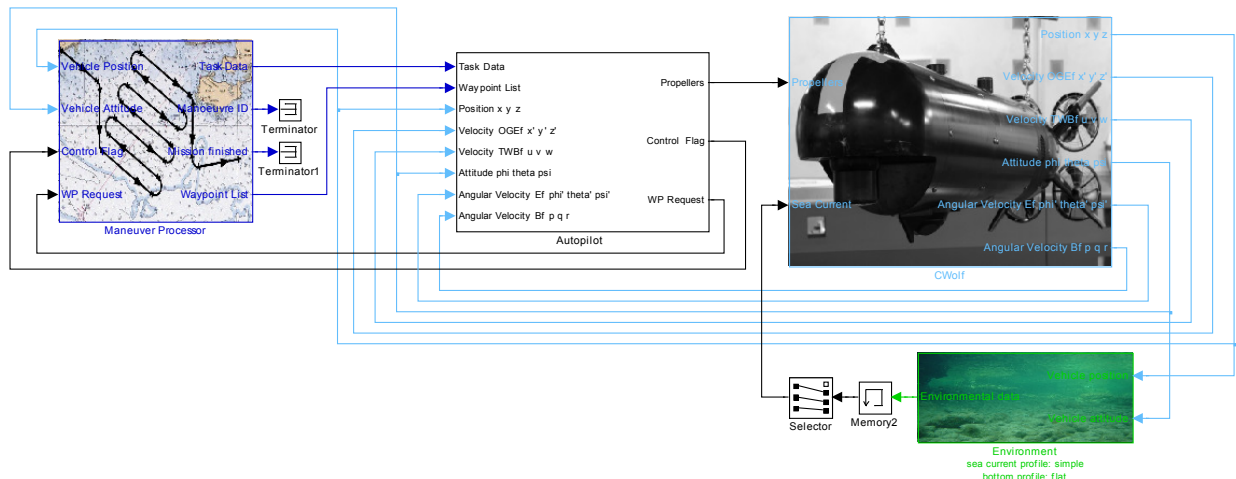


Abbildung 3.65 Simulink System zum Test des Zusammenspiels zwischen Manöverprozessor und Autopiloten

Um Messdaten im Untersuchungsgebiet aufzuzeichnen, wurde in Absprache mit dem norwegischen Partner IMR eine Mäanderform favorisiert. Das Tiefenprofil ändert sich dabei in Form eines Sägezahnprofils von der Wasseroberfläche bis zu einer vorgegebenen Tiefe. Während der Kurvenfahrten soll die Tiefe konstant bleiben. So ist es möglich, eine realistische 3D-Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet aufzunehmen. Um ein regelmäßiges GPS-Update durchführen zu können, soll das Fahrzeug bei jedem Auftauchen mindestens 10 s an der Wasseroberfläche bleiben. Abbildung 3.66 zeigt die aus dem Mäander zu generierenden Wegpunkte für einen vorgegebenen horizontalen Pfad und das dazugehörige vertikale Tauchprofil. Die dabei zu definierenden Parameter (minimale und maximale Tiefe $z_{\min}$ und $z_{\max}$, Tauchnicklage θ_{dive} , Zeit für GPS-Update,...) sind in einer XML-Datei hinterlegt und werden bei Programmstart vom Manöverprozessor geladen.

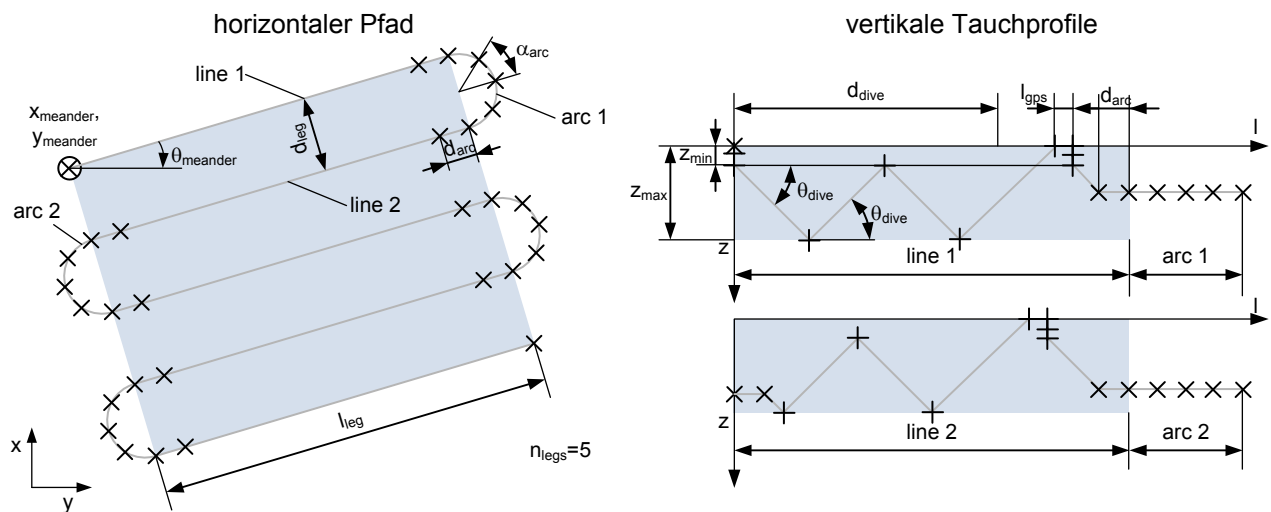


Abbildung 3.66: Definition der charakteristischen Wegpunkte für einen Mäander

3.8 Datenbankintegration

Die im Messbetrieb gewonnenen Daten werden im Einsatz lokal auf dem Measurement Computer (siehe Abbildung 3.1) abgelegt. Zudem können sie über das interne Netzwerk an den Scientific Computer gesendet werden. Zur weiteren Verwendung soll es die Möglichkeit geben, die Daten in eine übergeordnete Datenbank einzupflegen.

Von 4HJE wird hierfür seit Jahren erfolgreich ein einfaches Konzept verfolgt. Die Daten jedes Messparameters werden in einer strukturierten Textdatei abgelegt. Diese werden dann vom Kunden automatisiert in deren Datenbanken geladen. Die Datenbank und deren Auswertung (z.B. die Anzeige der Daten auf einer Internetseite) liegen dann in der Hand des Kunden.

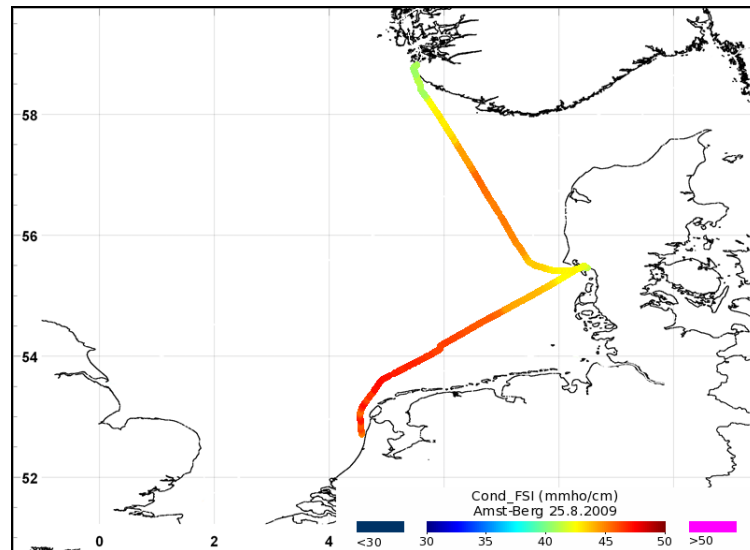


Abbildung 3.67: Darstellung von Daten auf einer Kundenwebseite¹

In Abbildung 3.67 ist solch eine Darstellung umgesetzt. Die Messwerte, die auf der Fahrt von Amsterdam nach Bergen aufgenommen wurden, werden in der Karte eingezeichnet. Unterschiedliche Messwerte werden durch unterschiedliche Farben angezeigt. Aufgrund der Diversität kundeneigener Datenbanken und -formate wurde bewusst auf eine eigene, komplexe Datenbank verzichtet.

3.8.1 Datenfiles

Die Daten werden in einer vorgegebenen Verzeichnisstruktur abgelegt:

D:\Working\DeviceData\[Sensorname]\[Kanalname]\[Dateiname].txt

zum Beispiel

D:\Working\DeviceData\Optode_A\Optode_A_Oxygen\Optode_A_Oxygen_20131028.txt

Für jeden Messparameter wird pro Tag eine Datei angelegt.

Abbildung 3.68 zeigt ein solches Datenfile. Es enthält neben dem eigentlichen Datensatz auch Meta-Informationen zu den gespeicherten Daten. Im Unterschied zum normalerweise von 4HJE verwendeten Datenformat enthalten die Datenfiles im SALMON-Projekt zusätzlich eine Tiefenangabe. Diese sagt aus, in welcher Tauchtiefe der Messwert aufgenommen wurde.

¹ http://ferrydata.gkss.de/index.cgi?seite=map_plot

\$METADATA										
\$Project; Salmon										
\$DateTime; 2013.10.28 08:34:46										
\$Filename; Optode_A_Oxygen_20131028.txt										
\$FORMATS										
\$1; Timestamp, Date Time; YYYY.MM.DD hh:mm:ss										
\$2; Oxygen, umol/l; Float										
\$3; Quality, Flags; Int										
\$4; MeasCount, Cnt; Int										
\$5; MeanTime, Sec; Int										
\$6; Minimum, umol/l; Float										
\$7; Maximum, umol/l; Float										
\$8; Variance, Units; Float										
\$9; Longitude, Deg; Float										
\$10; Latitude, Deg; Float										
\$11; Depth, m; Float										
\$DATASETS										
\$Timestamp	Oxygen	Quality	MeasCount	MeanTime	Minimum	Maximum	Variance	Longitude	Latitude	Depth
\$Date Time	umol/l	Flags	Cnt	Sec	umol/l	umol/l	Units	Deg	Deg	m
28.10.2013 08:34	219.155555	40	9	18	0.000000	281.899994	15437.95268	0.000000	0.000000	9.997751
28.10.2013 08:35	281.309099	0	11	20	281.000000	281.700012	0.058910	0.000000	0.000000	1.829927
28.10.2013 08:35	280.754547	0	11	20	280.200012	281.100006	0.080726	0.000000	0.000000	0.000000
28.10.2013 08:35	280.120007	0	10	18	279.899994	280.200012	0.010668	0.000000	0.000000	0.000000
28.10.2013 08:36	279.299999	0	11	20	278.799988	279.700012	0.088003	0.000000	0.000000	0.000000

Abbildung 3.68: Datenfile, in MS Excel geöffnet

3.8.2 Quality Bits

Wichtig für die Auswertung ist außerdem die Qualität der Messwerte. Hierfür stehen die Quality Bits. Damit werden verschiedene Systemzustände mitprotokolliert. Nur Messwerte, bei denen das Quality Bit gleich Null ist, sind uneingeschränkt verwertbar. Die Bedeutung der einzelnen Bits ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Quality Bits

Bit	Zahl	Beschreibung
0	1	Ungültiger Messwert. Der Messwertstring ist keine Integer- oder Floatzahl.
1	2	Overflow, mindestens ein Einzelwert ist zu groß.
2	4	Underflow, mindestens ein Einzelwert ist zu klein.
3	8	Timeout ist aufgetreten. Die Sonde hat in der vorgegebenen Zeit keine Daten geliefert.
4	16	Messwertverzögerung. Durch eine Variable läßt sich die Anzahl der Messwerte einstellen, die nach einem Prozesswechsel als "nicht brauchbar" markiert werden. Die entsprechende Info kommt von der Prozesssteuerung.
5	32	Falsche Anzahl von Kanälen. Jede Sonde liefert eine definierte Anzahl von Messwerten. Dieser Fehler tritt z.B. auf, wenn die Übertragung auf der Schnittstelle fehlerhaft ist.
6	64	Prozessstatus 1 = Wash
7	128	Prozessstatus 2 = Standby
8	256	Prozessstatus 3 = Empty
9	512	Prozessstatus 9 = Error
10	1024	Prozessstatus 8 = undefinierter Zustand
11	2048	Simulierte Daten

Treten mehrere Ereignisse ein, werden die entsprechenden Zahlenwerte addiert, z.B.

Timeout + Falsche Kanalzahl	$8 + 32 = 40$
Overflow + Standby	$2 + 128 = 130$
Ungültig + Wash	$1 + 64 = 65$

3.9 Systemintegration und Test

Während der Projektlaufzeit rüstete das Fraunhofer IOSB-AST das ursprüngliche Fahrzeug „CWolf“ für die Aufnahme des SALMON-Sensormoduls und den autonomen Betrieb um. Dafür wurde das ursprüngliche Hubtriebwerk entfernt und die horizontalen Thruster als vertikale Thruster verbaut, so dass diese die Aufgabe des Hubtriebwerkes übernehmen konnten. Des Weiteren wurde ein neuer Antennenturm aufgebaut. Dieser beinhaltet nun GPS, WLAN und ein USBL-Modem für die Kommunikation und Positionsbestimmung. Nachfolgende Abbildung zeigt das Fahrzeug vor und nach der Umrüstung.

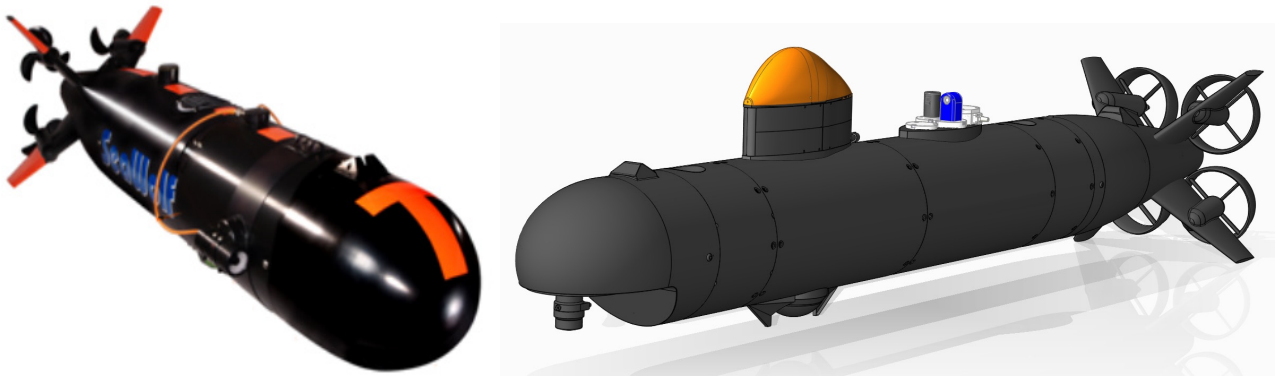


Abbildung 3.69: AUV „CWolf“ Ursprüngliches Fahrzeug vor der Umrüstung (links) - CAD-Modell des AUV „CWolf“ mit WQ-Sensorik (rechts)

Die Systemintegration und die dazugehörigen Tests sind sehr eng miteinander verzahnt. Somit wurde mit jeder neuen Maßnahme deren Funktionalität geprüft. Die entsprechenden Tests und Verfahren wurden im Abschnitt Simulationsmodell beschrieben.

Der Hüllkörper und die Trägerplatte für das SALMON-Sensormodul wurden vom Fraunhofer IOSB-AST konzipiert und im Auftrag gefertigt. Das Fahrzeugsegment wurde in intensiver Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konstruiert und aufgebaut.

Nachdem 4HJE die Sensorik in das Hüllsegment integriert und im Labor getestet hatte, wurde dieses Segment von der Fraunhofer Arbeitsgruppe final verkabelt und in das Fahrzeug integriert. Dabei musste die Trimmung und der Auftrieb des Gesamtfahrzeuges angepasst werden.



Abbildung 3.70: CAD-Modell des Hüllsegmentes für die WQ-Sensorik

Das Hüllsegment mit dem WQ-Sensorsystem besteht aus den Leitfähigkeits- und Sauerstoffsensoren, welche aus dem Fahrzeug herauschauen und ihre Messungen außerhalb der Fahrzeughülle durchführen (siehe Abbildung 3.71), sowie dem Spektrometer, für dessen Messungen Wasser durch den Fahrzeugdruckkörper durchgepumpt werden muss.



Abbildung 3.71: WQ-Sensorik im Fahrzeug

Um mit den Sensoren zu kommunizieren und die Stromversorgung zu gewährleisten, wurde eine Elektronikbox integriert. Die Auswertung der gemessenen Daten übernimmt das Measurement System (MS), ein Micro-PC, das die gewonnenen Daten für eine spätere Auswertung speichert und zusätzlich dem Missionsmanagement für Bahnplanungsverfahren zur Verfügung stellt.

Das Missionsmanagement und der Fahrzeugregler werden auf dem Scientific Computer (SC) ausgeführt. Dafür wurde im Fahrzeugführungssystem eine Schnittstelle integriert, mit der es möglich ist, die Antriebe des AUV's durch ein externes System, hier der Scientific-Computer, zu steuern. Das Fachgebiet SAG entwickelte hierfür eine Kommunikationsbibliothek unter Verwendung der Asio Cross-Plattform C++Bibliothek [17] für das UDP-Netzwerkprotokoll. Die untenstehende Abbildung zeigt die entwickelte Klassenstruktur.

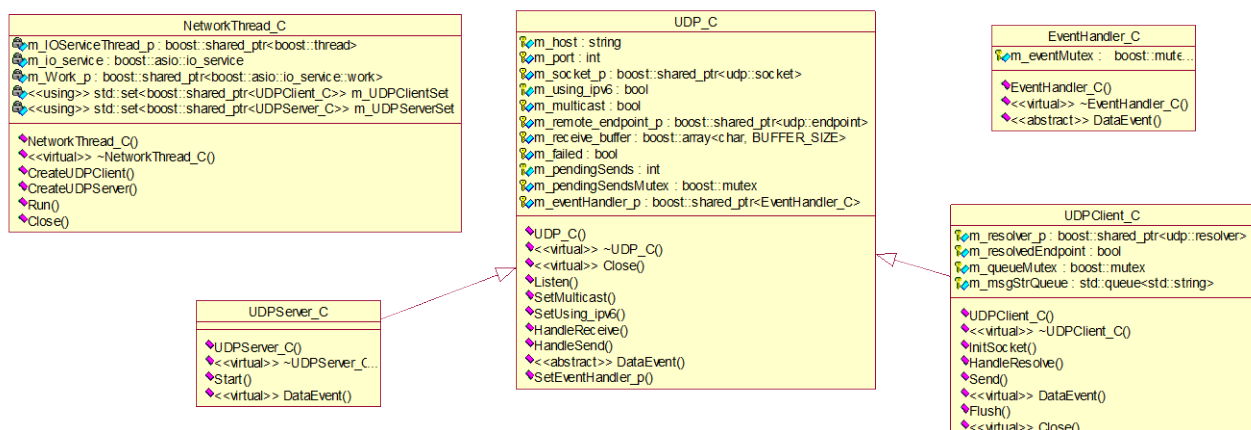


Abbildung 3.72: Klassenstruktur der Kommunikationsbibliothek

Durch diese Aufgabentrennung wurde die Flexibilität des Fahrzeugkonzeptes weiter erhöht. Es können nun rechenintensive Bahnplanungsalgorithmen auf einem dem Vehicle Guidance System (VGS) nicht zugehörigen Rechnersystem durchgeführt werden; somit wird der VGS-Computer entlastet.

Das VGS basiert auf der von der Fraunhofer Arbeitsgruppe entwickelten modularen Steuerungssystem ConSys. Der modulare Aufbau und die Einbindung des externen Fahrzeugreglers sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Des Weiteren wird mit der ConSys-GUI eine grafische Nutzerschnittstelle für die manuelle Fahrzeugführung und -überwachung durch einen Operator bereitgestellt.

Das Messsystem und der Scientific Computer wurden per Ethernet in die interne Fahrzeugkommunikation integriert. Die Stromversorgung erfolgte über die Fahrzeugbatterie, es wurde als Spannungsebenen die Batteriespannung und 12V zur Verfügung gestellt. Dies wurde mittels eines CAN-Schaltmoduls so gestaltet, dass während längerer Transferfahrten das Messsystem abgeschaltet werden konnte, um Energie zu sparen und die Einsatzdauer des Fahrzeuges zu erhöhen. Eine schematische Darstellung der Verkabelung des Sensorsystems mit den Systemen des Fahrzeuges ist Abbildung 3.74 dargestellt. Da für die Nitratmessungen mit dem Spektrometer Wasser durch das Fahrzeug gepumpt werden muss, wurde zusätzlich ein Leckagesensor integriert (Abbildung 3.73). Dieser meldet dem VGS, wenn Wasser in das Fahrzeug eingedrungen ist. Das Führungssystem veranlasst in einem solchen Fall ein Notauftauchen. Der eingesetzte Leckagesensor ist ein Produkt von Aquatica Digital und wurde ursprünglich für Unterwasserkameragehäuse entwickelt [3].

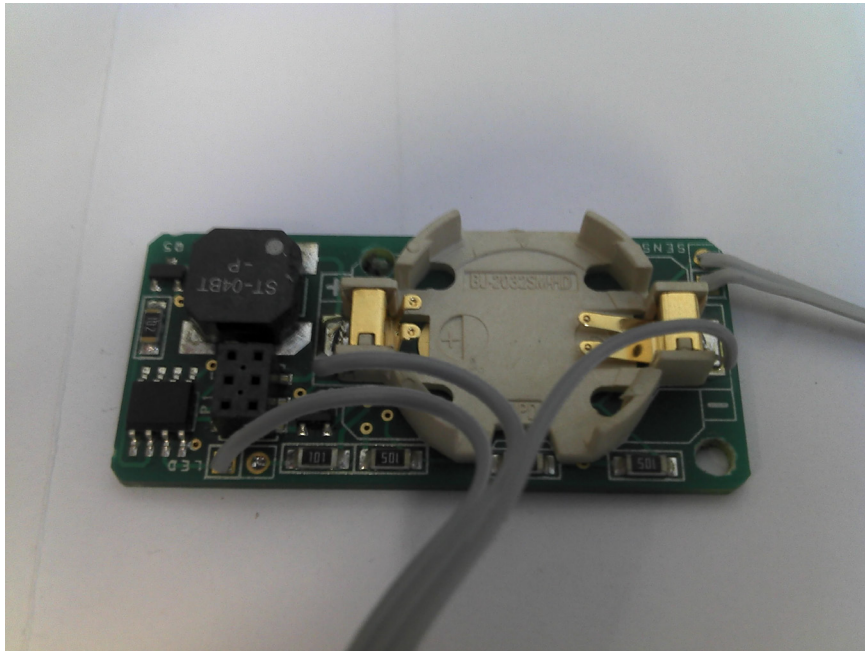


Abbildung 3.73: Leckagesensor

Es wurden mehrere Funktionstests mit dem neu aufgebauten System durchgeführt: elektrischer Funktionstest, Dichtheitstest und Integrationstest des Softwaresystems. Des Weiteren erfolgten mehrere Manöverfahrten in der Talsperre Heyda und Lütsche (siehe Abbildung 3.75 und Abbildung 3.76). Damit konnte

- das Sensorsystem getestet
- Identifikationsfahrten für die Modellierung des Fahrzeuges durchgeführt
- das Navigationsmodul des Fahrzeuges ausgelegt und
- die Funktionalität der Softwaremodule wie Autopilot und Fahrzeugsteuerung überprüft

werden. Mit den Daten, die aus den Testfahrten gewonnen wurden, wurde das Simulationsmodell erweitert und überprüft. Das wiederum die Basis für die durchgeführten Reglerentwürfe ist.

Payload Sektion

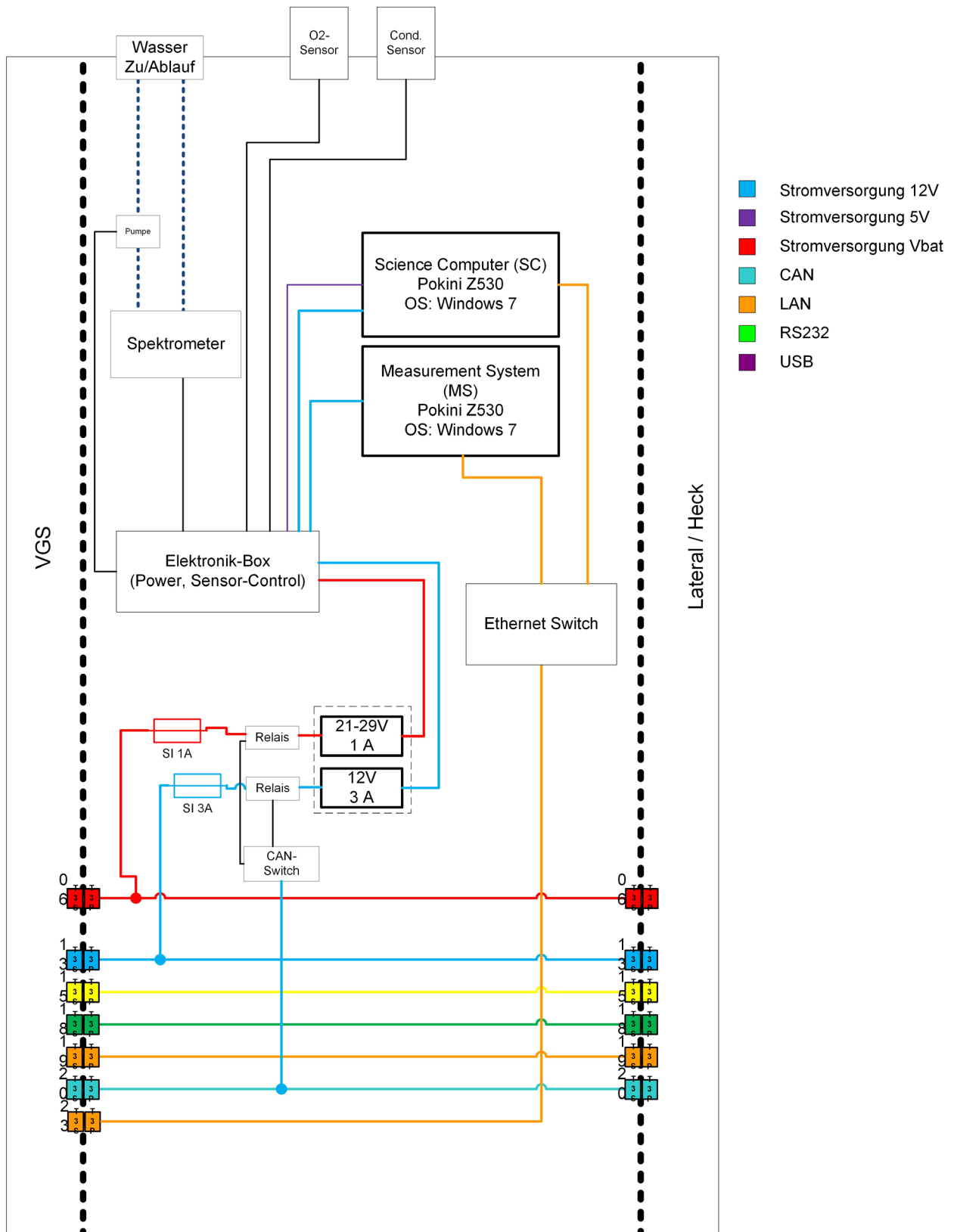


Abbildung 3.74: Verkabelungsplan des WQ-Segmentes



Abbildung 3.75: Talsperre „Heyda“ (nahe Ilmenau, Thüringen) [Foto: 01.10.2013 10:55]



Abbildung 3.76: Talsperre „Lütsche“ (nahe Oberhof, Thüringen) [Foto: 16.10.2013 11:59]

3.10 Abschlusstest

Das Ziel der Abschlusstests bestand im Test des Gesamtsystems bei Seeversuchen. Dabei gab es zwei Schwerpunkte: die autonome Führung des Fahrzeuges (siehe Abschnitt 3.10.1) und die Messung der Wasserqualität durch das entwickelte Sensorsystem (siehe Abschnitt 3.10.2). Für die zwei Wochen des Abschlusstests wurde dem Projektteam ein Seegebiet vom norwegischen Partner zur Verfügung gestellt. Für den Abschlusstest am IMR in Austevoll, Norwegen, übernahm das Fraunhofer IOST-AST den Transport des Fahrzeuges in das Versuchsgebiet sowie die Beschaffung der notwendigen Aus- und Wiedereinfuhrgenehmigungen. Während der gesamten Versuche wurde das Fahrzeug von zwei Mitarbeitern der Arbeitsgruppe betreut. Um Online-Daten wie aktuelle Fahrzeugposition und Messdaten während der Versuche den Operateuren zur Verfügung zu stellen, wurde das Fahrzeug tethered, mit einem LWL-Kabel, auch während der autonomen Missionen betrieben. Zusätzlich stand so noch die Option offen, in einem möglichen Notfall das Fahrzeug manuell zu steuern. Dies wurde benötigt, da im Testgebiet 2 Schiffsverkehr bestand und während der Versuche in die autonome Fahrzeugführung eingegriffen werden musste (Abbildung 3.81).

3.10.1 Autonome Führung des Fahrzeuges

Das Ziel dieses Arbeitsschwerpunktes lag in der Validierung und Adaption der Fahrzeugmodellierung und der Reglerauslegung sowie der Erprobung der entwickelten Führungsalgorithmen des AUV's „CWolf“. Während der Identifikationsfahrten und bei der Reglerauslegung war das Sensorsystem aktiv und loggte die gemessenen Daten zur Wasserqualitätsbestimmung.

Im ersten Schritt waren zusätzliche Identifikationsfahrten für die Fahrzeugmodellierung notwendig. Dabei dienten verschiedene Fahrten in „offener Kette“ zur Bestimmung der Parameter für Massenträgheit, Dämpfung, Auf- und Abtrieb sowie des Verhaltens der Aktuatoren. Es fand nach und nach eine Beaufschlagung des Fahrzeuges mit Kräften und Momenten statt. Mittels der unterschiedlichen Testmissionen konnte der folgende Versuchsplan zur Identifikation durchgeführt werden:

Identifikation - Fahrt in „offener Kette“

1. Vorwärtsfahrt - Kraft X - Geschwindigkeit
2. Tauchfahrt mit Hubtriebwerken - Kraft Z - Tiefe
3. Kurvenfahrt - Kraft X und Moment M - Geschw. und Kurs
4. Tauchfahrt mit Heck-Propellern - Kraft X und Moment N - Geschw. und Nicklage

Bei der Reglerauslegung hatte der Entwurf des Tiefe-Reglers Priorität, da die Bewegung des Fahrzeuges auf einem gegebenen Tiefenprofil realisiert werden musste. In verschiedenen Wasserschichten sollte das AUV „CWolf“ die Tiefe halten, damit die Messungen der Sensorik stabile Werte liefern konnten. Parallel zur Verbesserung der Regelung der Tauchfahrten lieferten Kurvenfahrten wichtige Daten, um das Modell für die Einstellung des Kurs-Reglers zu verbessern. Das Ab- und Auftauchen durch Änderung der Nicklage des Fahrzeuges ohne Nutzung der Hubtriebwerke sollte abschließend die Modellierung komplettieren.

Die Verifikation der entworfenen Regler erfolgt im Anschluss an die Erstellung eines ausgereiften Modells. Im Fall der Seeversuche mit dem AUV „CWolf“ konnte diese klare Trennung der Projektphasen nicht gewährleistet werden. Parallel zu den Identifikationsfahrten fanden bereits die Tests der einzelnen Regler statt:

Verifikation - Fahrt im „geschlossenen Regelkreis“

1. Tiefenprofil - Hubtriebwerke - Tiefe z_d
2. Vorwärtsfahrt - Heck-Propeller - Geschwindigkeit u_d
3. Kurvenfahrt - Heck-Propeller - Geschw. u_d und Kurs ψ_d
4. Tauchfahrt - Heck-Propeller - Geschw. u_d und Nicklage θ_d
5. Wegpunkt-Mission - Hubtriebwerke und Heck-Propeller - 2D-LoS

Zwei Tage vor Ende der Seeversuche in Austevoll (Norwegen) war die Ansteuerung der oberen beiden Heck-Propeller aufgrund eines vor Ort nicht reparablen Fehlers unmöglich. Der aus den Identifikationsfahrten am 29.10.2013 entwickelte Nicklage-Regler konnte deshalb nicht verifiziert werden. Nur die Umstellung der abschließenden Wegpunkt-Mission auf eine Kombination aus Oberflächenfahrt und Tiefenprofil machte den Komplettest des entwickelten Autopiloten möglich.



Abbildung 3.77: Wegpunkt-Mission in Austevoll (Norwegen) [Foto: 31.10.2013 14:08]

Für die Wegpunktmission am letzten Tag der Seeversuche wurden die online verfügbaren Karten des „Fischerei-Direktorates“ genutzt. Eine detaillierte Karte des Einsatzgebietes mit Tiefenangaben lieferte die Grundlage für die Festlegung einer mäanderförmigen Oberflächenfahrt durch die Bucht vor der Fischfarm. Insgesamt 45 Wegpunkte legten die Missionsdaten für den Autopiloten fest. So steuerte das AUV ausgehend von einem Referenzpunkt die einzelnen Wegpunkte an und ging an der tiefsten Stelle der Bucht in eine Tauchfahrt über, die ein Profil von bis zu 35 m Tiefe abdeckte (siehe Abbildung 3.82). Aufgrund der Dauer der Mission, die zwei Tauchgänge von jeweils etwa 15 min umfasste, beschränkte sich die Anzahl der absolvierten Missionen auf zwei. Beide mussten bedauerlicherweise aufgrund von Schiffsverkehr und der bestehenden Gefahr des Kappens der Lichtwellenleiter-Verbindung (LWL) abgebrochen werden. Die aufgenommenen Daten und das beobachtete Verhalten des Fahrzeuges während der Missionen sprachen für eine erfolgreiche autonome Testfahrt.



Abbildung 3.78: Testgebiet 1 in Austevoll, Norwegen



Abbildung 3.79: Fischfarm am IMR in Austevoll



Abbildung 3.80: Ausbringung des Fahrzeuges in das Testgebiet 2 in Austevoll



Abbildung 3.81: Fahrzeug im Testgebiet 2

3.10.2 Sensorsystem

Die Einsatzfähigkeit des Sensorsystems konnte im Feldversuch bestätigt werden.

3.10.2.1 Daten und Kommunikation

Bereits im Vorfeld wurde die korrekte interne Kommunikation überprüft. Die definierten Schnittstellen zwischen den verschiedenen Rechnern im System zum Austausch von Daten und Kommandos (siehe Abbildung 3.1 S.4) wurden auf korrekte Implementierung und Funktionstüchtigkeit untersucht. Die elektrische Integration in das Gesamtsystem konnte bereits vor dem Abschlusstest überprüft werden.

3.10.2.2 Sensorsystem

Die Tauglichkeit des Sensormoduls konnte bestätigt werden.

Die mechanische Dichtheit aller Komponenten wurde in Tauchtiefen bis 35 m experimentell nachgewiesen. Auch mechanische Schäden oder Fehlfunktionen (z.B. Lockerung von Verschraubungen) durch den Transport nach Norwegen und den dortigen Einsatz unter Wasser wurden nicht festgestellt. Alle elektrischen Elemente und Verbindungen arbeiteten während des Versuchszeitraums zuverlässig.

Die Standardsensorik (Sauerstoff, Leitfähigkeit, Temperatur) arbeitete erwartungsgemäß zuverlässig. Auch die in der Messstrecke eingesetzte Mikrozahnringpumpe bereitete keine Probleme. Diese ist sehr empfindlich gegenüber Fremdkörpern. Ein zuverlässiger Betrieb kann somit nur durch korrekte Montage der vorgeschalteten Filter gewährleistet werden. Durch die einwandfreie Arbeitsweise des Systems während der zwei Wochen kann davon ausgegangen werden, dass die Filter stets korrekt eingesetzt wurden.

Die Nitratmessung, die für dieses Projekt komplett umgearbeitet wurde, arbeitete auch unter Wasser zuverlässig. An keinem der verwendeten Bauteile konnten Fehlfunktionen aufgrund des erhöhten Drucks bzw. der Vibrationen festgestellt werden. Vereinzelt traten im Betrieb Probleme mit Luftblasen im System auf. Diese wurden jedoch meist nach kurzer Zeit (< 1 min) aus dem System gespült.

3.10.2.3 Messungen

Mehrere Messfahrten mit Tauchtiefen bis 35 m wurden durchgeführt. Für die Messung hat es sich als sinnvolles Verfahren herausgestellt, an verschiedenen Positionen ein Tiefenprofil zu tauchen. Also in der Reihenfolge

1. Position an der Oberfläche anfahren
2. Messung starten
3. Vertikal auf Tiefe x tauchen
4. Abwarten (messen)
5. Auf nächste Tiefe tauchen (3.)
6. Auftauchen
7. Messung beenden

In Abbildung 3.82 ist ein solches Tiefenprofil im zeitlichen Verlauf dargestellt. In den verschiedenen Tiefen wurde jeweils 2 Minuten gemessen. Die Temperatur steigt mit der Tauchtiefe erst an, bleibt dann ab ca. 10 m auf einem relativ konstanten Wert. Lediglich in großen Tiefen (>30 m) ist eine kleinere Abkühlung zu verzeichnen (siehe Abbildung 3.83).

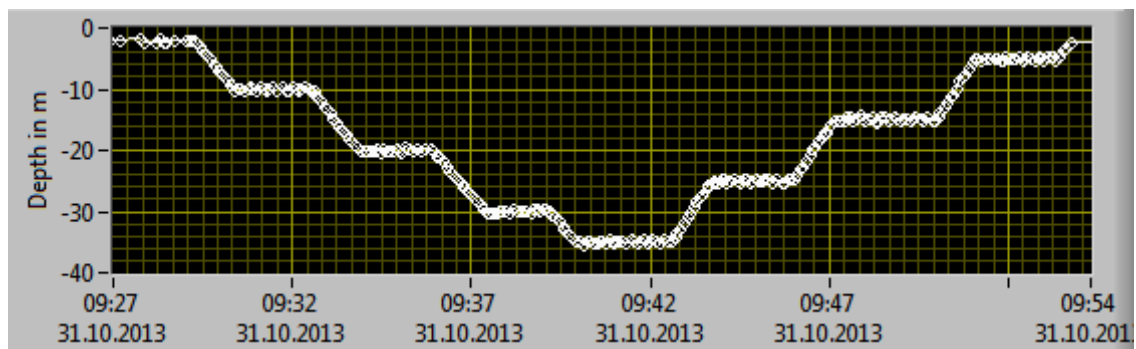


Abbildung 3.82: Tiefenprofil bei Messfahrt

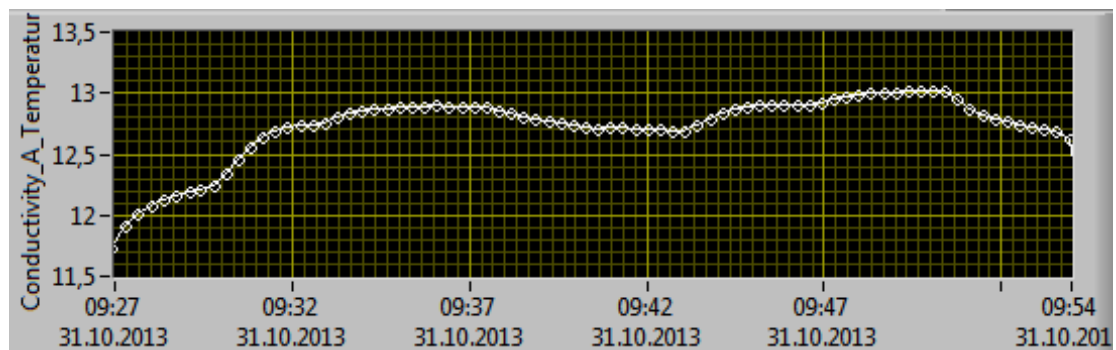


Abbildung 3.83: Temperatur in entspr. Tiefen (Abbildung 3.82)

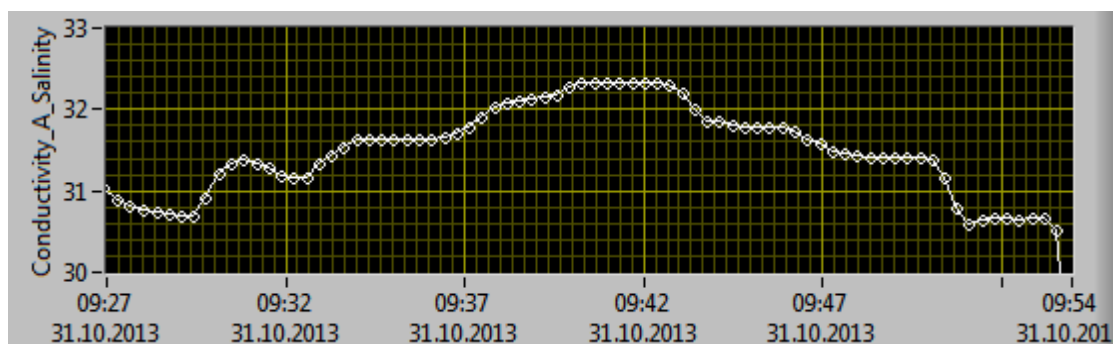


Abbildung 3.84: Leitfähigkeit in entspr. Tiefen (Abbildung 3.82)

Die Leitfähigkeit nimmt mit der Tiefe linear zu. Am tiefsten Punkt ist die Leitfähigkeit am größten, und somit auch der Salzgehalt.

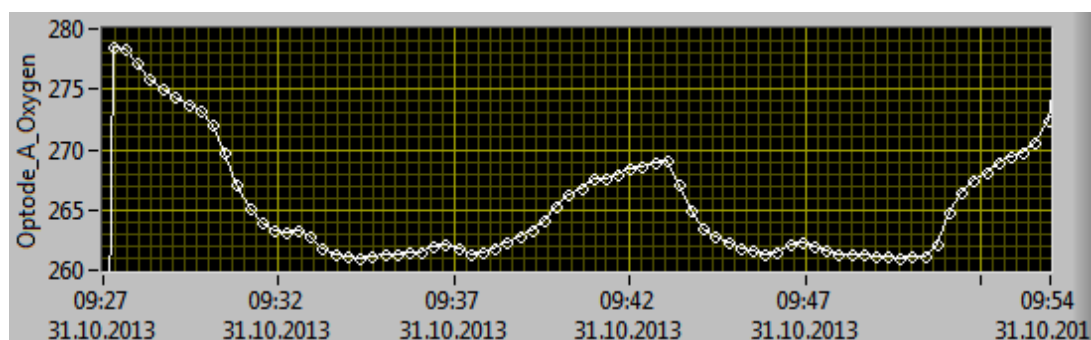


Abbildung 3.85: Sauerstoffkonzentration in entspr. Tiefen (Abbildung 3.82)

Die Sauerstoffkonzentration ist an der Oberfläche am größten und nimmt relativ schnell ab und bleibt dann auf einem konstanten Wert. In großer Tiefe (> 25 m) finden sich wieder größere Sauerstoffwerte.

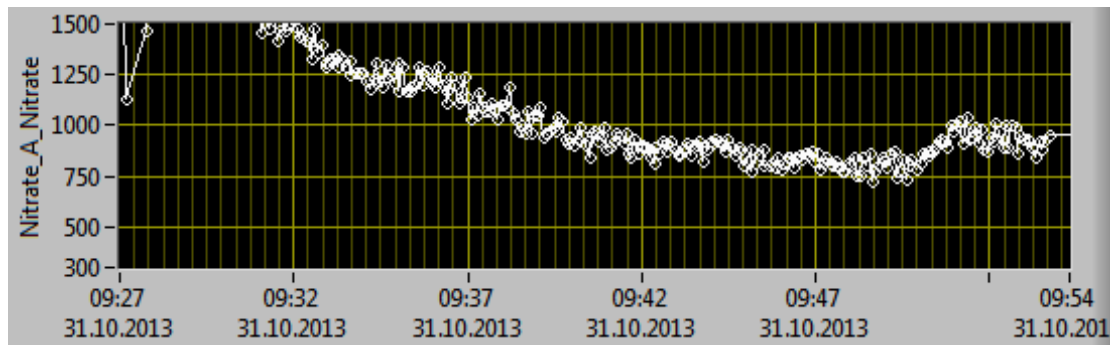


Abbildung 3.86: Nitratkonzentration in entspr. Tiefen (Abbildung 3.82)

Die Nitratkonzentration ist in verschiedenen Tiefen nicht über die gesamte Messdauer konstant. Möglich sind hier seitliche Strömungen, die Wasser mit geringerer Nitratkonzentration anspülen. Auch möglich ist ein –bisher noch nicht untersuchter– Einfluss der Lampentemperatur (Abbildung 3.75) auf das Spektrum.

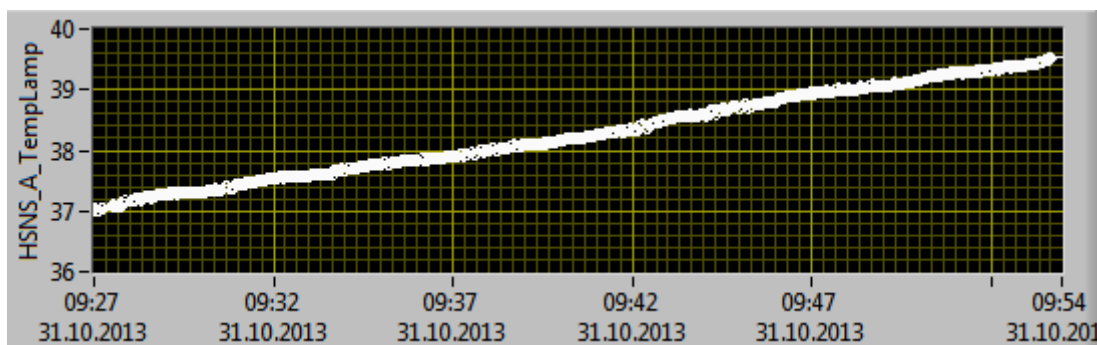


Abbildung 3.87: Temperatur der Deuteriumlampe in entspr. Tiefen (Abbildung 3.82)

Sind Messwerte in ausreichender Zahl vorhanden, können diese auch dreidimensional dargestellt werden (Abbildung 3.76).

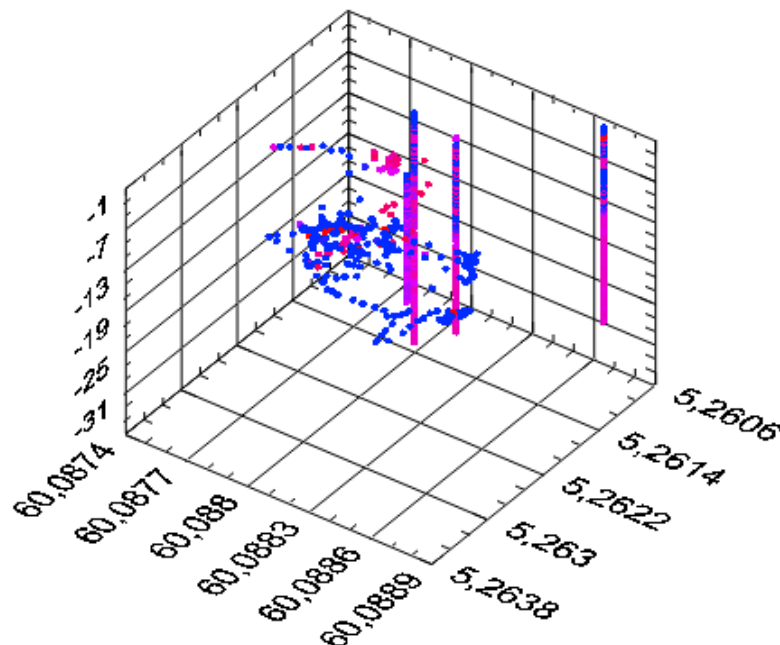


Abbildung 3.88: Nitratkonzentration, dreidimensional dargestellt

Die Darstellung der Werte auf einer Karte wurde (aufgrund der Multidimensionalität) im Rahmen des Projektes nicht realisiert.

3.10.2.4 Optimierungsmöglichkeiten

Im Feldversuch konnte gezeigt werden, dass das System funktioniert und alle erforderlichen Spezifikationen erfüllt. Optimierungsmöglichkeiten bestehen daher in der Vereinfachung des Systems. Einerseits ist eine Verringerung der Komplexität, andererseits eine Vereinfachung der Bedienung wünschenswert.

3.10.2.4.1 Handhabung

Im Moment ist es zur Initialisierung des Systems noch notwendig, dass ein Benutzer bestimmte Aktionen direkt auf dem Measurement PC (über Remote-Tools) ausführt. Hierzu gehört das Spülen der Messstrecke vor und nach den Messfahrten. Auch die Referenzmessungen des Spektrums von Reinstwasser, die vor jeder Messfahrt gemacht werden müssen, erfolgen bisher noch manuell.

Mit den vorhandenen Schnittstellen ist denkbar, diese Schritte zu automatisieren. Dann müsste der Benutzer am Measurement PC direkt keine Eingaben mehr machen. Der Bedienaufwand würde sich hiermit erheblich reduzieren.

3.10.2.4.2 Nitratmessung

Die Nitratmessung ist –wie bereits beschrieben– ein relativ aufwändiges Verfahren. Hinzu kommt, dass dafür Wasser in das Innere des Tauchkörpers gepumpt werden muss. Dies stellt für den Dauerbetrieb, vor allem bei unsachgemäßer Handhabung eine Gefahrenquelle für die enthaltene Elektronik bzw. das komplette AUV dar. Zudem muss das eintretende Wasser gefiltert und mit einer Pumpe bewegt werden.

In Zukunft ist ein anderer Ansatz denkbar. Falls es gelingt, die Nitratmessung, oder zumindest die Wasser berührenden Teile davon, nach außen an den Tauchkörper zu verlagern, würde das die Komplexität minimieren und die Handhabung vereinfachen.

Das Spülen des Systems wäre wesentlich einfacher, Pumpe und Filter könnten ggf. ganz entfallen. Auch wäre es nicht notwendig, Wasser in den Tauchkörper einzuführen, was zu erhöhter Betriebssicherheit des Gesamtsystems führen würde.

3.10.2.4.3 Darstellung

Zur aufschlussreicheren Präsentation der gewonnenen Daten wäre ein Tool interessant, das die gewonnenen Daten unter Berücksichtigung aller Dimensionen in einer Karte darstellt. Somit hätte der Kunde die Möglichkeit, die Gewässerqualitätsdaten in anschaulicher Art und Weise zu analysieren.

Bisher ist es möglich, Daten zweidimensional in einer Karte darzustellen (Abbildung 3.58) bzw. dreidimensional aufzubereiten (Abbildung 3.76). Eine Kombination daraus wurde im aktuellen Projekt nicht realisiert, wäre aber für die Zukunft sicherlich eine interessante Option.

4 Verwertungsmöglichkeiten

Durch die angenehme und professionelle Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern während der Projektlaufzeit, den positiven Ergebnissen des Gesamtsystems bei den zahlreichen Tests sowie dem erkannten Verbesserungspotential wurde die Weiterführung des Projektes u.a. im Rahmen von HORIZONT 2020 zwischen den Thüringer Partnern und IMR beschlossen. Dazu werden z.Z. mögliche Förderinstrumente und passende Ausschreibungen im neuen EU-Förderprogramm geprüft. Auch ist eine weitere bi- und multilaterale Zusammenarbeit im Rahmen von Projekten und Forschungsoperationen angedacht.

Die einzelnen Projektpartner verwerten die erzielten Ergebnisse wie folgt:

Technische Universität Ilmenau

Die erzielten Ergebnisse im Projekt SAMON dienen der universitären Qualifikation und Weiterbildung von Mitarbeitern und Studenten an der Technischen Universität Ilmenau. Diese sind im Einzelnen:

- Herr M.Sc. Remon Al Azrak vom Fachgebiet CEG nutzte die erzielten Ergebnisse für seine Graduiertenarbeit zum Dr.Ing..
- Herr B.Sc. Ralf Taubert schrieb seine Masterarbeit zum Thema „Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Modellidentifikation und zur Unterstützung beim automatischen Reglerentwurf für autonome Unterwasserfahrzeuge“ am Fachgebiet SAG.
- In das Projekt SALMON waren im Fachgebiet SAG zwei wissenschaftliche Hilfskräfte integriert, deren Arbeiten ihrer wissenschaftlichen Qualifikation dienen.
- Im Rahmen des Hauptseminars „Navigation“ im Sommersemester 2011 erarbeiteten Studenten ein Konzept zur Ermittlung von Unterwasserschadstoffquellen.

Die während des Projektes entwickelten Softwaremodule können für zukünftige Projekte oder im universitären Alltag eingesetzt werden. So kann das menügeführte Planungstool für zukünftige Arbeiten im Unterwasserbereich genutzt werden. Die entwickelte Kommunikationsbibliothek wurde unter Verwendung der Asio Bibliothek [17] erstellt. Dies ermöglicht eine leichte Erweiterbarkeit für andere Netzwerkprotokolle und die Nutzung auf anderen Zielplattformen. So kann diese Bibliothek für den Aufbau von neuen Praktikumsversuchen eingesetzt werden.

Das in Simulink entwickelte modulare Fahrzeugmodell sowie das Konzept zur automatischen Bestimmung der Modellkoeffizienten unter Verwendung der Parameteroptimierung sind einfach auf andere Unterwasserfahrzeuge anzuwenden. Der Weiteren ermöglichte das MBD eine Übersetzung des Simulink-Systems in C, wodurch das Fahrzeugmodell einfach in den AST-Fahrzeugsimulator zu integrieren ist.

Ausgewählte Ergebnisse des Projektes können als Praxisbeispiele in die Lehrveranstaltungen einbezogen werden. Dies führt zu einer besseren Vermittlung des theoretischen Stoffes und so zur Qualitätssteigerung bei der studentischen Ausbildung.

Fraunhofer IOSB-AST

Die Gruppe Maritime Systeme des Fraunhofer IOSB-AST entwickelt unbemannte Unterwassersysteme, wobei das Projekt SALMON zum wissenschaftlich/technischen Erkenntnisgewinn der Gruppe beigetragen konnte. So existiert jetzt ein einsetzbares System für das WQ-Monitoring auf Basis des AUV „CWolf“. Dies kann als Dienstleistung oder als Gesamtsystem für WQ-Monitoring in offenen Gewässern vermarktet werden. Des Weiteren wurden viele Erfahrungen bei der Auslegung von Navigationsfiltern ge-

wonnen. Dieses Wissen kann bei der Entwicklung weiterer Fahrzeuge eingesetzt werden.

Während des Projektes wurde die Steuerungssoftware ConSys auf dem AUV eingesetzt und für das Projekt entsprechend erweitert. Neue Schnittstellen für die externe Fahrzeugführung wurden definiert und implementiert. Durch den Einsatz auf dem Fahrzeug wurden Softwarefehler während der Tests gefunden und behoben; somit wurde die Softwarequalität weiter verbessert. Da ConSys die Basis für alle an der Arbeitsgruppe vorhandenen und entwickelten Fahrzeugsysteme ist, haben die Verbesserungen einen direkten Mehrwert für die Gesamtfahrzeugflotte.

-4H- JENA engineering GmbH

Eine umfassende und kosteneffiziente Erfassung der Wasserqualität der europäischen Küsten- und küstennahen Gewässer ist im Hinblick auf die Einführung der europäischen maritimen und marinen Direktiven von wachsender Bedeutung, um sie auch bei intensiver wirtschaftlicher Nutzung, z.B. durch Aquakultur, als Lebensraum zu erhalten. Die Aquakultur gewinnt besonders wegen der Überfischung zunehmend an Bedeutung. Die kontrollierte Aufzucht von aquatischen Organismen, insbesondere Fischen, Muscheln, Krebsen und Algen hat aber auch ökologische Folgen. Probleme ergeben sich z.B. aus der Verschmutzung und Eutrophierung von Gewässern, insbesondere in marinen Aquakulturen, aufgrund nicht vollständig verwerteter Nahrung, Ausscheidung der Fische und toten Fischen. Zusätzlich sind die in unnatürlich großen und dichten Verbänden gehaltenen und im Hinblick auf maximale Erträge gezüchteten Fische krankheitsanfälliger als Wildfische und benötigen deshalb Antibiotika oder andere Mittel gegen Parasiten, die ebenfalls die Ökosysteme der Umgebung und die menschliche Gesundheit gefährden. Hier bestehen sowohl der Bedarf als auch die Notwendigkeit, die für die Fischzucht notwendige Nährstoffeinspeisung zu optimieren sowie den Abfluss ins Meer und damit gleichbedeutend die Beeinträchtigung der Umwelt durch Abfallstoffe so gering wie möglich zu halten. Die in diesem Projekt entwickelte, auf autonomen Unterwasserfahrzeugen gründende Systemlösung für die automatisierte Überwachung der Wasserqualität hat im Abschlusstest in einem norwegischen Seegebiet um Aquafarmen vielversprechende Ergebnisse geliefert. Es konnte der Nachweis einer unter Wasser ablaufenden Nitratmessung erbracht werden. Die komplette Systemlösung stellt damit eine autonome, fahrende Sensorplattform dar, die einen Bereich im Küstenraum nach „Fahrplan“ sondieren kann. Dabei erfolgen automatische Multiparametermessungen nicht wie bisher nur punktuell, sondern räumlich variabel und in unterschiedlichen Tiefen. Auch wenn es während der Projektlaufzeit nicht möglich war, die Entwicklung in ein operationelles System zu überführen, wird die -4H- JENA engineering GmbH weitere personelle und finanzielle Mittel einsetzen, um miniaturisierte Sensorsysteme zur Überwachung der Wasserqualität am Markt etablieren zu können. Zur erweiterten Nutzung und innovatorischen Umsetzung der Projektergebnisse für die Überführung in operationelle Systeme sind allerdings in weiterer Kooperation mit den Thüringer Partnern und dem Norwegischen Institute of Marine Research (IMR) noch Aufwände an Forschungs- und Entwicklungsleistung erforderlich. Die Firma beabsichtigt daher, die Arbeiten kurzfristig im Rahmen eines Projektes, z.B. im Programm HORIZONT 2020, fortzusetzen.

5 Durchgeführte bzw. geplante Veröffentlichungen

Die erzielten Ergebnisse des Projektes wurden auf zwei internationalen Fachkonferenzen - der Oceans'2013 MTS/IEEE Bergen und der Oceans'2014 MTS/IEEE Taipei - vorgestellt. Die einzelnen Veröffentlichungen liegen dem Sachbericht als Anlage bei.

- EICHHORN, MIKE; TAUBERT, RALF; AMENT, CHRISTOPH; JACOBI, MARCO AND PFUETZENREUTER, TORSTEN: *Modular AUV System for Sea Water Quality Monitoring and Management* - Oceans' 2013 MTS/IEEE Bergen, 2013.
- AL AZRAK, REMON; TREICHEL, KAI AND REGER, JOHANN: *Discrete-Time AUV Tracking Controller Design Based on Disturbance Rejection and Dynamic Trajectory Planning* -Oceans' 2013 MTS/IEEE Bergen, 2013.
- TAUBERT, RALF; EICHHORN, MIKE; AMENT, CHRISTOPH; JACOBI, MARCO; KARIMANZIRA, DIVAS AND PFUETZENREUTER, TORSTEN: *Model Identification and Controller Parameter Optimization for an Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicles* - Oceans' 2013 MTS/IEEE Taipei, 2014.

Auf diesen o.g. Konferenzen wurde der angefertigte Projektflyer ausgelegt und Interessenden im Gespräch übergeben.

Über die Seeversuche in Norwegen wurde ein Artikel verfasst und in:

- JACOBI, MARCO: *Thüringer Technologie für Wasserqualitätsmonitoring in Norwegen* – VDI Thüringer Bezirksverein, Thüringer Mitteilungen, Ausgabe Januar bis März 2014 veröffentlicht.

Des Weiteren ist geplant, die wichtigsten Ergebnisse des Projektes in einem Journal-Artikel zu veröffentlichen.

Abkürzungsverzeichnis

4HJE	-4H- JENA e ngineering GmbH
AST	Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB Institutsteil A ngewandte S ystem t echnik
AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
CEG	Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Regelungstechnik (engl. C ontrol E ngineering G roup)
HIL	H ardware-in-the- L oop
IMR	Institute of M arine R esearch, Bergen, Norway
MBD	M odel B ased D esign
MCI	University of Southern Denmark, M ads C lausen Institute
MS	M easurement S ystem
ROV	r emote o perated v ehicle
SAG	Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Systemanalyse (engl. S ystems A nalyses G roup)
UDP	U ser D ata P rotocol
VGS	V ehicle G uidance S ystem
WQ	W asser q ualität

Literatur

- [1] AANDERAA: *Conductivity sensor*, <http://www.aanderaa.com/productsdetail.php?Conductivity-sensor-9> (2014)
- [2] AANDERAA: *Oxygen Optodes*, <http://www.aanderaa.com/productsdetail.php?Oxygen-Optodes-2>
- [3] AQUATICA DIGITAL: *Moisture and vacuum sensor system*, http://aquatica.ca/en/accessories_surveyor.html (2014)
- [4] CONRAD: *Digitaler Temperatur-Sensor Hygrosens TSIC506-TO92 -10 - +60 °C Gehäuseart TO 92*, <http://www.conrad.de/ce/de/product/506360/Digitaler-Temperatur-Sensor-Hygrosens-TSIC506-TO92-10-60-C-Gehaeuseart-TO-92> (2014)
- [5] CONRAD: *Labkit USB-PC-Adapter Hygrosens TSIC-LABKIT-USB*, <http://www.conrad.de/ce/de/product/502198/Labkit-USB-PC-Adapter-Hygrosens-TSIC-LABKIT-USB> (2014)
- [6] EICHHORN, MIKE; PFÜTZENREUTER, TORSTEN; SCHMIDT, MANFRED UND WALTL, BERND: *Modellierung, Regelung und Navigation von Teilautonomen, Ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen*, in: *at - Automatisierungstechnik* (2001), Band: 49, Nr. 8, S. 373-380.
- [7] FLETCHER, BARBARA: *Chemical plume mapping with an autonomous underwater vehicle - OCEANS, 2001 MTS/IEEE*, (2001).
- [8] FOSSEN, THOR I., *Guidance and control of ocean vehicles*, Chichester [u.a.]: Wiley, (1994).
- [9] FOSSEN, THOR I.: *Marine Control Systems*, ISBN: 82-92356-00-2, Marine Cybernetics, Trondheim (2002).
- [10] GAMMA, ERICH; HELM, RICHARD; JOHNSON, RALPH UND VLISSIDES, JOHN: *Entwurfsmuster. Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software. 5., korrigierter Nachdr*, ISBN: 3827318629, Verlag: Addison-Wesley, München (2001).
- [11] GLOTZBACH, THOMAS; PFUETZENREUTER, TORSTEN; JACOBI, MARCO; VOIGT, ANDERAS; RAUSCHENBACH, THOMAS (2009): *CViewVR: A High-performance Visualization Tool for Team-oriented Missions of Unmanned Marine Vehicles*. In : 8th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT2009) (2009).
- [12] HERAEUS NOBLELIGHT GMBH: *FiberLight*, http://www.heraeus-noblelight.com/de/products_1/optikanalytik_1/fiberlight.aspx (2014).
- [13] HNP MIKROSYSTEME GMBH: *Mikrozahnringpumpe mzz-2521 Pumpe für dosiertechnische Anwendungen in der Analysetechnik*, <http://www.hnp-mikrosysteme.de/hupe/mikrozahnringpumpen/niederdruckbaureihe/mzz-2521.html>
- [14] HNP MIKROSYSTEME GMBH: *Steuerung S-KG Drehzahlregelung bei kontinuierlichen Dosieraufgaben*, <http://www.hnp-mikrosysteme.de/hupe/zubehoer/steuerungen/s-kg.html>
- [15] JETI TECHNISCHE INSTRUMENTE GMBH, *VersaPic*, <http://www.jeti.com/cms/index.php/oem-components-56/electronics/versapic> (2014).
- [16] JIANG, ZHONGMING UND WANG, ZHENG: *Ermittlung einer Schadstoffquelle Unterwasser – Hauptseminar Navigation*, Sommersemester 2011 Technische Universität Ilmenau (2011).
- [17] KOHLHOFF, CHRISTOPHER, "Boost.Asio," http://www.boost.org/doc/libs/1_55_0/doc/html/boost_asio.html, (2014).
- [18] LEIBNIZ-INSTITUT FÜR PHOTONISCHE TECHNOLOGIEN: *Nitratanalyse*, <http://www.ipht-jena.de> (2014).
- [19] LI, WEI; FARRELL, JAY A.; PANG, SHUO UND ARRIETA, RICHARD M.: *Moth-Inspired Chemical Plume Tracing on an Autonomous Underwater Vehicle*, in: *IEEE Transactions on Robotics* (2006), Band: 22, Nr. 2, S. 292-307.
- [20] MARTINS, ALFREDO, ALMEIDA; JOSÉ MIGUEL, SILVA, EDUARDO UND PEREIRA, FERNANDO LOBO: *Hybrid Maneuver for Gradient Search with Multiple Coordinated AUVs - Proceedings of 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, (2004).
- [21] MATHWORKS: *Mathworks Website* <http://www.mathworks.com/>, (2014).
- [22] MATHWORKS: *Simulink Coder: Generate C and C++ from Simulink and Stateflow models*, <http://www.mathworks.com/products/simulink-coder/>, (2014).
- [23] MATHWORKS: *Simulink: Simulation and Model Based Design*, <http://www.mathworks.com/products/simulink/>, (2014).
- [24] TAUBERT, RALF: *Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Modellidentifikation und zur Unterstützung beim automatischen Reglerentwurf für autonome Unterwasserfahrzeuge - Masterarbeit*, Technische Universität Ilmenau (2014).
- [25] TAUBERT, RALF; EICHHORN, MIKE; AMENT, CHRISTOPH; JACOBI, MARCO; KARIMANZIRA, DIVAS AND PFUETZENREUTER, TORSTEN: *Model Identification and Controller Parameter Optimization for an Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicles - Oceans' 2014 MTS/IEEE Taipei*, (2014).
- [26] VOIGT, ANDERAS; PFUETZENREUTER, TORSTEN AND RENKEWITZ HELGE: *CViewVR - Visualisierung von Unterwasserszenarien und Sensorsimulation zur Validierung von AUV-Führungssystemen*, Tagungsband zur Konferenz "Computergraphik für die Praxis", (2011).