

## Abschlussbericht zur Bekanntmachung

### Verbundname

*Technologies for Rapid Ice Penetration*

*and*

*Subglacial Lake Exploration*

### Akronym

*TRIPLE-nanoAUV 1*

### Teilprojektname

*nanoAUV GNC, Einschmelzsonde und Basisstation*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

**Förderkennzeichen:**

**50NA2009**

**Laufzeit des Vorhabens:**

**01.09.2020 bis 30.06.2023**

**Ausführende Stellen:**

Institut für Regelungstechnik  
der RWTH Aachen University  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery  
Campus-Boulevard 30  
D-52074 Aachen

III. Physikalisches Institut B  
RWTH Aachen University  
Univ.-Prof. Dr.  
Christopher Wiebusch  
Otto-Blumenthal-Straße  
D-52074 Aachen

Lehrstuhl für Methoden der Mo-  
dellbasierten Entwicklung der  
RWTH Aachen University  
Univ.-Prof. Dr. Julia Kowalski  
Eilfschornsteinstr. 18  
D-52062 Aachen

Tel: +49 241 80 27500

[h.vallery@irt.rwth-aachen.de](mailto:h.vallery@irt.rwth-aachen.de)

[www.irt.rwth-aachen.de](http://www.irt.rwth-aachen.de)

Tel: +49 241 80 27301

[wiebusch@physik.rwth-](mailto:wiebusch@physik.rwth-aachen.de)

[aachen.de](http://aachen.de)

[www.institut3b.physik.rwth-](http://www.institut3b.physik.rwth-aachen.de)  
[aachen.de](http://aachen.de)

Tel: +49 241 80 99150

[kowalski@mbd.rwth-aachen.de](mailto:kowalski@mbd.rwth-aachen.de)

[www.mbd.rwth-aachen.de](http://www.mbd.rwth-aachen.de)

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhalt

1	Gesamtziele des Vorhabens .....	6
2	Kurzdarstellung.....	8
2.1	Aufgabenstellung .....	8
2.2	Voraussetzungen der Vorhabendurchführung .....	8
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
2.4	Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation .....	11
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	11
3	Eingehende Darstellung .....	12
3.1	AP 1100: Projektmanagement .....	12
3.2	AP 1430: Software & Data Handling .....	12
3.3	AP 1730: Übergreifendes Projektcontrolling TRIPLE - RWTH .....	13
3.4	AP 1830 Risiko Management - RWTH.....	14
3.5	AP 2700 GNC.....	15
3.6	AP 2710 GNC - Localization .....	15
3.7	AP 2720: GNC – Perception.....	28
3.8	AP 2730: GNC – Path Planning.....	29
3.9	AP 2740: GNC – Decision Making.....	32
3.10	AP 2750: GNC – Control .....	32
3.11	AP 3E00 Simulation .....	36
3.12	AP 3100: System (Schmelzsonde) .....	37
3.13	AP 3300: CDHS .....	40
3.14	AP 3830: Navigation Support nanoAUV.....	41
3.15	AP 3900: Steering.....	44
3.16	AP 3B00: Cable .....	47
3.17	AP 3D00: AIT .....	48
3.18	AP 4100: System (Oberflächenstation).....	48
4	Nutzen und Verwertbarkeit.....	52
5	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	56
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	57

7	Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	58
8	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	59
9	Literaturverzeichnis.....	63

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AIT	Assembly, Integration and Testing (Integration und Test von Systemen)
AHRS	Mahony Filter
AP	Arbeitspaket
APU	Autonomous Pinger Unit
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (Autonomes Unterwasserfahrzeug)
BE	Buoyancy Engine (Auftriebsmodul)
BELUGA	Bezeichnung des Breadboard-Modells für die Integration der Navigations-sensorik („Beluga-Nase“) – kein allgemein standardisiertes Akronym, sondern projektspezifisch (ggf. als Eigenname führen)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAN	Controller Area Network (Feldbus zur Kommunikation im Fahrzeug/Sub-systemen)
CDHS	Command and Data Handling System (System zur Steuerung und Daten-verwaltung)
CE	Concurrent Engineering
COM	Communication
DAGA	Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Akustik (Konferenz/Verband)
DC/DC	Gleichspannungswandler (DC/DC converter)
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
DPTH	Depth Sensor (Tiefensensor)
DVL	Doppler Velocity Log (Sensor zur Geschwindigkeitsmessung unter Wasser)
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EKF/ES-EKF	(Error-State) Extended Kalman Filter
Eth	Ethernet (Netzwerktechnologie für Datenübertragung)
FDIR	Fault Detection, Isolation and Recovery
FRS	Forefield Reconnaissance System
GNC	Guidance, Navigation and Control
GNSS	Global Navigation Satellite System
GUI	Graphical User Interface
ICE CTD	Conductivity Temperature Depth Sensor
IMU	Inertial Measurement Unit
InEKF	Invariant Extended Kalman Filter
IRT	Institut für Regelungstechnik
JTAG	Joint Test Action Group (Standardisierte Schnittstelle für Test und Pro-grammierung elektronischer Geräte)
KoKoS	Kommunikations- und Kontrollsystem
LQI	Linear Quadratic Integrator
LRS	Launch-and-Recovery System
MBD	RWTH Lehrstuhl für Methoden der Modellbasierten Entwicklung in den Computergestützten Ingenieurwissenschaften
MHD	Mahalanobis-Distanz
MM	Movable Mass
MoDo	TRIPLE Teilprojekt
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
nanoAUV	Miniaturisiertes autonomes Unterwasserfahrzeug
OBC	On-Board Computer

PLC / PowerLAN / Powerline	Powerline Communication (Datenübertragung über Stromleitungen)
PLC	Programmable Logic Controller
POI	Point of Interest
ROS/Gazebo	Robot Operating System / Simulationsumgebung
RTT/TDOA	Round-Trip-Time / Time-Difference-of-Arrival
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SIL	Software-in-the-Loop (Simulationsmethode zur Softwarevalidierung)
SINS	Strapdown Inertial Navigation System (Trägheitsnavigationssystem ohne kardanische Aufhängung)
SRR	System Requirements Review
TRIPLE	Technologies for Rapid Ice Penetration and Subglacial Lake Exploration
TRL	Technology Readiness Level
USBL	Ultra Short Baseline (akustisches Navigationssystem)
VirSat	Virtual Satellite Software
VFH+	Vector Field Histogram Plus (Algorithmus zur Hindernisvermeidung in der mobilen Robotik)
YOYO-Trajektorie	Typ einer Missionsbahn („auf und ab“-Bewegung)
Zynq	Xilinx Zynq (System-on-Chip Plattform von Xilinx für FPGA/Prozessorintegration)

## 1 Gesamtziele des Vorhabens

Das Gesamtziel der TRIPLE-Projektlinie ist die Erforschung von subglazialen Wasserwelten von Monden des äußeren Sonnensystems und die Suche nach Leben. In einer terrestrischen Mission soll zur Demonstration der entwickelten Technologien ein subglazialer See in der Dome-C Region der Antarktis exploriert werden. Das TRIPLE-System besteht aus einer teilautonomen Einschmelzsonde, einem vollautonomen Kleinst-Tauchroboter (nanoAUV) als Nutzlast der Einschmelzsonde und einem AstroBioLab zur automatisierten Untersuchung von Flüssigkeits- und Sedimentproben. Im Vorhaben TRIPLE-nanoAUV 1 wurde die Phase I der Projektlinie durchgeführt. Hier wurde, aufbauend auf der bereits abgeschlossenen Phase 0-Studie, ein vollständiges Konzept für die genannten drei Komponenten entwickelt. Das TRIPLE-Konsortium ist ein interdisziplinärer Verbund von Arbeitsgruppen der Ingenieurwissenschaften, Geo- und Naturwissenschaften, sowie Mathematik und Informatik, die ihre Expertise in TRIPLE bündeln.

Die Schmelzsonde soll in der Dome-C-Region den etwa 3,3 km dicken Eispanzer durchschmelzen und das nanoAUV für die erstmalige Exploration der darunterliegenden subglazialen Seen aussetzen. Das nanoAUV soll an mehreren, wissenschaftlich interessanten Positionen Messungen, Kartierungen und Probennahmen durchführen. Das Gesamtsystem bestehend aus Einschmelzsonde und nanoAUV einschließlich der genommenen Proben muss nach erfolgter Exploration wieder sicher und kontaminationsfrei an die Oberfläche verbracht werden. Die genommenen Proben können dann in einem in-situ Labor, dem AstroBioLab, Analysen unterzogen werden, die insbesondere die Suche nach Biosignaturen zum Ziel haben.

In der durchgeführten Phase I haben die Projektpartner für die relevanten Subsysteme ein Konzept erstellt unter Berücksichtigung der aus dem Missionsszenario abgeleiteten Anforderungen. Dies umfasste insbesondere:

- Die Entwicklung eines miniaturisierten, autonomen Unterwasserfahrzeugs, dem nanoAUV, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten in der äußeren Formgebung, dem Antriebssystem und der Missionsplanung des nanoAUV lag. Aufbauend darauf wurden Umsetzungskonzepte in Bezug auf die Fertigung und Qualifizierung entwickelt. In Bezug auf die Missionsplanung wurden Beiträge zu innovativen Architekturen zur Optimierung der Entscheidungsfindung innerhalb des Autonomiekonzeptes entwickelt. All diese Arbeiten zielten darauf ab, eine sichere Missionsdurchführung inklusive einer sicheren Rückführung des nanoAUV zu ermöglichen.
- Die Software-Architektur für das GNC-System (Guidance, Navigation and Control) des nanoAUV wurde konzeptioniert und partiell demonstriert. Hierbei lag der Fokus auf der Miniaturisierung des GNC-Systems, insbesondere der Sensorik und des On-Board Rechners (OBC). Ein solcher On-Board Rechner wurde im Vorhaben nebst Schnittstellen zur miniaturisierten Sensorik des nanoAUV im Vorhaben umgesetzt.
- Die Realisierbarkeit einer Schmelzsonde, die durch eine Eisschicht manövriert wird, um ein eingeschlossenes Wasserreservoir kontaminationsfrei zu beproben, wurde untersucht. Die

Schmelzsonde baute auf der Erfahrung verschiedener Projekte der vom DLR-Raumfahrtmanagement initiierten Enceladus Explorer Initiative (EnEx). Sie muss geeignet sein, den Eispanzer von mehr als 3 km zu durchdringen. Darüber hinaus muss die zukünftige Schmelzsonde für TRIPLE auch in Hinblick auf die Raumfahrtmission autonom navigieren, Hindernisse erkennen und diese ausweichen, sowie den Zielbereich der Eis-Wasser Grenze erkennen und gezielt ansteuern können. Die Schmelzsonde muss in einem Nutzlastbereich ein Unterwasserfahrzeug transportieren und in das subglaziale Reservoir aussetzen können.

- Eine Auswahl der wissenschaftlich relevanten Sensorsysteme für die Integration in das nano-AUV wurde getroffen. Diese Systeme sind sowohl für den Einsatz auf der Erde als auch für zukünftige Missionen auf Eismonden geeignet. Basierend auf den Erfahrungen der Partner bei der Entwicklung von in-situ Sensorsystemen sowie der Durchführung von Untersuchungsprogrammen in Polargebieten wurden geeigneten Sensorkonzepte und Datenspeicherungs- und Übertragungstechniken konzipiert und entwickelt. Zur Entwicklung des Missionsplanungskonzeptes wurde evaluiert, wie die gewonnenen Sensordaten für das Autonomiekonzept des nanoAUV effizient genutzt werden können.

## 2 Kurzdarstellung

### 2.1 Aufgabenstellung

Die Arbeiten der RWTH verfolgt drei Hauptziele:

- 1) Die Entwicklung eines Konzepts zur sicheren und robusten, automatisierten Navigation und Regelung des nanoAUV mit Fokus auf einer integren Zustandsschätzung (Position, Geschwindigkeit und Lage) und einer robusten Fahrzeugregelung.
- 2) Die Demonstration der Realisierbarkeit einer Schmelzsonde, die wissenschaftlichen Nutzlasten durch eine Eisschicht transportiert, um ein eingeschlossenes Wasserreservoir kontaminationsfrei zu beproben. Das III. Physikalisches Institut B konzipierte im Rahmen von TRIPLE-nanoAUV 1 in Abstimmung mit der GSI GmbH die Schmelzsonde und die Oberflächenstation, sowie den globalen Datenaustausch.
- 3) Die Analyse von Sondentrajektorien auf deren Schmelzfahrt durch das Eis, sowie die Anpassung der in ExEx-WISE erarbeiteten Eisumfeldmodelle und -sensorik auf TRIPLE.

### 2.2 Voraussetzungen der Vorhabendurchführung

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg des Projekts bestand in der Nutzung von Synergien innerhalb der TRIPLE-Projektklinie. Dies ermöglichte die parallele Entwicklung verschiedener Komponenten und den Austausch von Ergebnissen mit anderen TRIPLE-Verbundvorhaben. Dieser Austausch war insbesondere wichtig, um eine Abstimmung der Schnittstellen zu erreichen.

Für das GNC-System des nanoAUV konnte das IRT auf Vorarbeiten aus den Vorhaben GALILEOnautic 1 & 2 zurückgreifen. Dies sind insbesondere Softwarekomponenten zur Navigation. Dem MBD standen Eisumfeldmodelle aus dem Vorhaben ExEx-WISE zur Verfügung.

### 2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde ursprünglich für 24 Monate geplant. Das Budget wurde für eine 6-monatige Verlängerung aufgestockt. Das Vorhaben wurde zusätzlich anschließend um weitere 4 Monate kostenneutral verlängert. Der Arbeitsplan besteht aus den vier übergeordneten Arbeitspaketen: Management (AP1000), nanoAUV (AP2000), MeltingProbe (AP3000), GroundStation (AP4000), deren zeitliche Abfolge im Folgenden dargestellt ist.

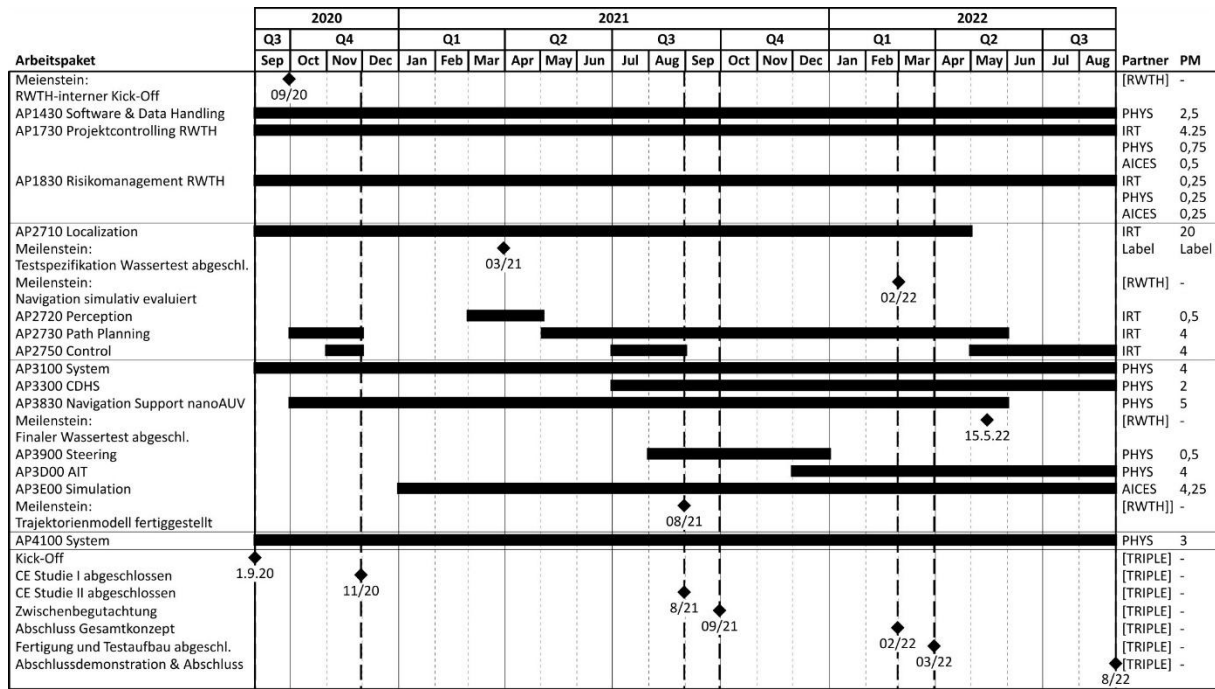


Abbildung 1: Balkenplan des RWTH-Teilvorhabens aus dem Vollantrag.

Projektzeitplan der RWTH Aachen University			1	2	3	4	5	6	IST
AP	Lead	AP-Titel	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	
1100	RWTH	Gesamtmanagement TRIPLE-Projektlinie	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	2,10
1730	RWTH	Projektcontrolling RWTH (Koordination GNC)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,90
2710	RWTH	Localization	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	4,20
2720	DFKI	Perception	0,10	0,10		0,10		0,10	0,40
2730	RWTH	Path Planning	0,30	0,30	0,40	0,30	0,40	0,30	2,00
2740	Uni HB	Decision Making	0,10	0,10		0,10		0,10	0,40
2750	RWTH	Control	0,30	0,30	0,40	0,30	0,40	0,30	2,00
3900	RWTH	Steering	0,21	0,21	0,21	0,21	0,83	0,83	2,50
3B00	GSI	Cable	0,04	0,04	0,04	0,04	0,17	0,17	0,50
3D00	RWTH	AIT	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,33	1,00
4100	RWTH	System (Oberflächenstation)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,67	0,67	2,00
<b>Meilensteine</b>			M501	M502		M503		M504	18,00
<b>Testwoche</b>					T01		T02		18,00

Abbildung 2: Balkenplan aus dem Aufstockungsantrag.

Die Arbeitspakete des Vorhabens mit Beteiligung des Instituts für Regelungstechnik sind im Folgenden aufgelistet, wobei Pakete mit Federführung fett gekennzeichnet sind:

- **AP 1000 Projektmanagement**
  - **AP1100 Projekt**
  - **AP1730 Projekt Controlling RWTH**
  - **AP1830 Risiko Management RWTH**
- **AP2000 nanoAUV**
  - **AP2710 Localization**

- AP2720 Perception
- **AP2730 Path Planning**
- AP2740 Decision Making
- **AP2750 Control**

Die Arbeitspakete des Vorhabens mit Beteiligung des III. Physikalisches Instituts B sind im Folgenden aufgelistet, wobei Pakete mit Federführung fett gekennzeichnet sind:

- AP1000 Projektmanagement
  - **AP1430** Software and Data Handling
  - AP1730 Projekt Controlling RWTH
  - AP1830 Risiko Management RWTH
- AP3000 Melting Probe:
  - AP3100 System (Schmelzsonde)
  - **AP3300** CDHS
  - **AP3830** Navigation Support nanoAUV
  - **AP3900** Steering
  - AP3B00 Cable
  - **AP3D00** AIT
- AP4000: Ground Station
  - **AP4100** System

Die Arbeitspakete des Vorhabens mit Beteiligung des Lehrstuhls für Methoden der Modellbasierten Entwicklung in den Computergestützten Ingenieurwissenschaften sind im Folgenden aufgelistet, wobei Pakete mit Federführung fett gekennzeichnet sind:

- AP 1000 Projektmanagement
  - AP1730 Projekt Controlling RWTH
  - AP1830 Risiko Management RWTH
- AP3000 Melting Probe
  - **AP3850 ICE CTD**
  - **AP3E00 Simulation**

## 2.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Die Entwicklung von Schmelzsonden beruht auf den Erkenntnissen, die im EnEx-Verbundvorhaben (2012 - 2025) und im Vorhaben EnEx-RANGE (2015 - 2019) als Teil der EnEx-Initiative gewonnen wurden. Vor allem im Bereich Schmelztechnologie konnte auf Erfahrungen aus vorangegangenen Vorhaben zurückgegriffen werden. Die Mitarbeiter des III. Physikalisches Instituts B der RWTH waren an der Entwicklung einer Vielzahl von Schmelzsonden beteiligt. Dazu gehören der EnEx-IceMole und Schmelzsonden mit akustischer Instrumentierung, die sogenannten Autonomous Pinger Units (APUs). Die Funktion der Schmelzsonden wurden bereits in einer Vielzahl von Gletschertests demonstriert. Die Herausforderungen für die TRIPLE-Schmelzsonde umfassen die geforderte Schmelztiefe von etwa 4 km, die hohe Schmelzgeschwindigkeit von etwa 5 m/h sowie die Fähigkeit, wissenschaftliche Nutzlasten zu transportieren. Alle bisher entwickelten Schmelzsonden sind nur in geringeren Tiefen einsatzfähig und erfüllen nicht den erforderlichen Technologiereifegrad (TRL) für dieses Projekt. Insbesondere für eine zukünftige Raumfahrtmission zu Europa ist es unbedingt erforderlich, dass die Schmelzsonde autonom navigieren, Hindernissen ausweichen, sowie Zielbereiche erkennen und gezielt ansteuern kann. Zudem muss sie ein Unterwasserfahrzeug transportieren und in einem subglazialen Reservoir aussetzen können.

Um den TRL zu erhöhen, wurde im parallel durchgeführten Verbundvorhaben TRIPLE-IceCraft (seit 2019) von der GSI GmbH und dem III. Physikalisches Institut B der RWTH eine Schmelzsonde als Trägersystem für mehrere hundert Meter tiefe Einsätze entwickelt [Heinen et al. 2022]. Die TRIPLE-Ice-Craft Schmelzsonde bietet die Möglichkeit, Nutzlasten wie z.B. ein nanoAUV, zu einem subglazialen See zu transportieren.

Für eine ausführliche Beschreibung des Stands der Technik zu Unter-Eis AUVs sei auf die Veröffentlichungen [IRT1-4] verwiesen.

## 2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit den anderen Vorhaben der TRIPLE-Projektlinie erfolgte über die gesamte Laufzeit des Projektes, über die Teilnahme an Telefonkonferenzen, Arbeitstreffen und mehrere Synergietreffen, in denen wichtige Fortschritte präsentiert und Erfahrungen ausgetauscht wurden.

Insbesondere wurden die Synergien zu den Vorhaben TRIPLE-IceCraft und TRIPLE-FRS genutzt, um Schwimmbad- und Feldtests gemeinsam schnell und effizient zu koordinieren und kostengünstig durchzuführen. Die Integration und Tests der Hardware und Software erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der jeweiligen Vorhaben.

Anpassungen und Optimierung des Arbeitsplanes wurden, wenn erforderlich, in enger Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber durchgeführt. Dieser wurde auch laufend über den wissenschaftlichen Stand des Vorhabens informiert.

## 3 Eingehende Darstellung

### 3.1 AP 1100: Projektmanagement

#### 3.1.1 Ziele

- Integration der Einzelentwicklungen in einen harmonisierten Gesamtablauf
- Koordination der Angleichung des Entwicklungsstand der Einzelsysteme (Angleichung der TRLs)
- Sicherstellung der Projektziele unter Berücksichtigung der Einzelvorhaben
- Bewertung des Zwischenstands der ersten Phase von TRIPLE hinsichtlich der weiter anstehenden Aufgaben in Phase 2

#### 3.1.2 Problemstellung

Aufgrund der hohen Komplexität des TRIPLE-Systems und der Feldtestkampagnen besteht der Bedarf einer übergeordneten Koordination.

#### 3.1.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

Für den Geldgeber erfolgte eine Berichterstattung in Form von monatlichen Kurzbriefen, Zwischenberichten, Präsentationen (Synergie- und Arbeitstreffen) sowie eines Systems Requirements Reviews (SRR). Im Rahmen des Vorhabens wurden zudem zwei CE-Studien durch das DLR-RY durchgeführt. Für die zweite Phase von TRIPLE wurde eine Konzept- und Umsetzungsstrategie erstellt. Des Weiteren fanden über 31 TRIPLE- sowie über fünf Systems-Engineering-Webkonferenzen statt.

#### 3.1.4 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

### 3.2 AP 1430: Software & Data Handling

#### 3.2.1 Ziele

Das Arbeitspaket 1430 "Software and Data Handling" fokussierte sich auf die Koordination von Entwicklung und Implementierung von Software- und Datenverarbeitungsprozessen sowie die Definition von Anforderungen.

#### 3.2.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Im Rahmen des Projektes führte das III. Physikalisches Institut B folgende Aufgaben durch: Die Handhabung von Backup-Prozessen, Data Harvesting und Datenspeicherung wurden koordiniert, um sicherzustellen, dass relevante Daten zuverlässig erfasst, gesichert und gespeichert werden. Die Kommunikationswege, der Datenaustausch und die Protokolle wurden koordiniert, um die Datenübertragung und -verarbeitung zwischen verschiedenen Systemkomponenten sicherzustellen. Die Steuerungs-, Überwachungs- und Visualisierungsschnittstellen wurden koordiniert, um sicherzustellen, dass das TRIPLE nanoAUV-System effektiv gesteuert, überwacht und visualisiert werden kann.

Als Ergebnis ergaben sich abgestimmte Datenstrukturen. Schnittstellen für Steuerung, Kommunikation, Überwachung und Visualisierung. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des Systemkonzepts für die Kommunikation zwischen den TRIPLE-Subsystemen. Bei diesen Arbeiten war eine zentrale Komponente die umfassende Planung und Durchführung von Online-Workshops zu den Themen Datenflüsse und Systemübersicht mit dem Gesamtverbund. Die Abstimmung der Schnittstellen zwischen den TRIPLE-Subsystemen fand im Rahmen regelmäßiger System Engineering Treffen, Telefonkonferenzen und Arbeitsbesprechungen statt. Insbesondere wurden Concurrent Engineering Studien genutzt, um die Einzelsysteme und Subsysteme in ein Gesamtsystemkonzept zu überführen und die Schnittstellen zwischen den Systemen auszuarbeiten. Das Gesamtsystem wurde als Modell zusammen mit den identifizierten Schnittstellen in der Virtual Satellite (VirSat) Software eingearbeitet. Das III. Physikalisches Institut B war aktiv an der Erstellung des Funktionsbaums, Produktbaums und Konfigurationsbaums für VirSat beteiligt.

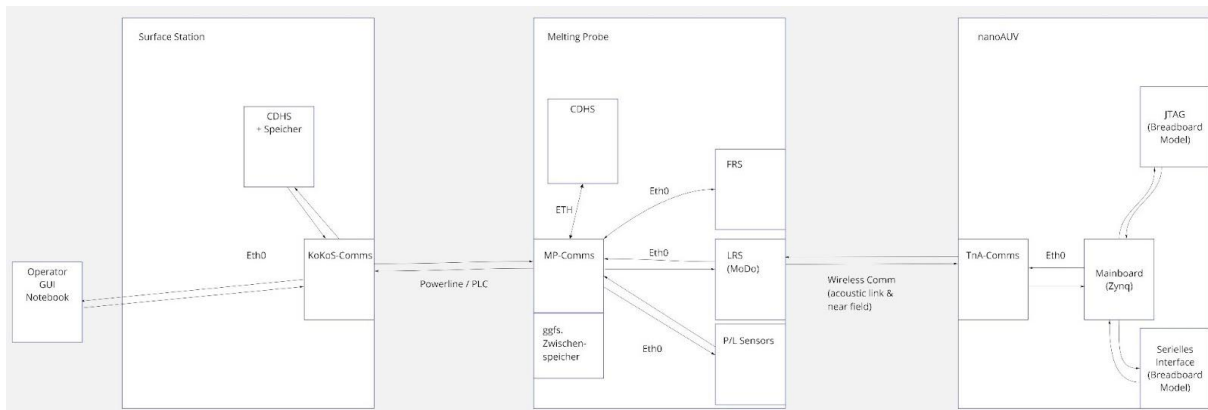


Abbildung 3 Schematische Darstellung des Systemkonzepts für die Kommunikation zwischen den TRIPLE-Subsystemen.

Zusätzlich wurde die koordinierte Dokumentation der erzielten Ergebnisse eingeleitet. Die spezifischen Anforderungen an die Datenschnittstellen zwischen der Oberflächenstation, der Schmelzsonde und der Nutzlast, sowie innerhalb der einzelnen TRIPLE-Subsysteme, wurden im Rahmen eines Anforderungskatalogs dokumentiert. Daraus konzipierte Schnittstellen wurden in einem Interface Control Document erfasst.

In Kooperation mit dem Projektpartner Institut für Regelungstechnik der RWTH und dem Vorhaben TRIPLE-FRS wurden Labortests, Wassertests in Schwimmbecken und Gletschertests zur Überprüfung des Datenaustauschs für das Breadboard-System koordiniert (AP 3300, AP 3D00, AP 4100).

### 3.2.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

## 3.3 AP 1730: Übergreifendes Projektcontrolling TRIPLE - RWTH

### 3.3.1 Ziele

- Projektmanagement des Teilvorhabens

- Den planmäßigen Ablauf des Vorhabens sicherstellen
- Interne Koordination für Beschaffungen, Reisen, Zahlungsanforderungen
- Projektmanagement der Arbeiten im Bereich nanoAUV GNC, insbesondere Sicherstellung, dass die Schnittstellen und Verzahnungen mit den weiteren Arbeiten in TRIPLE eingehalten werden

### 3.3.2 Problemstellung

Aufgrund der hohen Komplexität des TRIPLE-Systems und der Feldtestkampagnen besteht der Bedarf einer internen Koordination.

### 3.3.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

Das Vorhaben wurden unten den Gesichtspunkten und Nebenbestimmungen des BMWK koordiniert und administriert. Für die Arbeiten am GNC-System des nanoAUV wurden drei Workshops mit den beteiligten Partnern des Verbunds durchgeführt.

Das III. Physikalisches Institut B beteiligte sich an diesen Aufgaben, wobei jedoch die Hauptverantwortung beim Institut für Regelungstechnik der RWTH lag. Zur Gesamtkoordination und Kommunikation fanden regelmäßige Telefonkonferenzen zwischen den Verbundpartnern in einem zweiwöchigen Rhythmus statt. Antizyklisch im gleichen Rhythmus fanden Telefonkonferenzen mit dem Schwerpunkt Systems Engineering statt. Zusätzlich wurde die enge Zusammenarbeit mit der GSI GmbH weiter ausgebaut. Es fanden regelmäßig Telefonate, Arbeitstreffen über das Gesamtsystem und Splintertreffen zu technischen Details statt. Weitere durchgeführte Aufgaben im Rahmen dieses Paketes waren die enge Kommunikation mit dem Projektmanagement und dem Zuwendungsgeber im Rahmen des Berichtswesens. Dies umfasste die Unterstützung bei der Erstellung der monatlichen Kurzberichte, jährlichen Zwischenberichte und die Abwicklung der Zahlungsanforderungen.

### 3.3.4 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

## 3.4 AP 1830 Risiko Management - RWTH

### 3.4.1 Ziele

- Risikomanagement des Teilvorhabens

### 3.4.2 Problemstellung

Aufgrund der hohen Komplexität des TRIPLE-Systems und der Feldtestkampagnen bestehen multiple Risiken, die bewertet und dokumentiert werden müssen.

### 3.4.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

Für das Teilvorhaben der RWTH Aachen lag der Fokus auf der umfassenden Risikoabschätzung sämtlicher geplanter Aufgaben und Arbeitsprozesse innerhalb des Vorhabens. Dies umfasste eine gründliche

Analyse potenzieller Risiken sowie deren Kommunikation mit dem Projektmanager. Durch die zielgerichtete Anwendung von Instrumenten des Systems Engineering wurde eine effektive Risikominimierung erreicht. Als Ergebnis dieses AP wurde eine Risikotabelle erstellt, die zur Verfolgung und Überwachung potenzieller Risiken diente. Diese Tabelle ermöglichte eine systematische Erfassung und Verfolgung der identifizierten Risiken während des gesamten Projektverlaufs. Durch die regelmäßige Aktualisierung und Analyse dieser Tabelle konnte eine effiziente Risikobewertung durchgeführt werden. Mögliche Risiken konnten frühzeitig identifiziert und im Projektplan berücksichtigt werden. Durch ein erfolgreiches Risikomanagement konnte der in Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber erstellte Zeitplan während des gesamten Vorhabenverlaufs jederzeit eingehalten werden. Corona-bedingte Verzögerungen in Folge von Lieferschwierigkeiten von Hardware für die Breadboardmodelle in AP2710 (GNC - Localization) konnten durch die 10-monatige Verlängerung aufgeholt werden.

#### 3.4.4 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

### 3.5 AP 2700 GNC

Ziel von AP2700 war die Entwicklung eines Konzepts zur Fahrzeugführung, Navigation und Regelung des nanoAUV sowie dessen (Teil-) Validierung mit Analogfahrzeugen. Das AP gliedert sich in fünf UAPs:

- AP2710 GNC – Localization
- AP2720 GNC – Perception
- AP2730 GNC – Path Planning
- AP2740 GNC – Decision Making
- AP2750 GNC – Control

Die einzelnen UAPs werden im Folgenden beschrieben.

### 3.6 AP 2710 GNC - Localization

#### 3.6.1 Ziele

- Erstellung eines Konzepts zur sicheren Ermittlung des Navigationszustandes für reaktive und geplante Navigation des nanoAUV
- Experimentelle Validierung des Konzepts zur sicheren Ermittlung des Navigationszustandes für reaktive und geplante Navigation des nanoAUV mit einem Analogfahrzeug (ecoSUB AUV)
- Validierung des Navigationskonzepts in ROS/Gazebo Gesamtsimulation

#### 3.6.2 Problemstellung

Die Lokalisierung, bzw. Navigation liefert eine Schätzung des (nanoAUV-)Zustands, bestehend aus Position, Geschwindigkeit und Lage im dreidimensionalen Raum. Die Schätzung muss robust, integer und kontinuierlich verfügbar sein. Die maßgebliche Randbedingungen sind der limitierte Bauraum

sowie die begrenzte Energie des nanoAUV. Aufgrund dieser Beschränkungen kann nur eine reduzierte Zahl von Navigationssensoren im nanoAUV verbaut werden. Zudem müssen aufgrund der Beschränkungen miniaturisierte und energiesparendere Navigationssensoren genutzt werden, was mit einer Reduzierung der Performanz einhergeht (z.B. beim Doppler-Velocity Log).

### 3.6.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

Die Aufgabe der RWTH war die Entwicklung eines Konzepts für ein akustisch- und modellgestütztes Navigationsfilters zur Schätzung des Zustands des nanoAUV.

#### Konzepterstellung

Als Lösungsansatz wurde mehrere nichtlineare Kalman-Filter zu Sensorfusion entwickelt. Hierzu wurde zunächst ein Konzept erarbeitet, welches in Abbildung 4 dargestellt ist. Hierbei werden folgende physikalische Größen verwendet:

Größe	Bezeichnung	Größe	Bezeichnung
$f$	Beschleunigung	$m$	Magnetfeldstärke
$\omega$	Rotationsrate	$q$	Orientierungsquaternion
$v$	Geschwindigkeit	$b_a$	Accelerometer Bias
$R_{DVL}$	Doppler Range	$b_g$	Gyroskop Bias
$d$	Tiefe	$P$	Kovarianzmatrix
$p$	Positionsvektor	$\sigma$	Varianzvektor

Dabei beschreiben der Index  $\square^b$  bzw.  $\square_b$  das körperfeste Koordinatensystem, der Index  $\square_n$  das Navigations Koordinatensystem, der Index  $\square_s$  bzw.  $\underline{\square}_s$  das Sensor-Koordinatensystem, der Akzent  $\tilde{\square}$  Sensorwerte und der Akzent  $\hat{\square}$  Schätzwerte aus Filter. Für mehr Details verweisen wir auf [IRT1, IRT2].

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde fünf Navigationssensoren ausgewählt, deren Daten vom Navigationsfilter fusioniert werden. Diese sind eine Inertiale Messeinheit (IMU), ein Ultra-Short Baseline (USBL) System, ein Doppler-Velocity Log (DVL), eine Tiefensensor (DPTH) sowie ein Magnetometer.

Die IMU liefert Beschleunigungen und Drehraten mit 100Hz, die von einem Strapdown-Inertialnavigationssystem (SINS) zu einem Zustand verrechnet werden. Das USBL korrigiert mit akustischen Positionsmessungen die driftende SINS-Lösung mit 1Hz. Das DVL korrigiert den Zustand mit akustischen Geschwindigkeitsmessungen, die je nach Abstand gegen Grund/Eis mit 4-15Hz gemessen werden. Der Tiefensensor liefert Druckmessungen mit 2Hz und korrigiert den Tiefenkanal der Position. Das Magnetometer stützt die driftende Gierwinkelschätzung des SINS mit 100Hz.

Für die Sensorfusion wurden drei nichtlineare Kalman-Filter implementiert: ein Error-State Extended Kalman Filter (ES-EKF), ein Unscented Kalman-Filter (UKF) sowie ein invariantes Extended Kalman-Filter (InEKF). Alle drei Filter sind echtzeitfähig und können auf Prozessoren mit geringer Leistung ausgeführt werden. Das ES-EKF und das UKF sind in der Raumfahrt weit verbreitet.

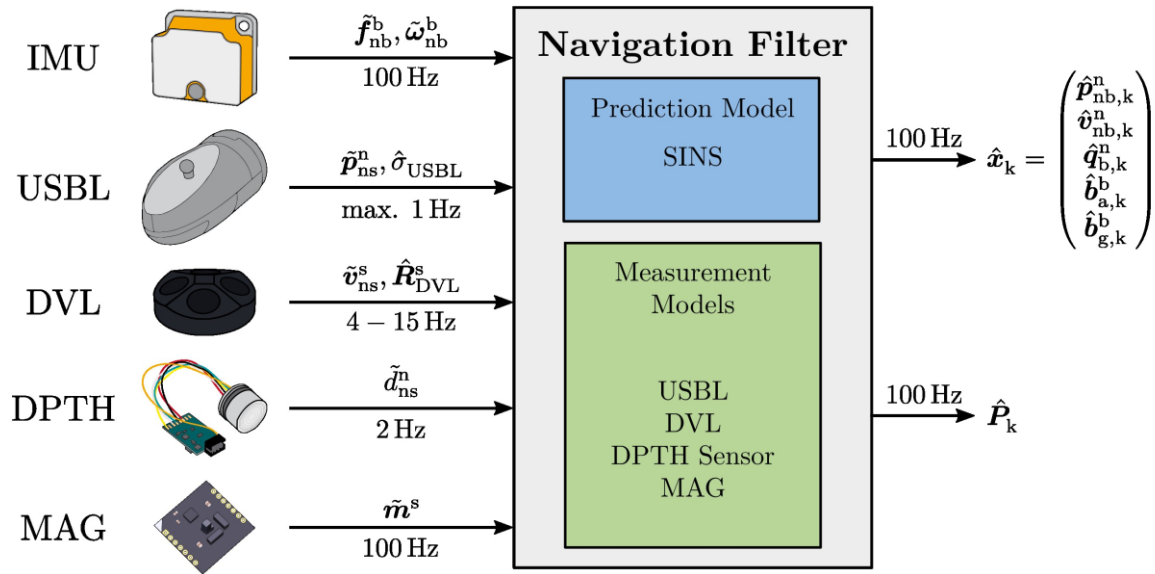


Abbildung 4 Konzept des Navigationsfilters zur Schätzung des Zustands des nanoAUV (Nitsch 2023).

### Implementierung Simulationsumgebung

Zur Simulation der nanoAUV Mission sowie der simulativen Validierung wurde eine umfangreiche Simulationsumgebung implementiert. Die Simulationsumgebung nutzt MATLAB/Simulink sowie ROS/Gazebo. Der gesamte geschlossene Regelkreis (Trajektorienplanung, Regler und Navigationsfilter) wurde implementiert. Für alle Navigationssensoren wurde hochgenaue Simulatoren entwickelt, die deren wesentlichen Fehlercharakteristiken nachbilden.

### Implementierung Navigationsfilter

Das Navigationsfilter wurde durch die drei oben genannten Algorithmen (ES-EKF, UKF, InEKF) in MATLAB/Simulink implementiert. Die drei Filtertypen können durch ein Flag ausgewählt werden. Da die akustischen Positionsmessungen des USBL eine zeitliche Latenz aufweisen (Schalllaufwege), wurde eine Ringbufferstruktur entwickelt, um die Latenzen auszugleichen. Aus der MATLAB/Simulink-Implementierung wurde eine ROS-Node erzeugt, die in der Gesamtsimulation oder auf dem On-Board Computer (OBC) ausgeführt werden kann.

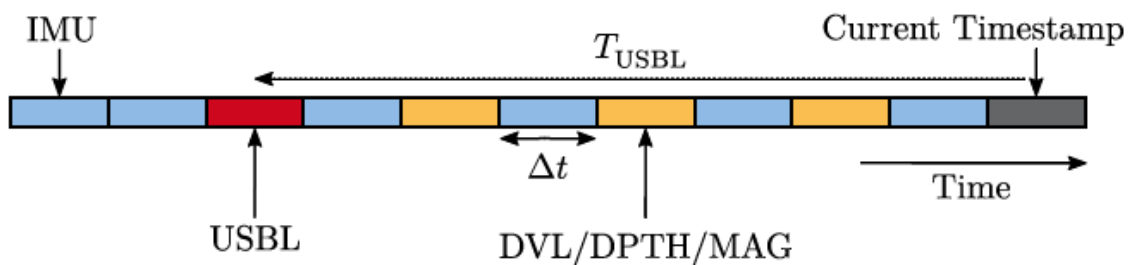


Abbildung 5 Ringbufferstruktur zur Kompensation der USBL-Latenzen [IRT4]

### Integration Fahrzeugmodell

Zur weiteren Stützung des Navigationsfilters wurde ein Fahrzeugmodell in das Navigationsfilter integriert. Hierzu wurde ein hydrodynamisches Bewegungsmodell sowie Modelle der Aktoren des nano-AUV implementiert und anstelle des SINS-Prädiktionsmodells verwendet. Die IMU-Daten wurden stattdessen in einem AHRS (Mahony-Filter) zu einer Lagelösung verrechnet, die als zusätzlicher Korrekturschritt in Navigationsfilter verwendet wird. Der Ansatz ist an die Literatur angelehnt. Die Ergebnisse sind vielsprechend, jedoch konnte das Modell nicht experimentell validiert werden, da in Phase 1 kein Prototyp des nanoAUV gebaut wurde. Die simulativen Ergebnisse wurden in [IRT1] und [IRT2] veröffentlicht.

### Integration USBL-Modell

Für das USBL wurde ein hochgenaues Modell entwickelt, das Positionsmessungen für eine gegebene Ground-Truth-Position zur Verfügung stellt. Die Geometrie des angedachten 120/180 OEM USBL Transducerarrays sowie das Rauschen der Round-Trip-Time (RTT) und Time-Differences-of-Arrival (TDOAs) wurde auf Basis der verfügbaren Literatur und Gesprächen mit der EvoLogics GmbH gewählt. Abbildung 6 stellt die simulierten USBL-Messungen gegenüber der Distanz zwischen nanoAUV und Launch-and-Recovery System (LRS) dar. Im Navigationsfilter wurde ein Updateschritt für das USBL implementiert und simulativ mit dem Modell des USBL sowie experimentellen Daten validiert.

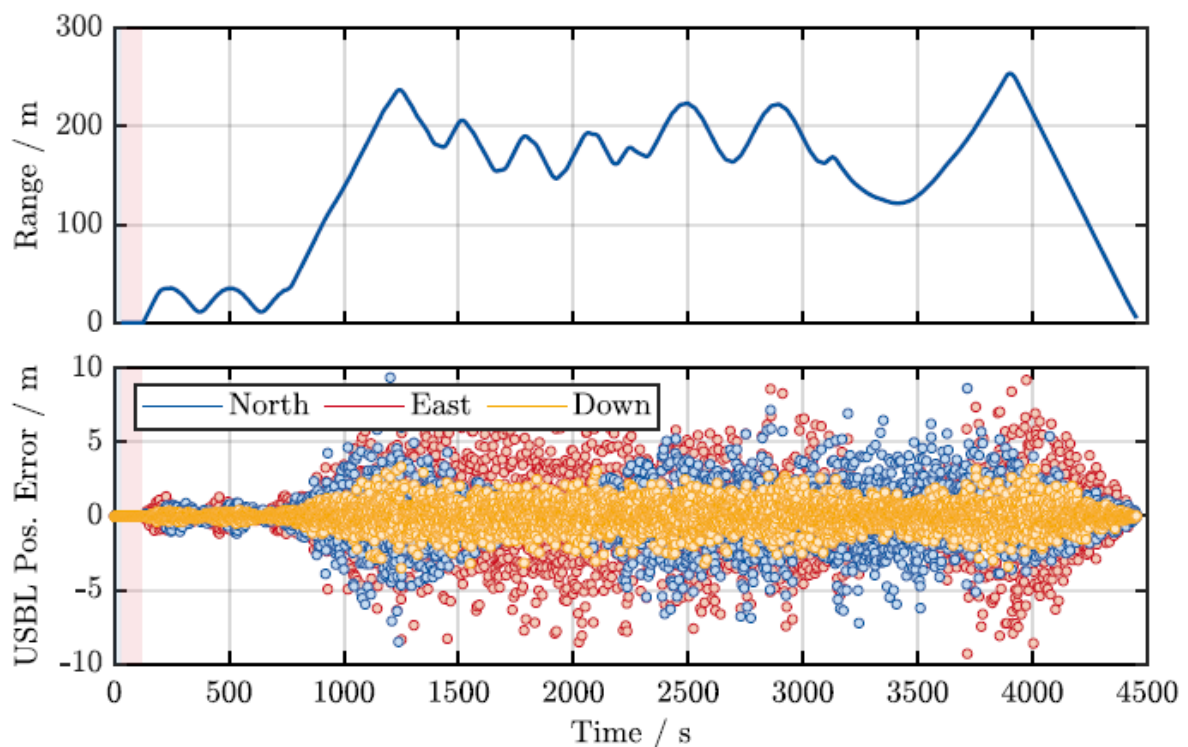


Abbildung 6 Simulierte USBL-Messungen für eine Missionstrajektorie des nanoAUV. Es zeigt sich deutlich die Abhängigkeit des Rauschens von der Distanz zwischen nanoAUV und Launch-and-Recovery System (LRS) [IRT4].

### Implementierung Integritätsprüfung

Eine Integritätsprüfung im klassischen Sinne – also die Berechnung der Vertrauenswürdigkeit der Zustandsberechnung wurde verworfen, da im Laufe des Vorhabens die Forderung nach einem On-Board Computer mit wenig Rechenleistung gestellt wurde und Sensorredundanzen nur für Teile des Zustands verfügbar sind. Statt einer rechenintensiven Integritätsprüfung (z.B. mittels Filterbanken) wurde mehrere Plausibilisierungsfunktionen implementiert. Hierzu werden die Sensordaten vor der Fusion im Navigationsfilter zunächst einem Plausibilisierungsschritt in der Sensorvorverarbeitung unterworfen. IMU-, Magnetometer-, und Tiefensensordaten werden auf veränderliche Zeitstempel sowie physikalisch sinnvolle Werte geprüft.

Für das USBL werden die zusätzlich vom Hersteller berechneten „Integrity“-Werte aus der USBLLONG-Nachricht genutzt. Für einen Wert unter 100 wird die Messung verworfen. Ein Beispiel ist in Abbildung 7 dargestellt. Für das DVL wird zusätzlich zur Plausibilisierung das „velocity\_valid“-Flags geprüft. Bei einem „False“-Wert wird die Messung verworfen.

Um verbleibende, nicht detektierte, Messausreißer im Navigationsfilter zu erkennen und auszusortieren, werden Mahalanobis-Distanzen aus [4] genutzt. Hierzu wird basierend auf der vom Navigationsfilter berechneten Kalman-Innovation sowie der Kovarianz die Mahalanobis-Distanz (MHD) berechnet. Liegt die MHD über einem gewählten Schwellwert, dann gilt die Messung als fehlerhaft und wird verworfen.

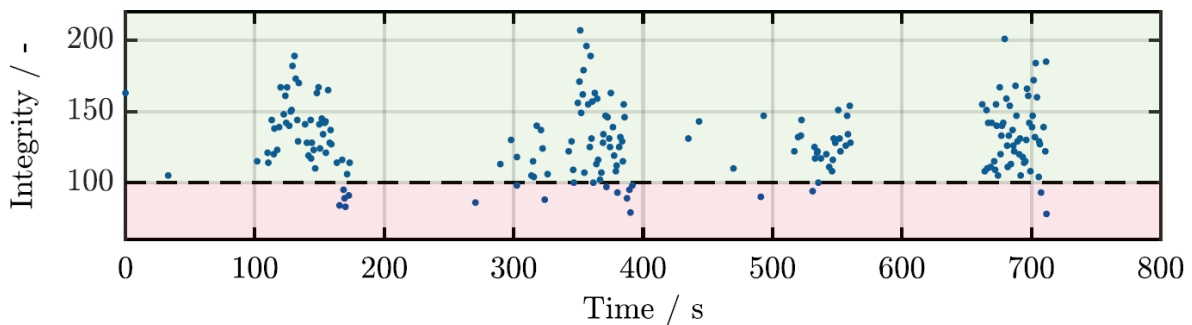


Abbildung 7 "Integrity"-Werte des 30/60 USBLs während eines Feldtests im Mittelmeer. Bei einem Wert unter 100 wird die USBL-Messung verworfen [IRT4].

### SIL-Testing in Simulationsumgebung

Das Navigationsfilter wurde umfangreichen Tests in Simulationsumgebungen unterworfen. Zum Testen wurden maßgeblich drei repräsentative Missionstrajektorien mit dem TRIPLE-GNC-Simulator für das nanoAUV generiert. Es wurden eine Validierungstrajektorie (74min), eine Rasenmähertrajektorie (116min) sowie eine YoYo-Trajektorie (115min) generiert. Die Trajektorien sind in Abbildung 8 dargestellt.

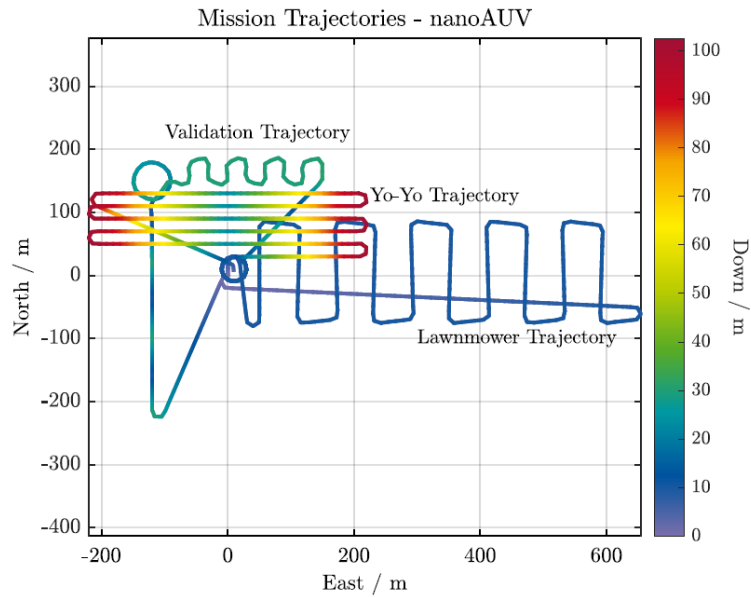


Abbildung 8 Mögliche Missionstrajektorien des nanoAUV, generiert mit dem TRIPLE-GNC-Simulator [IRT4].

Die Ergebnisse des Navigationsfilters für die dynamische Validierungstrajektorie sind in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Navigationsfilter eine genaue Schätzung des Zustands ermöglicht, solange die Reichweite des DVL von 35 - 50m unter dem Eis nicht unterschritten wird. Positions-, Geschwindigkeits- und Lageschätzung lassen ein Docking mit dem LRS aus aktueller Sicht zu.

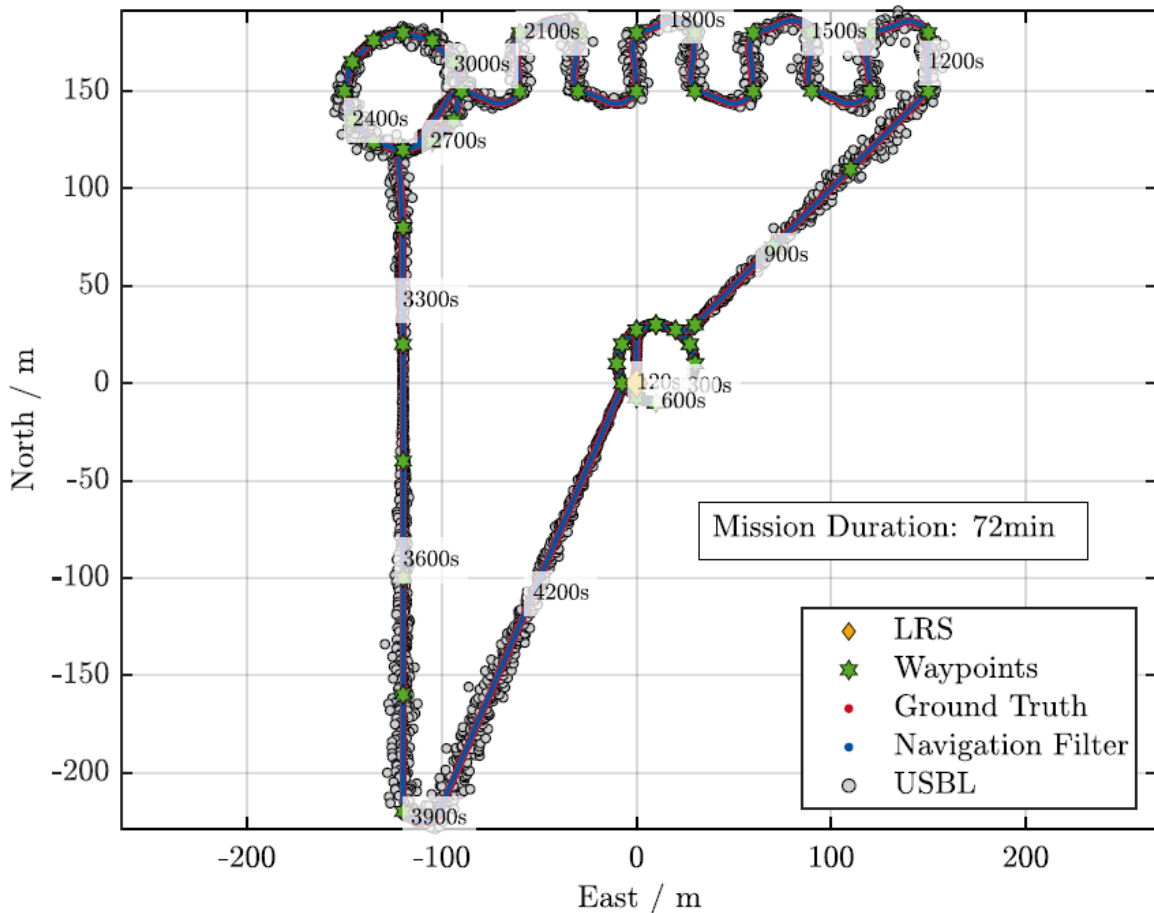


Abbildung 9 Echte (rot) und geschätzte (blau) Validierungstrajektorie. USBL-Messungen sind als graue Punkte dargestellt. Wegpunkte werden als grüne Sterne visualisiert. Das Launch-and-Recovery System (LRS) definiert den Nullpunkt des Koordinatensystems zur Navigation [IRT4].

### HIL-Echtzeittest mit Breadboard-Modell

Auf Hardware-in-the-Loop Tests zur Rechenzeitabschätzung des Navigationsfilters mit dem Breadboard-Modell des nanoAUV wurde verzichtet, da der OBC des nanoAUV während des Vorhabens noch nicht als finaler Demonstrator zur Verfügung stand. Stattdessen wurde ein Raspberry Pi Compute Module 4 mit einem ARM-Prozessor verwendet. Die Treiber für das USBL, das DVL und des Tiefensensors wurden im HIL-Betrieb mit dem Breadboard-Modell getestet und sind echtzeitfähig.

### RW-Testing mit Breadboard-Modell in Aachen

In der Aachener Westhalle (17mx14m) wurden zwei Tests durchgeführt. Der erste Test hatte zum Ziel sich mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut zu machen und mit der am IRT verfügbaren Totalstation von Leica das Tracking eines beweglichen Targets zu testen. Im zweiten Test wurde ein Stahlzylinder (Navigationsdummy) mit zwei IMUs (LORD Microstrain GX5 und ADIS IMU), dem Drucksensor sowie dem USBL ausgestattet und unter einem Floß aufgehängt und im Tauchbecken mittels mehrerer Seile verfahren. Der Tests diente maßgeblich dazu, die Performanz des USBL abzuschätzen und die entwickelte Treibersoftware zu testen. Die Position des Floßes wurde mit der Leica-Totalstation

getrackt. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund starker Multipfadeneffekte nur eine schlechte Performance mit dem USBL erreicht werden kann. USBL-Fixes sind nur in einem Bereich von wenigen Metern um das Array verfügbar. Der hier betrachtete Fall kann als Worst-Case angesehen werden, da die Aachener Westhalle kleine Dimensionen hat und das 18/34 USBL eine niedrigere Frequenz als das für das nanoAUV in der Entwicklung befindliche 120/180 OEM besitzt. Als Folge des Versuchs wurde beschlossen für weitere Tests auf das Tauchbecken des DFKI in Bremen sowie Freiwassertests umzusteigen. Zudem wurde das WaterLinked DVL A50 in das Navigationskonzept aufgenommen, da das USBL keine garantierte hochfrequente Positionierungslösung liefert. Für das Docking, also auf kurze Distanzen wird das USBL jedoch weiterhin als unverzichtbar angesehen.

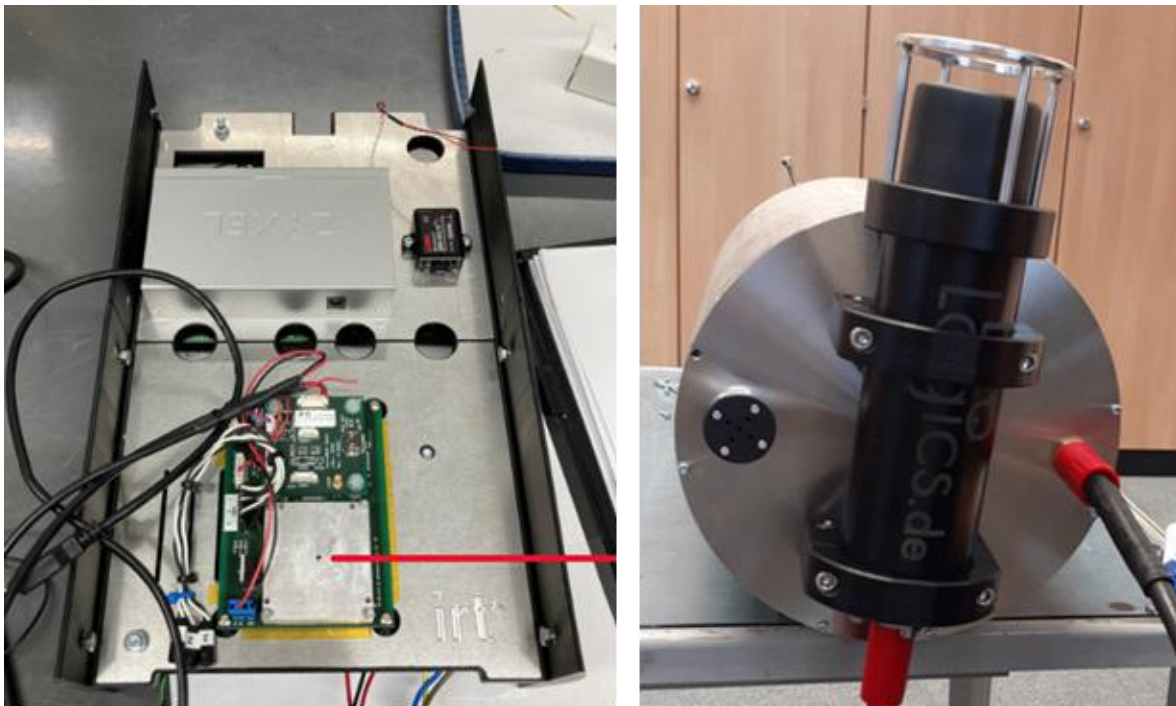


Abbildung 10 Navigations-Dummy mit IMUs, Drucksensor und USBL.

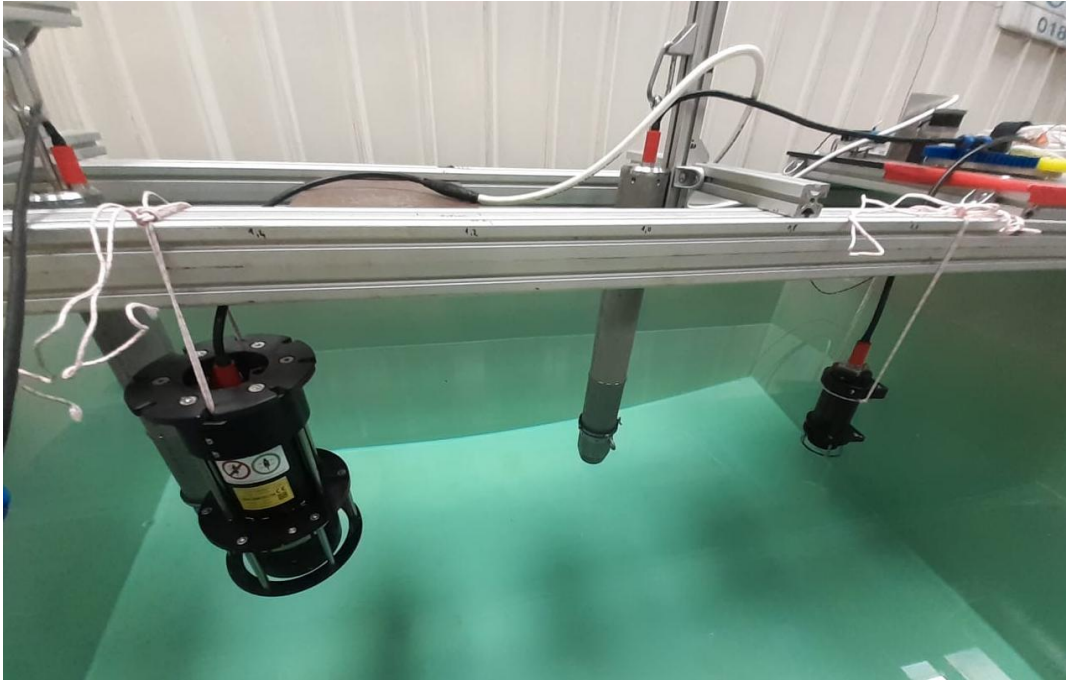


Abbildung 11 Test mit EvoLogics 18/34 USBL und Tiny-Modem im Testbecken der Physik.



Abbildung 12 Test mit Navigations-Dummy und Floß mit Tracking-Prisma in der Aachener Westhalle.

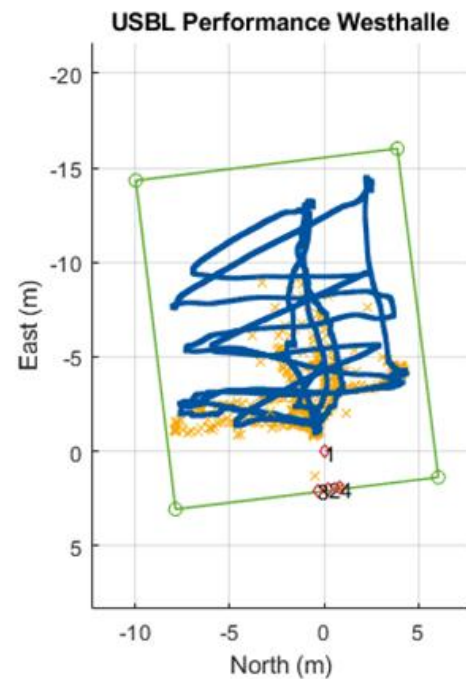
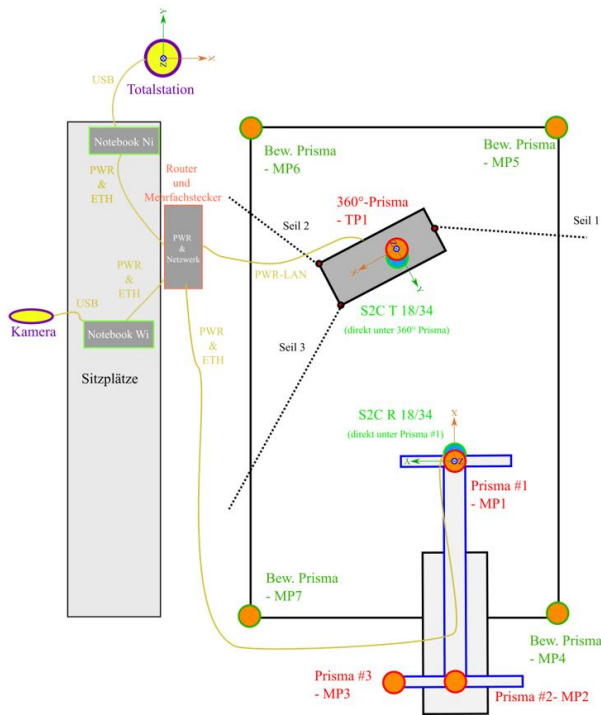


Abbildung 13 Versuchsaufbau- und Ergebnisse des Tests mit dem Navigations-Dummy in der Westhalle Aachen. Link: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus. Rechts: USBL-Fixes (gelbe Kreuze) und Ground Truth Tracking mit der Leica Totalstation (blau). Die grüne Markierung stellt das Tauchbecken dar.

### Entwicklung einer (Re-Initialisierungsroutine) für das Navigationsfilter

Für die Initialisierung des Navigationsfilters wurde ein Zustandsautomat entwickelt. Über einen einstellbaren Zeitraum werden Messungen des USBL, DVL und Tiefensensors gesammelt, um die initiale Position und Geschwindigkeit zu mitteln. Ein Mahony-Filter (AHRS) läuft über den Initialisierungszeitraum um aus den IMU- und Magnetometerdaten die initiale Lage zu sowie den Drehratenbias der IMU zu schätzen. Die gemittelten Zustände werden als Startlösung im Navigationsfilter verwendet.

### Experimentelle Erprobungen des Navigationsfilters auf einem Analogfahrzeug

Zur experimentellen Erprobung des Navigationsfilters wurde zusammen mit den Projektpartnern ein Breadboard-Modell entwickelt – die „Beluga-Nase“ entwickelt. Die Beluga-Nase enthält die identifizierten Navigationssensoren sowie eine vom MARUM entwickelte Interface-Platine mit einem Raspberry Pi Compute Module 4 als OBC-Analogen. Die Beluga-Nase wurde ein kommerzielles ecoSUB AUV als Analogfahrzeug montiert (siehe Abbildung 14).

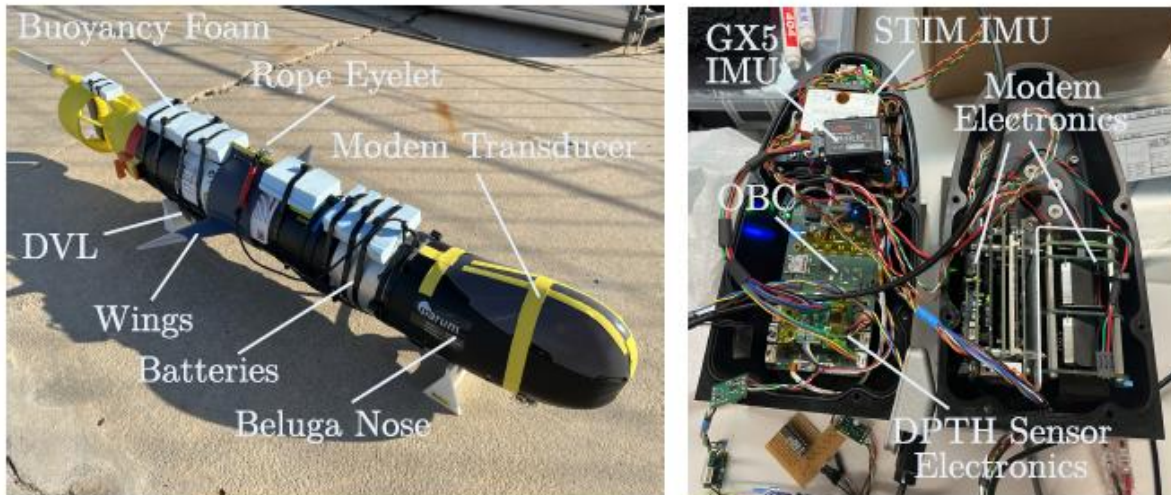


Abbildung 14 Links: Versuchsträger ecoSUB AUV für Schleppversuche. Rechts: Integration der Navigationssensorik in die Beluga-Nase [IRT4].

Mit dem Analogfahrzeug wurden mehrere Versuche durchgeführt, um das Navigationsfilter experimentell zu validieren. Hierzu wurden zwei Versuche im Tauchbecken des DFKI sowie ein Feldtest im Mittelmeer in Vilanova i la Geltrú (Spanien) durchgeführt.

Aufgrund der eingeschränkten Manövrierbarkeit wurde das ecoSUB AUV im Tauchbecken auf ein BlueROV montiert und mit einer Fernsteuerung bewegt. Die Ergebnisse zeigen, dass das USBL und Magnetometer aufgrund von Multipfad und ferromagnetischen Materialien im Tauchbecken starken Störungen unterworfen sind. Eine Navigationslösung kann nur unzureichend berechnet werden, was den Freiwassertest im Mittelmeer motivierte, um die Fehlereinflüsse von USBL und Magnetometer gesondert zu untersuchen.

Der Versuchsaufbau für den Feldtest im Mittelmeer ist in Abbildung 16 dargestellt. Der ursprüngliche Plan sah vor, dass das ecoSUB AUV mit dem herstellereigenen GNC-System und Missionsplaner definierte Trajektorien fahren zu lassen. Aufgrund eines herstellereitigen Hardwaredefekts an der GNSS-/Iridiumantenne war dies jedoch nicht möglich. Stattdessen wurde das ecoSUB AUV mit einem Seil hinter einem Schlauchboot gezogen (Schlepptest). Dabei wurden die Daten aller Navigationssensoren aufgezeichnet. Das USBL wurde unter eine schwimmende Boje montiert und sendete die Positionsdaten des AUVs über LTE an einen landseitigen Server. Für eine grobe Referenz standen die Daten eines GNSS-Empfängers eines Smartphones zur Verfügung.

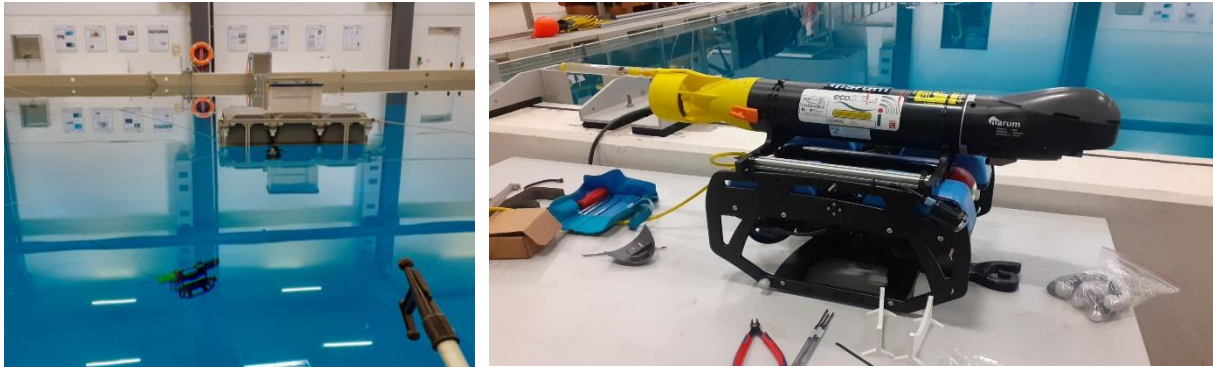


Abbildung 15 Tests mit ecoSUB AUV und Beluga-Nase im Tauchbecken des DFKI.

Die aufgezeichneten Daten wurden im Post-Processing in das Navigationsfilter eingespeist. Eine Auswertung ist in Abbildung 17 dargestellt. Gezeigt werden die vom Navigationsfilter geschätzte Trajektorie (blau: Unscented Kalman-Filter; grün: Error-State Extended Kalman-Filter), die GNSS-Positionsmessungen des Smartphones (rot), die USBL-Messungen (grüne und rote Punkte) sowie Deployment- und Recovery-Position. Position, Geschwindigkeit und Lage können qualitativ gut geschätzt werden. Das Navigationsfilter konvergiert und zeigt physikalisch sinnvolle Wertebereiche. Eine quantitative Validierung ist jedoch nicht möglich, da die GNSS-Messungen keine exakte Referenzlösung darstellen, da die Position und Lage des Bootes und des AUVs zeitlich nicht übereinstimmen.

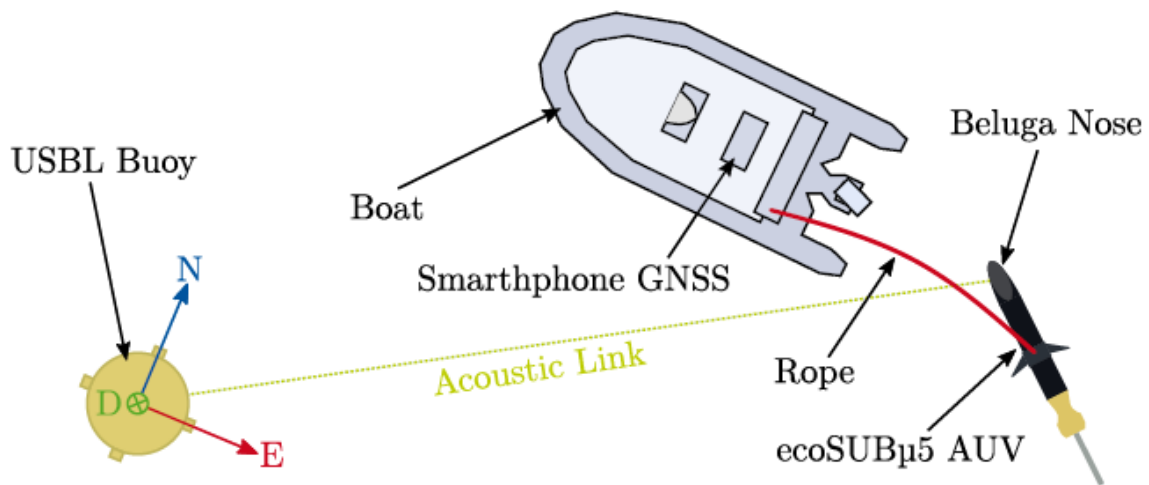


Abbildung 16 Prinzipskizze der Schleppversuche mit dem ecoSUB AUV [IRT4].

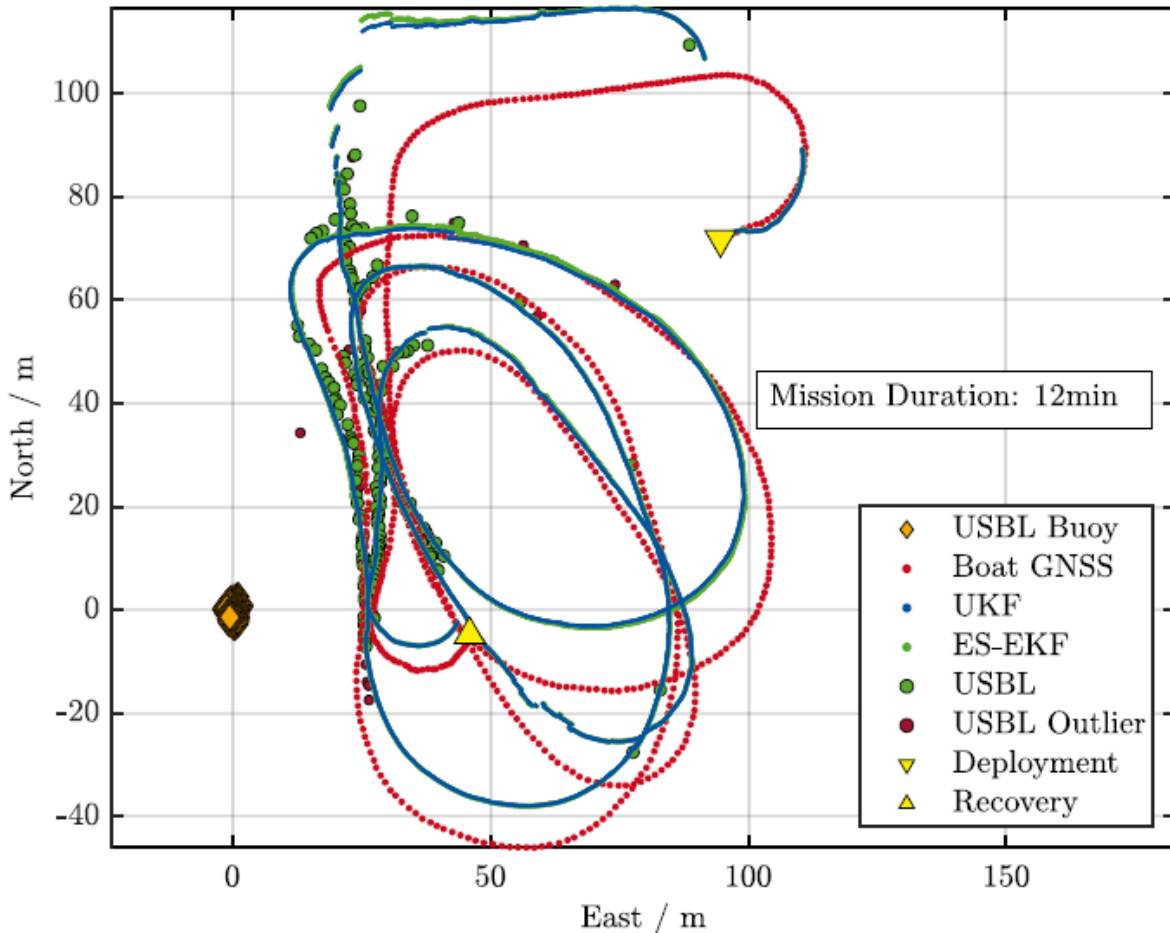


Abbildung 17 Geschätzte Trajektorien der verschiedenen Navigationsfilter aus dem Feldversuch im Mittelmeer [IRT4].

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass das USBL und Magnetometer stark gestört sind. Dies kann auf die akustischen Störungen durch den Bootsantrieb, die geringe Tauchtiefe von 3m sowie elektromagnetischen Einkopplungen in die Modemelektronik und das Magnetometer erklärt werden. Eine Optimierung der akustischen Eigenschaft und des EMV-Designs der Beluga-Nase stelle eine mögliche Lösung dar. Der experimentelle Funktionsnachweis für das Konzept des Navigationsfilters ist jedoch grundlegend erbracht.

### Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zur Visualisierung der Navigationslösung

Zur Visualisierung der der Navigationslösung wurde das ROS-eigene Tool „rviz“ genutzt. Hiermit wurde eine grafische Benutzeroberfläche zur Visualisierung als ROS-Odometrie und als „Geister-nanoAUV“ eingerichtet, dass Position, Geschwindigkeit und Lage im dreidimensionalen Raum darstellen. Zusätzlich werden USBL-Messungen visualisiert.

### Implementierung von erweiterten Diagnosefunktionen des Navigationsfilters

Für das Navigationsfilter wurde zusammen mit der TUBS und dem CNI ein Konzept zur Diagnose von Modulen wie dem Navigationsfilter ausgearbeitet. Hierfür wird die ROS-eigene Diagnosenachricht

„DiagnosticStatus“ vorgesehen, um den Zustand des Navigationsfilters zu überwachen. Eine Implementierung wurde zugunsten der Arbeiten an der Simulationsumgebung nicht durchgeführt.

### **Unterstützung der Gesamtsimulation mit ROS/Gazebo**

Das Navigationsfilter sowie die Sensorsimulatoren wurden in die Gesamtsimulation in ROS/Gazebo erfolgreich eingebunden. Hierzu wurden aus MATLAB/Simulink heraus ROS Nodes code-generiert.

#### 3.6.4 Fazit

Das Ziel von AP 2710 wurde in größten Teilen erreicht. Das Konzept zur sicheren Ermittlung des Navigationszustand für das nanoAUV wurde erfolgreich simulativ in ROS/Gazebo validiert. Die experimentelle Validierung mit einem Analogfahrzeug (ecoSUB AUV) zeigt positive Resultate, jedoch ist die Datenlage zu den Störungen des USBL und Magnetometers noch nicht ausreichend, um eine finale Validierung des Konzepts zu ermöglichen. Es sind weitere Tests insbesondere in akustisch gestörten Umgebungen notwendig.

## 3.7 AP 2720: GNC – Perception

### 3.7.1 Ziele

- Anforderungsdefinition / Schnittstellendefinition
- Kontinuierliche Anpassung der bisherigen Schnittstellen (mit Fokus auf der Occupancy Grid Map)

### 3.7.2 Problemstellung

Für den Datenaustausch zwischen den Modulen zur Perception, Pfadplanung (AP2730) und Regelung (AP2750) muss aufgrund neuer Erkenntnisse und geänderte Implementierung eine kontinuierliche Anpassung der Schnittstellen erfolgen.

### 3.7.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

In Zusammenarbeit mit dem DFKI wurde die Schnittstellen zum Pfadplaner (AP2730) umgesetzt. Hierzu gehört insbesondere die Vorgabe von Hindernissen in Form einer dreidimensional Hinderniskarte (Occupancy Grid Map) durch die Perception. Die Schnittstelle wurde als ROS-Nachricht „octomap“ implementiert.

### 3.7.4 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

## 3.8 AP 2730: GNC – Path Planning

### 3.8.1 Ziele

- Erstellung eines Konzepts und Softwaremoduls zur Generierung von Pfaden unter Berücksichtigung von Energie- und Zeitoptimalität sowie des zu erwartenden Informationsgewinns hinsichtlich POIs für die autonome Navigation des nanoAUV als Teilaspekt der GNC
- Experimentelle Validierung von Teilen des Pfadplanungskonzepts für das nanoAUV mit einem Analogfahrzeug (ecoSUB AUV)
- Validierung des Pfadplanungskonzepts in ROS/Gazebo Gesamtsimulation

### 3.8.2 Problemstellung

Die Pfadplanung hat die Aufgabe einen Referenzpfad für die Regelung zwischen zwei oder mehreren Wegpunkten zu generieren. Dabei muss insbesondere folgenden Herausforderungen begegnet werden:

- Berücksichtigung der dynamischen Möglichkeiten des nanoAUV
- Berücksichtigung von Hindernissen
- Minimierung des Energieverbrauchs

### 3.8.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

**Erstellung eines Konzepts und Softwaremoduls zur Generierung von Pfaden unter Berücksichtigung von Energie- und Zeitoptimalität sowie des zu erwartenden Informationsgewinns hinsichtlich POIs für die autonome Navigation des nanoAUV als Teilaspekt der GNC**

Das Ziel wurde erreicht. Es wurde ein Konzept und Softwaremodul für die Pfad-, bzw. Trajektorienplanung entwickelt. Diese nutzt Informationen über Hindernisse und die dynamischen Eigenschaften des nanoAUV, um möglichst energieeffizienten Pfade zu generieren. Diese Pfade verbinden verschiedene, von der überlagerten Entscheidungsfindung/Grobplanung (CNI) vorgegebene, Wegpunkte. Dazu wird eine Kombination aus einem lokalen 3D Dubins-Path-Planer und einer globalen Graphensuche verwendet. In der überlagerten Entscheidungsfindung/Grobplanung (CNI) werden Wegpunkte so ausgewählt, dass sie möglichst den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn maximieren und zeitgleich eine sichere Wiederkehr des nanoAUV zum LRS sicherstellen.

Zum Aufbau des gerichteten Graphen werden im ersten Schritt der Pfadplanung Knoten im Zustandsraum gesampelt, vergleichbar beim Vorgehen bei „Probabilistic Roadmaps“. Dieses Sampling verläuft randomisiert unter Berücksichtigung verschiedener Heuristiken ab. So wird beispielsweise im Bereich um Hindernisse verstärkt gesampelt, um dort eine bessere Planung zu erreichen.

Zur Berechnung der Kantengewichte wird mithilfe des lokalen 3D Dubins-Path Algorithmus evaluiert, ob eine Verbindung zwischen jeweils zwei verschiedenen Knoten realisierbar ist. Es wird eine Kante angelegt, falls das nanoAUV unter Berücksichtigung von kinematischen Beschränkungen und ohne Kollisionen mit Hindernissen von Startknoten zu Endknoten gelangen kann. Das Kantengewicht errechnet sich aus dem dafür benötigten Energieaufwand.

Der A-Star Algorithmus sucht nun auf dem Graphen nach einer möglichst optimalen Gesamtlösung zwischen Start- und Endpunkt. Der finale Pfad besteht aus mehreren aneinander gereihten Dubins-Path Segmenten. Abschließend werden optimale Zustände für die langsamen Aktoren, das heißt Buoyancy Engine (BE) und Movable Mass (MM), modellbasiert errechnet.

Das Verfahren ermöglicht darüber hinaus prinzipiell die Erweiterung um geschwindigkeitsabhängige Manövrierbarkeit sowie die Optimierung des Pfades hinsichtlich Energieeffizienz. Ein Verfahren basierend auf Gradienten basierter Optimierung von Spline-Stützstellen wurde aufgrund von zu großen Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und aufgrund von Problemen beim Konvergenzverhalten verworfen.

Das Konzept wurde zunächst in MATLAB implementiert. Anschließend wurde es mittels automatisierter Code-Generierung in eine ROS1 Node überführt und im Zusammenspiel mit den anderen GNC-Komponenten evaluiert. Bei der nach ROS überführten Variante bestehen aktuell noch folgende Limitationen: Der Energieverbrauch wird aktuell durch die Pfadlänge abgeschätzt. Außerdem werden in der nach ROS1 überführten Variante Hindernisse aktuell nicht berücksichtigt.

Das Ziel wird mit dem Konzept erreicht. Zeitoptimalität als separates Ziel wurde, verworfen. Impliziert kann es jedoch in der Minimierung des Energieverbrauchs einbezogen werden. Verbraucher mit konstantem Energieverbrauch sorgen für eine Begrenzung der Explorationszeit.

#### **Experimentelle Validierung von Teilen des Pfadplanungskonzepts für das nanoAUV mit einem Analogfahrzeug (ecoSUB AUV).**

Das Ziel wurde nicht erreicht. Die Experimentelle Teilvalidierung konnte nicht durchgeführt werden, da das Analogfahrzeug sich als ungeeignet herausgestellt hat. Anstatt dessen wurde mehr Fokus auf die extensive Evaluierung in der ROS/Gazebo Gesamtsimulation gelegt, sowie eine Methode zur automatisierten Parametrierung entwickelt.

#### **Validierung des Pfadplanungskonzepts in ROS/Gazebo Gesamtsimulation**

Das Ziel wurde erreicht. Die ROS/Gazebo Gesamtsimulation wurde weiterentwickelt und intensiv genutzt, um das Gesamtsystem zu validieren. Insgesamt stehen nun 18 Testfälle zur Verfügung. Insbesondere wurden Grenzfälle betrachtet, in denen beispielsweise der Zielpunkt in einem Hindernis oder über der Eisdecke liegt. Des Weiteren wurden Komponenten des GNC-Systems in simulativen Dauerlauftests (siehe Abbildung 18) evaluiert. So wurden die Softwaremodule Schritt für Schritt weiterentwickelt und robustifiziert.

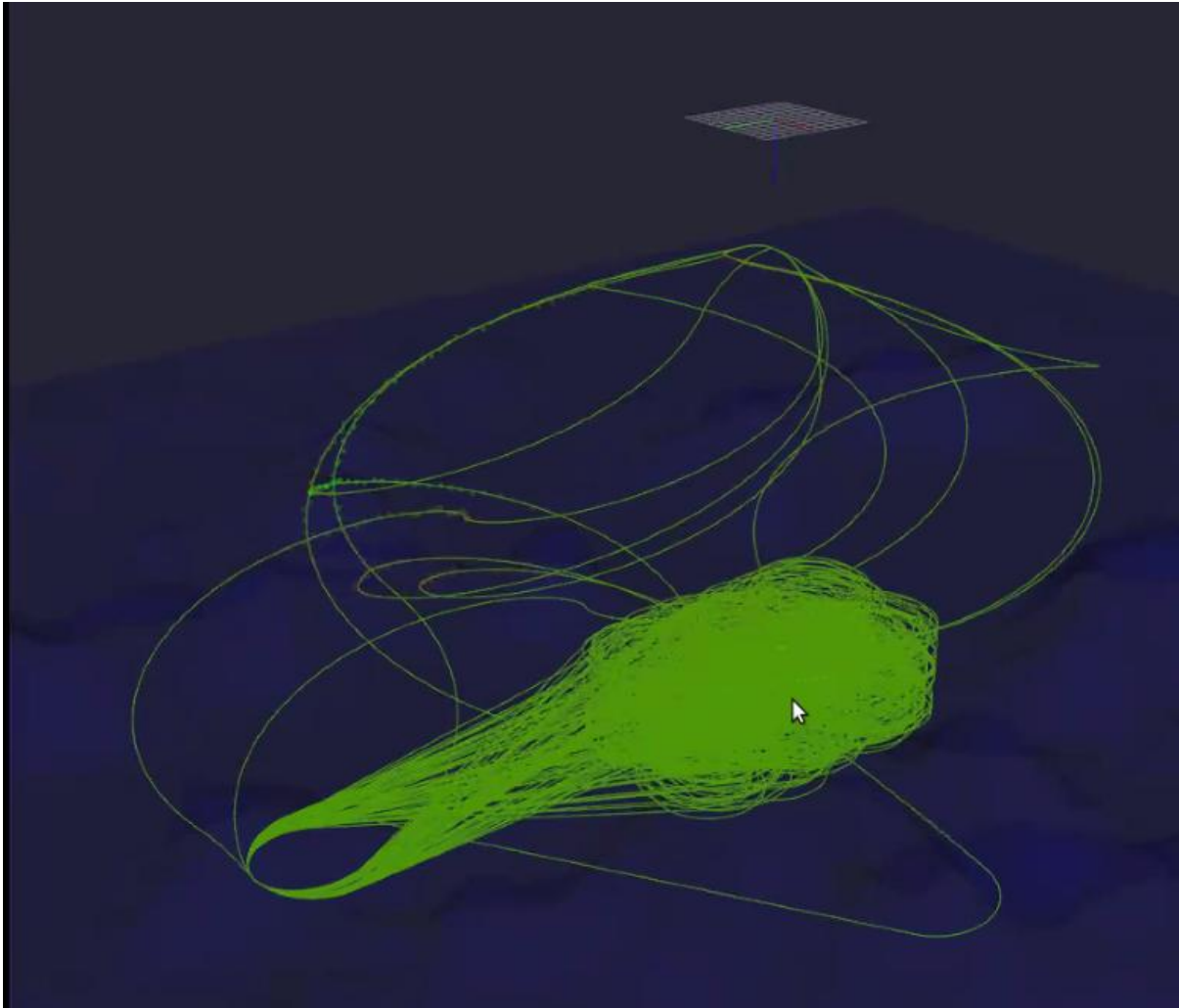


Abbildung 18 Ergebnisse eines Dauerlauftests des Pfadplanungsmoduls im Zusammenspiel mit dem Decision Making. Der Pfadplaner generiert für die zufällige Vorgaben des Decision Making Pfade, die vom nanoAUV realisierbar sind.

#### 3.8.4 Fazit

Zusammenfassend wurde im AP2730 ein Pfadplanungskonzept entwickelt, implementiert und validiert, welches Prinzipiell für den Einsatz im TRIPLE nanoAUV geeignet ist. Analog zur Regelung ist insbesondere hervorzuheben, dass es in extensiven Simulationsszenarien im Zusammenspiel mit anderen GNC-Komponenten validiert wurde. Die experimentelle Teilvalidierung konnte nicht erzielt werden, aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten des Analogfahrzeuges. Dafür wurde ein automatisiertes Tuningverfahren [IRT3] [IRT4] entwickelt, um die verschiedenen GNC-Komponenten optimal aufeinander abzustimmen.

Zu einem experimentellen Einsatz sind vor allem folgende Schritte notwendig: Portierung des Codes nach C++/ROS2 und Anpassung auf die veränderten dynamischen Eigenschaften des finalen nanoAUV Designs. Außerdem muss der Energieverbrauch von verschiedenen Komponenten abgeschätzt werden, um auf dem Graphen nach einer energieoptimierten Lösung zu erhalten. Darauf aufbauend, muss das Pfadplanungskonzept schrittweise für den nanoAUV Prototypen evaluiert und in Betrieb genommen werden.

### 3.9 AP 2740: GNC – Decision Making

#### 3.9.1 Ziele

- Kontinuierliche Anpassung der bisherigen Schnittstellen zum Pfadplaner

#### 3.9.2 Problemstellung

Für den Datenaustausch zwischen den Modulen zum Decision Making und Pfadplanung (AP2730) muss aufgrund neuer Erkenntnisse und geänderte Implementierung eine kontinuierliche Anpassung der Schnittstellen erfolgen.

#### 3.9.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

In Zusammenarbeit mit dem CNI wurde die Schnittstellen zum Pfadplaner (AP2730) umgesetzt. Hierzu gehört insbesondere die Vorgabe von Wegpunkten durch das Decision Making. Die Schnittstelle wurde als ROS-Nachricht „NanoAuvTrajectory“ sowie den ROS-Services „PathPlanning“ und „RetrievePath“ implementiert.

#### 3.9.4 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht.

### 3.10 AP 2750: GNC – Control

#### 3.10.1 Ziele

- Entwicklung eines Regelkonzepts für das nanoAUV welches zu einen das nanoAUV befähigt vorgegebenen Pfaden zu folgen und zum anderen dynamische Positionierung zum Docken mit der Dockingvorrichtung der Schmelzsonde und zur Aufnahme von Proben ermöglicht
- Experimentelle Validierung von Teilen des Regelungskonzepts (Guidance) für das nanoAUV mit einem Analogfahrzeug (ecoSUB AUV)
- Validierung des Regelungskonzepts in ROS/Gazebo Gesamtsimulation

#### 3.10.2 Problemstellung

Die Regelung hat die Aufgabe Stellsignale für die Aktorik zu berechnen, um das nanoAUV sicher und zuverlässig auf einem Pfad zu führen und es dynamisch zu positionieren. Dabei müssen insbesondere folgende Herausforderungen adressiert werden:

- Das nanoAUV ist unteraktuiert, das heißt es können auf Grund der beschränkten Aktuierung nicht alle Freiheitsgrade simultan beeinflusst werden.
- Störungen wie beispielsweise strömungsbedingter seitlicher Versatz müssen kompensiert werden.
- Hindernisse, die während des Explorationsvorgangs frisch detektiert werden müssen, zuverlässig vermieden werden.
- Auf Grund des starken Miniaturisierungsgrades des Fahrzeuges steht nur eine geringe Rechenkapazität zur Verfügung.

Eine besonders hohe Trackinggüte ist nicht erforderlich. Energieeffizienz ist hingegen auf Grund des begrenzten Akkuvolumens eher erforderlich.

### 3.10.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

#### Konzepterstellung

Das Entwickelte Regelungskonzept hat zwei Komponenten (vgl. Abbildung 19). Eine überlagerte Regelung auch Guidance bzw. High-Level Control genannt nutzt den vom Navigationsfilter (vgl. AP2710) geschätzten Systemzustand, die in AP2730 geplante Trajektorie, sowie die Hinderniskarte aus AP2720. Ausgang der Guidance sind Yaw- und Pitchwinkel, sowie Surgegeschwindigkeitsreferenzen für die unterlagerte Regelung. Die unterlagerte Regelung nutzt die Aktoren, Thruster, Bouyancy Engine sowie Moveable Mass, um diese Referenzen zu tracken. Dazu werden entsprechende Stellsignale an die Aktoren versendet. Diese Aufteilung in über- und unterlagerte Regelung ermöglicht die Auflösung der Unteraktuiertheit des nanoAUV.

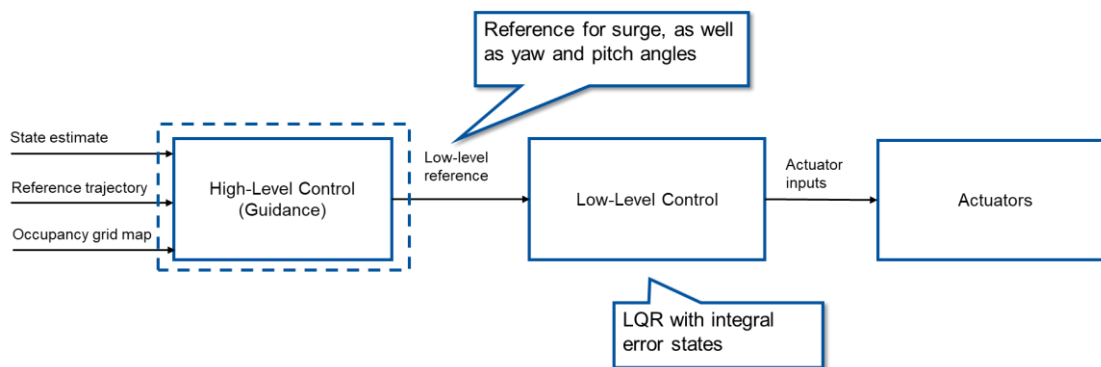


Abbildung 19 Überblick über das Regelungskonzept

Um eine robuste und rechenzeitsparende Lösung zu erreichen, werden die einzelnen Komponenten des Konzeptes unter Nutzung von bewährten und vielfach validierten Algorithmen ausgestaltet. Die freien Parameter der Algorithmen werden in einer möglichst realitätsnahen Simulationsumgebung in einer Vielzahl verschiedener Szenarien optimiert und validiert.

#### Überlagerte Regelung/Guidance

Entsprechend der oben genannten Anforderungen hat das Guidance Modul vier verschiedene Modi. Im IDLE-Modus werden keine Referenzen generiert. Der Trajektorienfolgemodus hat die Aufgabe einer geplanten Trajektorie zu folgen, und dabei Strömung zu kompensieren und unbekanntem Hindernissen auszuweichen. Um das zu erreichen, werden verschiedene bewährte Ansätze aus der Literatur kombiniert. Grundlage bildet eine adaptive Line-of-Sight (LOS) Guidance. Diese ermöglicht die Berechnung eines Soll-Yaw-Winkels, welcher das nanoAUV auf der geplanten Trajektorie hält und dabei seitlichen Versatz durch Strömung ausgleicht. Anders als in der Literatur wird der Side-Slip angle jedoch direkt durch die im Navigationsfilter geschätzten Größen berechnet. Zur Umfahrung von unbekanntem Hindernissen wird ein Ansatz basierend auf dem VFH+ Verfahren verwendet. Dazu wird für den dreidi-

mensionalen Fall generalisiert. So wird ein Pitch- und Yaw-Winkel berechnet, der möglichst der Trajektorienfolgeregelung dient, aber dabei zu einer Hindernisumfahrung mit Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung eines minimalen Kurvenradius führt.

Der dritte Modus sorgt für ein dynamisches Positionieren in einem Gebiet um einen definierten Punkt. Die Hauptherausforderung ist dabei die Kompensation von Strömungen. Dazu wird eine Variante zu den Verfahren aus der Literatur bekannten Verfahren genutzt. Im Gegensatz zur Literatur wird hierzu jedoch keine Strömungsschätzung genutzt.

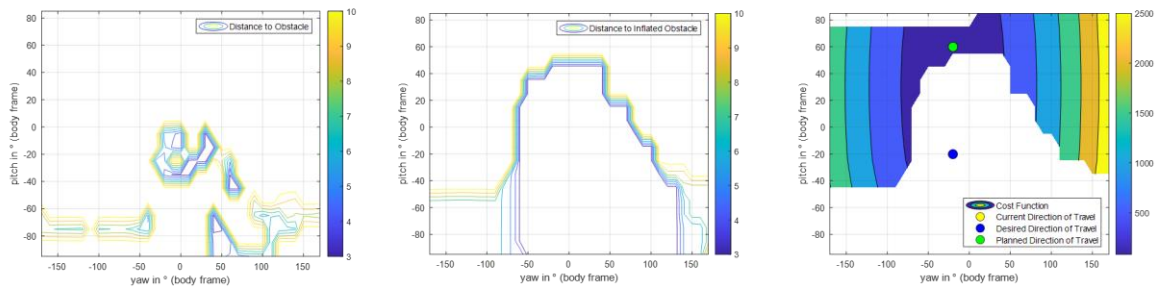


Abbildung 20 Visualisierung des Verfahrens zur Hindernisumfahrung. Links: Abstand zu neu detektierten Hindernissen. Mitte: Abstand zu mit Sicherheitsabstand beaufschlagten Hindernissen. Rechts: Kollisionsfreie Richtungen (bunt) mit einer aus der adaptiven LOS-Guidance stammenden Zielrichtung (blau) und der kollisionsvermeidenden Zielrichtung.

Der vierte Modus implementiert eine unterlagerte Sicherheitsfunktion. Sobald im Modus zwei oder drei ein Mindestabstand zu einem Hindernis unterschritten wird in einen dedizierten Hindernisvermeidungsmodus umgeschaltet. In diesem ist das ausschließliche Ziel möglichst sich möglichst vom nächsten Hindernis zu entfernen. Methodisch basiert es auf der in Modus 1 entwickelten Variante.

Die Referenz für die Surgegeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von der Winkelabweichung in der unterlagerten Regelung und dem Abstand von Hindernissen berechnet. Bei großer Regelabweichung in Pitch- oder Yawwinkel und bei geringem frontalem Abstand zum nächsten Hindernis wird die Surgegeschwindigkeit gedrosselt.

### Unterlagerte Regelung

Zur Umsetzung der in der Guidance berechneten Vorgaben für Pitch, Yaw und Surge-Geschwindigkeit wird eine Kombination aus Vorsteuerung, LQI-Regelung, Control-Allocation und einer einfachen Aktorregelung für Buoyancy Engine (BE) und Moveable Mass (MM) genutzt. Die Vorsteuerung hat das Ziel die, in der Trajektorienplanung für die langsamen Aktoren (BE, MM) berechneten Zustände umzusetzen. Die LQI-Regelung nutzt ein linearisiertes Modell des nanoAUV. Der I-Anteil im LQI sorgt dabei für ein Ausgleichen eines Linearisierungsfehlers sowie von anderen Störungen. Bei der betrachteten Variante des nanoAUV operieren die Aktuatoren häufig an ihrer maximalen Leistungsgrenze. Eine Control-Allocation stellt dabei sicher, dass stets ein Mindestmaß an Drehung um die z-Achse sowie Beschleunigung in Längsrichtung möglich bleibt.

## Implementierung

Das entwickelte Konzept wurde zunächst in MATLAB/Simulink implementiert und dessen einzelnen Funktionen evaluiert. Anschließend wurde eine Toolchain zur Codegenerierung eingesetzt, um den Code nach C++ umzuwandeln damit er dann in ROS zusammen mit den anderen Softwaremodulen des GNC-Systems evaluiert werden kann. Über den Antragstext hinausgehend wurde eine Parameteroptimierungsmethode basierend auf Bayes'scher Optimierung entwickelt. Diese ermöglicht die ganzheitliche Optimierung aller GNC-Parameter hinsichtlich Robustheit und Energieeffizienz. So können die Abhängigkeiten zwischen den GNC-Komponenten aufgelöst werden.

## Validierung

Zur Validierung des kompletten Closed-Loops wurden mehrere Simulationsszenarien entwickelt. Es werden die erwarteten Bedingungen unter der Neumayer III Station simuliert – insbesondere starke Strömung. Darüber hinaus werden verschiedene unbekannte Hindernisse umfahren und vielfältige Trajektorien abgefahren. Ein Beispiel dafür wird in Abbildung 21 dargestellt:

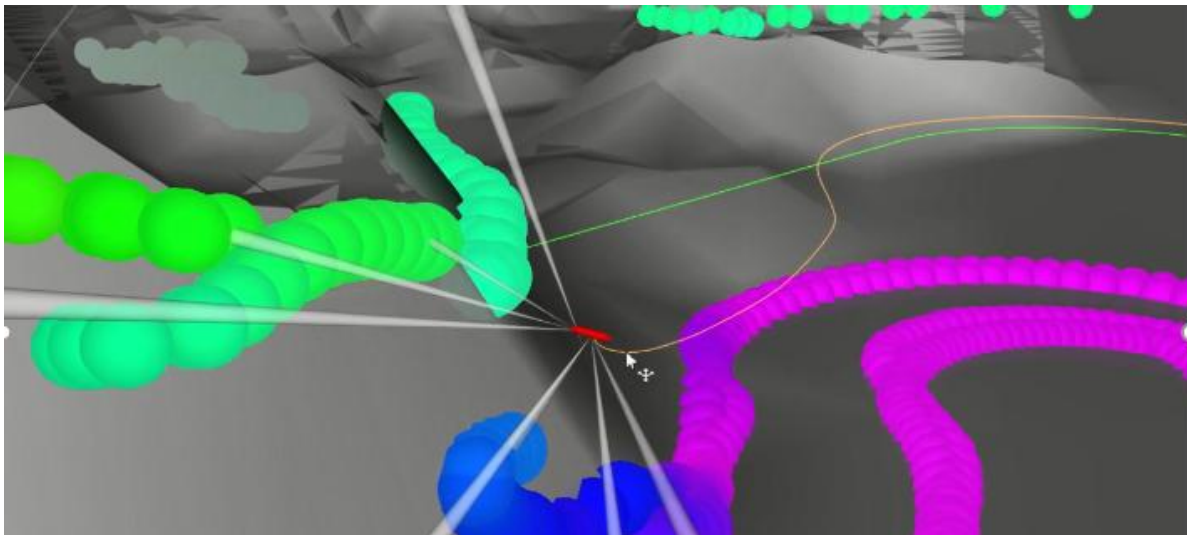


Abbildung 21 ROS/Gazebo Gesamtsimulation des nanoAUV. Dargestellt ist das nanoAUV, das unter Berücksichtigung von Hindernissen (farbige Kugeln) versucht der Referenztrajektorie (grün) zu folgen. Aufgrund von Hindernissen weicht das nanoAUV von der Referenztrajektorie ab und navigiert um das Hindernis.

Das Ziel wurde erreicht. Die ROS/Gazebo Gesamtsimulation wurde weiterentwickelt und intensiv genutzt, um das Gesamtsystem zu validieren. Insgesamt stehen nun 18 Testfälle zur Verfügung. Insbesondere wurden Grenzfälle betrachtet, in denen beispielsweise der Zielpunkt in einem Hindernis oder über der Eisdecke liegt. Des Weiteren wurden Komponenten des GNC-Systems in simulativen Dauerlauftests evaluiert. So wurden die Softwaremodule Schritt für Schritt weiterentwickelt und robustifiziert.

### 3.10.4 Fazit

Zusammenfassend wurde im AP2750 ein Regelungskonzept zur Pfadfolgeregelung und zum dynamischen Positionieren entwickelt, implementiert und validiert, welches prinzipiell für den Einsatz des nanoAUV geeignet ist. Insbesondere ist hervorzuheben, dass es in extensiven Simulationsszenarien im

Zusammenspiel mit anderen GNC-Komponenten validiert wurde. Die experimentelle Teilvalidierung konnte nicht erzielt werden, aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten des Analogfahrzeuges. Dafür wurde ein automatisiertes Tuning-Verfahren entwickelt, um die verschiedenen GNC-Komponenten optimal aufeinander abzustimmen.

Für einen experimentellen Einsatz sind vor allem folgende Schritte notwendig: Portierung des Codes nach C++/ROS2, Anpassung insbesondere der unterlagerten Regelung auf die veränderten dynamischen Eigenschaften des finalen nanoAUV Designs. Außerdem muss ein weiterer Guidance-Modus für das Docking entwickelt werden. Darauf aufbauend, muss das Regelungskonzept schrittweise für den nanoAUV Prototypen evaluiert und in Betrieb genommen werden.

### 3.11 AP 3E00 Simulation

#### 3.11.1 Ziele

- Bereitstellung eines Trajektorien Modelles für den Transit der Schmelzsonde durch heterogenes Eis, basierend auf entweder gemessenen Daten oder simulierten Daten zur Eisbeschaffenheit.
- Charakterisierung der Eisumgebung mit besonderem Fokus auf die Eis-Ozean Grenzfläche.

#### 3.11.2 Problemstellung

Bisherige Erkenntnisse, welche zum Teil in früheres Projekt der DLR Explorer Initiativen erbracht wurden haben maßgeblich zum besseren Verständnis der Effizienz von Schmelzsonden beigetragen. Diese waren bisher aber jeweils nur auf ein konkretes Kryo-regime ausgerichtet und haben nicht den ganzheitlichen Transit durch das Eis im Sinne eines Trajektorienmodells betrachtet, welche die Eisumgebungsdaten aus Feldmessungen bezieht. Dies sollte zur zukünftigen Verwendung in der TRIPLE Linie zusammengebracht werden.

#### 3.11.3 Lösungsansatz und Zielerreichung

Das Effizienzmodell würde vereinfacht und in Python neu implementiert, sowie in ein Trajektorienmodell integriert. Weiterhin wurde das Trajektorienmodell an einen funktionalen Datenhub gekoppelt, um statistische Auswertungen von Trajektorienmodellen in Eisschichten durchzuführen, welche von großer Variabilität gekennzeichnet sind. Das Gesamtpaket lässt damit neben der deterministischen Bestimmung von Transitzeit, Energieverbrauch und Effizienz auch eine statistische Bewertung zu, welche über mögliche Abweichungen in positiver und negativer Richtung informiert.

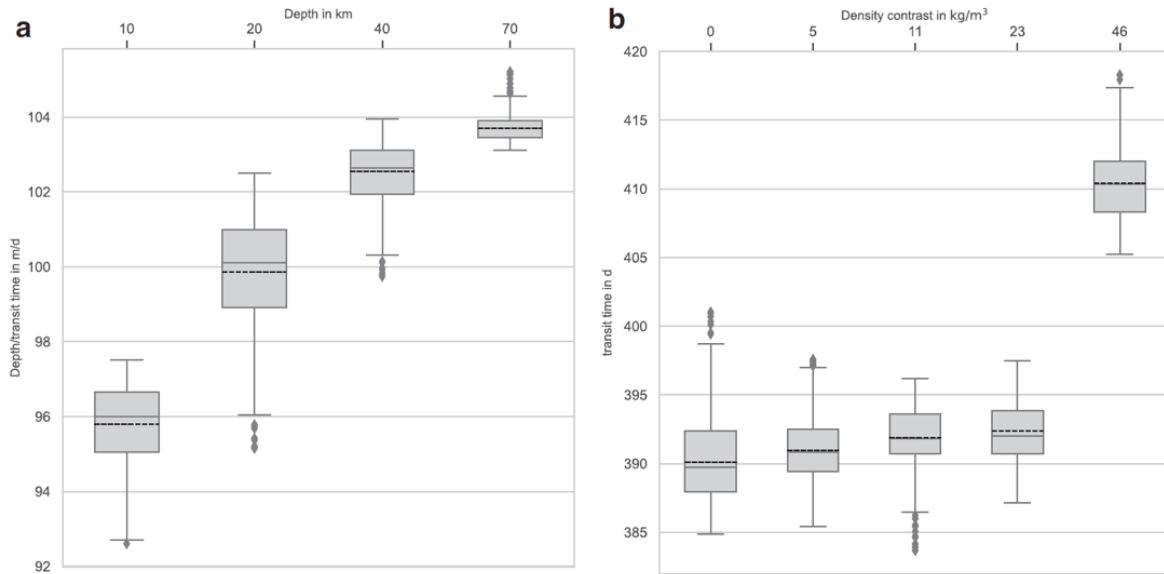


Abbildung 22: Links: Durchschnittliche Schmelzgeschwindigkeit für verschiedene Eisdickeszenarien auf Europa zu sehen. Rechts: Durchschnittliche Transitzeiten für verschiedene Level an Heterogenitäten im Eis durch Salzeinlagerungen. Details können der Veröffentlichung [PHYS23] entnommen werden.

#### 3.11.4 Fazit

Grundsätzlich kann das Softwaremodul modular aufgebaut und bietet über Jupyter notebooks eine gute Bedienbarkeit. Durch die Kopplung an den IceDataHub könnte effizient Analysen zu neuen Eisparametern durchgeführt werden. Die Studie wurde auf der Basis bisherigen Effizienzmodelle durchgeführt, welche annimmt, dass die Seiten der Schmelzsonde keine konduktiven Verluste zulassen und ideal isoliert sind. Dies ist in der Realität nicht der Fall. Eine verbesserte Version der Effizienzschätzungen soll im Rahmen des Nachfolgeprojektes erarbeitet werden. Aufgrund des modularen Aufbaus des Trajektorienmodells ist eine entsprechende Anpassung jedoch jederzeit problemlos möglich.

### 3.4 AP 3100: System (Schmelzsonde)

#### 3.11.5 Ziele

Das Arbeitspaket 3100 hatte das Ziel, ein umfassendes System- und Missionskonzept für eine Schmelzsonde zu erstellen.

#### 3.11.6 Lösungsansatz und Zielerreichung

Die durchgeführten Arbeiten vom III. Physikalisches Institut B umfassten eine detaillierte Vorbereitung auf mehrere Concurrent Engineering (CE) Workshops, um effektiv und aktiv an den gemeinschaftlichen Konzeptions- und Planungsprozessen teilnehmen zu können. Im Rahmen des AP wurden die Vorbereitungen sowie die Nachbereitung für die Concurrent Engineering (CE) Studien durchgeführt, wobei mehrere Mitarbeiter aktiv teilnahmen. Innerhalb dieser Studien wurden die erarbeiteten Konzepte zur Realisierbarkeit der Schmelzsonde vorgestellt und in enger Abstimmung mit den kooperierenden

TRIPLE-Projekten diskutiert. Ein bedeutender Schwerpunkt lag auf der Festlegung der Systemanforderungen für die Schmelzsonde sowie der Erstellung und detaillierten Dokumentation ihres Konzeptdesigns. Die Einzelsysteme und Subsysteme wurden zu einem Gesamtsystem überführt und die Schnittstellen wurden ausgearbeitet. Zudem erfolgte die Auswahl der Sensoren und Konfigurationen.

Die erfolgreiche Durchführung von zwei Workshops ermöglichte als Ergebnis die Definition und Ableitung der Systemanforderungen an eine Schmelzsonde vom Missionsziel und das Erstellen eines Konzeptdesigns einer Schmelzsonde, unter Berücksichtigung der definierten Systemanforderungen sowie der technischen und missionsspezifischen Aspekte. Alle Ergebnisse, einschließlich der erfolgreichen Teilnahme und Mitarbeit an den CE-Workshops, wurden umfassend dokumentiert. Das Konzept einer Schmelzsonde für das Missionsziel wurde detailliert beschrieben, und ein Systemdokument wurde erstellt. Das III. Physikalisches Institut B spielte eine wesentliche Rolle beim Befüllen der VirSat (siehe AP 1430 und 4100) und agierte dabei als zentraler Ansprechpartner für Fragen rund um die Schmelzsonde.

Als Zentrales Ergebnis dieses APs für das Gesamtprojekt wird im Folgenden das Konzept der für die TRIPLE-Schmelzsonde skizziert. Es wurde auf Basis von der TRIPLE-IceCraft Schmelzsonde entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine thermische Bohrsonde, die wissenschaftliche Nutzlasten transportieren, wie Experimente oder andere robotische Systeme, sowohl ins Eis hinein als auch durch das Eis zu anderen Wasserressourcen hindurch.

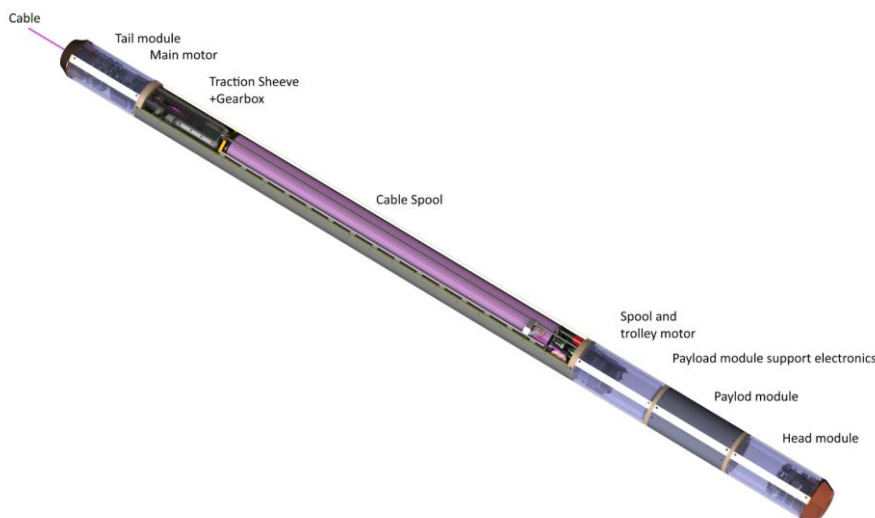


Abbildung 23: Überblick über die Schmelzsonde TRIPLE-IceCraft und ihren modularen Aufbau (Bildrechte: GSI GmbH, Aachen).

Die Schmelzsonde kann sich mehrere Kilometer durch das Eis schmelzen und am Ende einer Mission mithilfe der integrierten Kabelwinde wieder durch das Eis an die Oberfläche zurückkehren. Das System besteht aus mehreren Teilsystemen. In einigen Fällen sind bestimmte Teilsysteme redundant ausgelegt, um Ausfälle zu verhindern. Um während der Testkampagne im antarktischen Sommer bei der Dome-C-Mission durch die 4 km dicke Eisschicht zu schmelzen und wieder aufzusteigen, muss die

Schmelzsonde eine Mindestgeschwindigkeit von 5 m/h erreichen. Bei einer Skalierung der TRIPLE-Ice-Craft-Schmelzsonde für die Dome-C-Mission ergibt sich ein Durchmesser von 0,36 m und eine Gesamtmasse von 2250 kg. Für die erforderliche Schmelzgeschwindigkeit von 5 m/h bei einem Durchmesser von 0,36 m benötigt die Sonde eine Gesamtleistung von 51 kW. Die Spannungsversorgung der Sonde erfordert 10 kV.

Die Struktur der Schmelzsonde besteht aus Schmelzköpfen, Mantelsegmenten und Schotts. Alle externen strukturellen Komponenten bestehen aus robusten Materialien, um extremen Umweltbedingungen standzuhalten. Die Schmelzsonde verfügt über zwei Schmelzköpfe an der Außenseite, einen vorne und einen hinten. Für die Kopfform wird die patentierte Form (Patentnummer DE 10 2018 003 378 A1) der RWTH Aachen verwendet. Zusätzlich wird die gesamte Wandoberfläche der Sonde mit Heizmatten ausgestattet, um ein Einfrieren an dem Schmelzkanal zu verhindern.

Als die kritischste Komponente wurde das Kabelmanagement identifiziert. Das Kabel erfüllt sowohl Kommunikations- als auch Spannungsversorgungsfunktionen für die Schmelzsonde in Verbindung mit der Oberflächenstation. Darüber hinaus muss das Kabel das gesamte Gewicht der Sonde tragen können, um ein Zurückziehen der Sonde aus dem Eis zu ermöglichen.

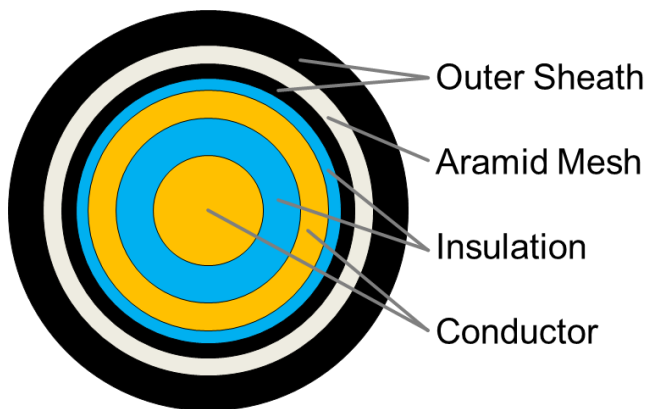


Abbildung 24: Innerer Aufbau des Kabels.

Die Hochspannung, die vom Oberflächensegment bereitgestellt und über das Kabel zur Schmelzsonde übertragen wird, wird auf alle Heizer-Steuerungssysteme und eine DC/DC-Stromversorgungseinheit verteilt. Die Stromversorgungseinheit wandelt die Hochspannung in die derzeit auf 24 VDC eingestellte Busspannung um. Die Busspannung wird auf alle Teilsysteme und die Nutzlast verteilt. Jedes Teilsystem und die Nutzlast können durch dieses Teilsystem individuell an die Busspannung angeschlossen und getrennt werden, um einen Hard-Reboot zu generieren oder den Gesamtenergieverbrauch zu reduzieren.

### 3.11.7 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht: Definition und Dokumentation der Systemanforderungen für eine Schmelzsonde der TRIPLE-Mission. Auf Grundlage der TRIPLE-IceCraft Schmelzsonde wurde ein Konzeptdesign für die TRIPLE-Schmelzsonde erstellt und in einem entsprechenden Systemdokument dokumentiert.

## 3.12 AP 3300: CDHS

### 3.12.1 Ziele

Das Ziel des Arbeitspakets 3300 ist die Anpassung eines Command and Data Handling System für die Breadboard-Integrationstests. Dazu gehört die Implementation von Highlevel-COM und die Anpassung an die Nutzlasten.

### 3.12.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Es wurde ein Command and Data Handling System (CDHS) aufgebaut, das im Vorhaben TRIPLE-IceCraft (FKZ 50RK1956) entwickelt wurde. Diese Arbeiten umfassten die Beschaffung der Elektronikbauteile sowie die Fertigung und den Test mehrerer Platinen und die Inbetriebnahme im Breadboard.

Die Kommunikation zwischen der Schmelzsonde und der Oberflächenstation erfolgt über PowerLAN und zwischen den Subsystemen innerhalb der Schmelzsonde über CAN-Bus Protokoll. Das CDHS übernimmt die Funktion des zentralen Computers in der Schmelzsonde und ist für die Slow-Control und Sensorfusion zuständig.

Es setzt sich aus einem Einplatinencomputer mit einer Zusatzplatine - dem Breakoutboard zusammen. Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten innerhalb der Schmelzsonde erfolgt über das CAN-Protokoll. Das CDHS stellt die Schnittstelle für die Kommunikation zwischen Ethernet und CAN bereit. Über diese Schnittstelle werden sowohl Befehle vom Operator an die einzelnen Komponenten der Schmelzsonde oder Nutzlasten gesendet als auch die Sensordaten, die in der Sonde integriert sind, an den Operator weitergeleitet.

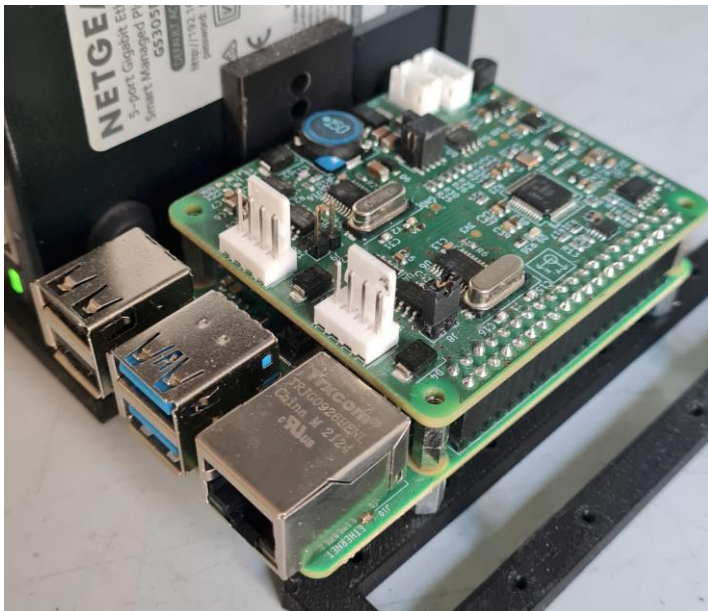


Abbildung 25: Schmelzsonde CDHS bestehend aus einem Raspberry Pi und einem zusätzlichen Breakoutboard, verbunden über GPIO-Pins.

Die Systemsoftware basiert auf der bewährten Architektur und den Erfahrungen aus der Navigationssoftware des EnEx-Verbundvorhabens (FKZ 50NA1210), dem EnEx-RANGE Vorhaben (FKZ 50NA1501)

und dem TRIPLE-IceCraft Vorhaben. Für interne und externe Kommunikation wurde das MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) Protokoll verwendet.

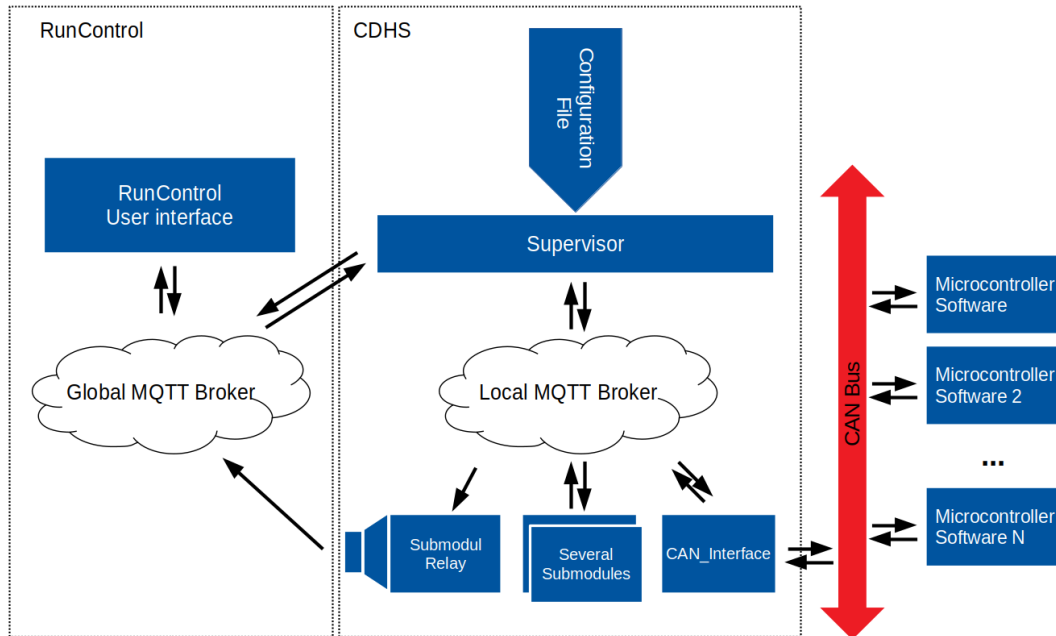


Abbildung 26: Schematischer Überblick über die Software-Struktur und den Datenaustausch für MQTT, basierend auf dem TRIPLE-IceCraft Konzept (erstellt innerhalb des TRIPLE-IceCraft Vorhaben).

### 3.12.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. CDHS-Breadboards wurden auf Grundlage der Entwicklungen in TRIPLE-IceCraft Vorhaben aufgebaut und für Systemtests bereitgestellt.

## 3.13 AP 3830: Navigation Support nanoAUV

### 3.13.1 Ziele

Das AP 3830 umfasst die Entwicklung und Validierung von entscheidenden Konzepten für kritische Komponenten zur Unterstützung der Navigation des nanoAUV.

### 3.13.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Das entwickelte Homing-Pinger-Konzept für das nanoAUV integriert das am Physikalischen Institut parallel entwickelte Sonarsystem (Projekt TRIPLE-FRS - FKZ 50RK2053). Das FRS-Sonar wird speziell für die Vorfelderkundung der Schmelzsonde entwickelt. Der Schallwandler wird in den Kopf der Sonde integriert und bietet die Option, als Sender für das nanoAUV zu fungieren. Zur Prüfung der Konzeptfunktionalität wurde die Kommunikationsfähigkeit zwischen dem FRS-Sonar und dem geplanten USBL-Modem (Ultra Short Baseline) am nanoAUV getestet.

Im Labor wurde das akustische Signal für die Kommunikation zwischen zwei USBL-Modems im Wasser gemessen. Die Verifizierung ergab, dass sich die Frequenzbereiche des von der EvoLogics GmbH bereitgestellten USBL für die aktuelle Phase und des akustischen Systems der Schmelzsonde überschneiden, was die Messung der Signale des USBL ermöglicht. In der nächsten Entwicklungsphase, wenn das USBL-System miniaturisiert und in einem höheren Frequenzbereich arbeiten wird, wird dieser sich vom Frequenzbereich des FRS-Sonars unterscheiden. Dies erfordert möglicherweise die Integration eines zusätzlichen Senders in die Sonde. Dennoch bestehen weiterhin Synergien bei der Signalgenerierung und -verarbeitung.

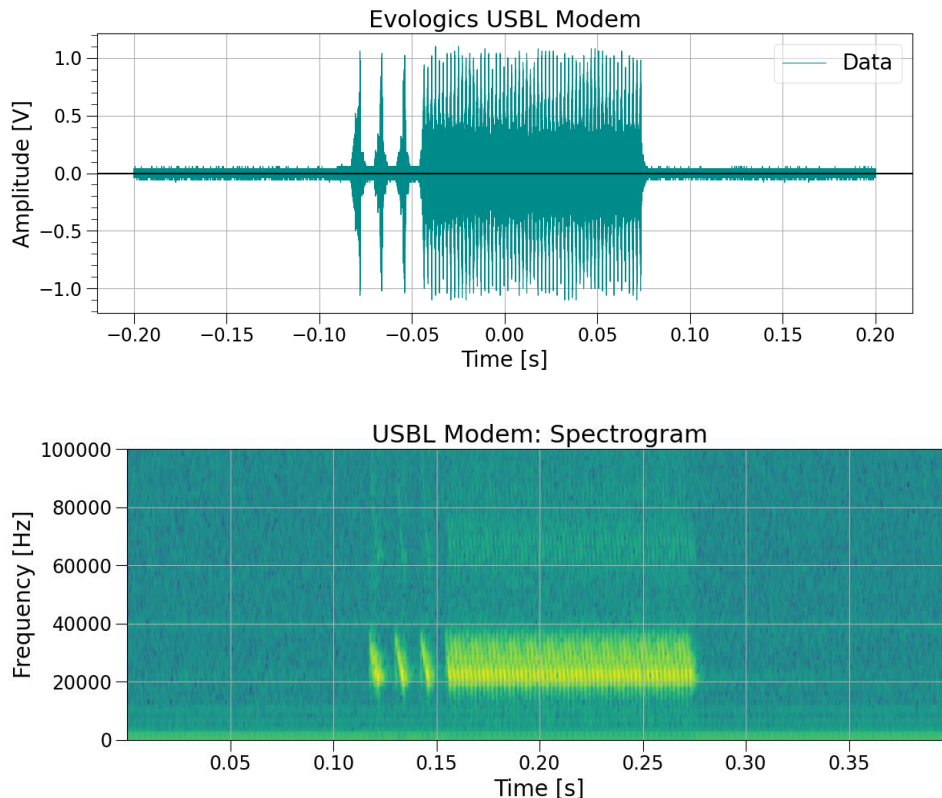


Abbildung 27: Labormessung der akustischen Signale zur Kommunikation zwischen zwei USBL-Modems. Signal in Zeitdomäne (oben) und zugehöriges Spektrogramm (unten).

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Regelungstechnik wurden zwei Wassertests in der Ullaklinger-Halle in Aachen für die Validierung der akustischen Navigation zwischen dem nanoAUV und der Schmelzsonde geplant und erfolgreich durchgeführt – einer im Jahr 2021 und ein weiterer im Jahr 2022.

Das III. Physikalische Institut B war verantwortlich für die Organisation und Planung der Wassertests, einschließlich der Planung möglicher befahrbarer Messszenarien. Dies umfasste zudem auch die Ausarbeitung aller erforderlichen Schnittstellen und Schaltungen im Vorfeld.

Um die Funktionsfähigkeit des GNC-Breadboards zu evaluieren, war es entscheidend, die im Test verwendete Elektronik und Sensoren in einem wasser- und druckfesten Trägersystem zu integrieren. Zu diesem Zweck wurde dem IRT ein Druckkörper aus dem Vorhaben EnEx-RANGE (FKZ 50NA1501) zur

Verfügung gestellt. Zur Integration der neuen Sensorik wurde in der Werkstatt des III. Physikalisches Instituts B ein neuer Flansch mit den erforderlichen Schnittstellen gefertigt.

Für die Stromversorgung des Systems im Wasser und die Kommunikation mit dem Operator wurde das Breadboard-System der Oberflächenstation genutzt. Beide werden über Powerline betrieben, ähnlich wie es auch für das aktuelle TRIPLE-System vorgesehen ist (siehe AP 3D00).

Des Weiteren kam für die Wassertests zwei USBL-Modems der Firma Evologics zum Einsatz. Das Modem S2C T 18/34 wurde am Druckkörper befestigt, während das Modem R 18/34 am Rand des Wasserbeckens platziert wurde



Abbildung 28: Akustisches Modem befestigt an dem Flansch des Druckkörpers.

Um eine mobile Bewegung des Druckkörpers im Wasser zu ermöglichen, wurde ein Schwimmkörper konstruiert. Auf diesem Schwimmkörper wurde eine Struktur platziert, die die Lokalisierung mithilfe des Tachymeters und einer Totalstation unterstützt. Vor Ort wurde der Druckkörper mit der integrierten GNC-Sensorik entlang verschiedener Kurven gefahren, wodurch Daten für die Entwicklung des GNC-Systems gesammelt werden konnten.



Abbildung 29: Bild des Wassertests in der Ulla-Klinger-Halle 2022 - Vogelperspektive: Trägersystem mit GNC-Sensorik stellvertretend für das nanoAUV (links) und das Referenz-USBL-Modem stellvertretend als Schmelzsonde (rechts).



Abbildung 30: Bild des Wassertests in der Ulla-Klinger-Halle 2022 – Seitenansicht während der Messung.

### 3.13.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. Ein Homing-Pinger Konzept unter Verwendung des TRIPLE-FRS Sonars wurde entwickelt und evaluiert. Mehrere Wassertests wurden geplant und durchgeführt.

## 3.14 AP 3900: Steering

### 3.14.1 Ziele

Das Arbeitspaket 3900 (Steering) hatte das Ziel, die Lenkung einer Schmelzsonde zu untersuchen und durch eine Labordemonstration zu validieren. Dazu gehört die Entwicklung eines Konzepts zum Lenken

ohne aktiven Vorschub, die Entwicklung und Bau eines geeigneten Labor-Modells und die Durchführung von Schmelzversuchen zur Prüfung des Konzepts.

### 3.14.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Für das Lenkungskonzept wurde eine Analyse der Anforderungen durchgeführt. Besonders lag der Fokus auf der Realisierung ohne einen aktiven Vorschub. Darauf basierend konnte erfolgreich ein Konzept entwickelt werden. Daraufhin wurde ein Labor-Modell erstellt, um das Konzept zu validieren. Dabei wurde eine Schmelzsonde aus dem Vorhaben EnEx-RANGE (FKZ 50NA1501, AP 2000) in Verbindung mit der Oberflächenstation (FKZ 50NA1501, AP 3000) genutzt. Die Schmelzsonde ist mit einem patentierten, hocheffizienten Schmelzkopf mit parabelförmiger Struktur und Seitenheizern ausgestattet. Zur asymmetrischen Erwärmung des Schmelzkopfes wurden die Heizer neu gruppiert und die Steuerung entsprechend angepasst. Ein Bild der Schmelzsonde und des Schmelzkopfes sind in Abbildung 31 gezeigt. Abbildung 32 zeigt die neue Anordnung der Anschlüsse der Heizpatronen.

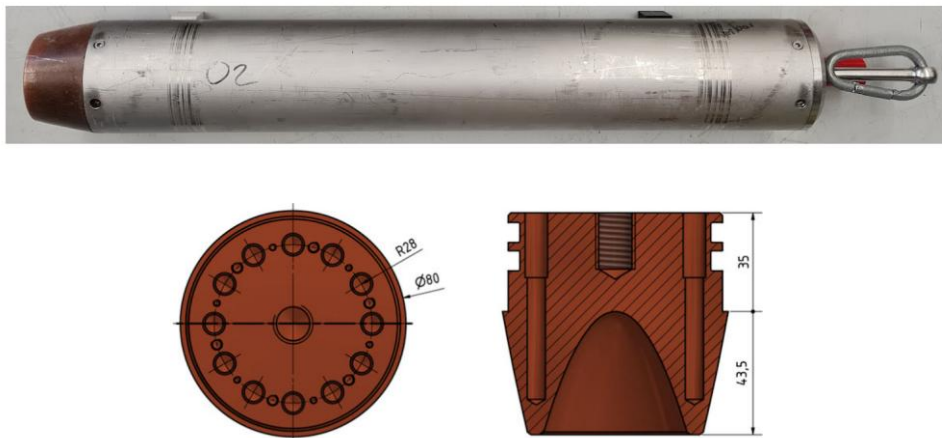


Abbildung 31: Von oben nach unten: Test Schmelzsonde (L: 55,5 cm, D: 8 cm), Querschnitt des verwendeten parabolischen Schmelzkopfes aus Kupferlegierung (zweite Reihe), betrachtet von oben (links) und von der Seite (rechts) [Heinen et al. 2020].

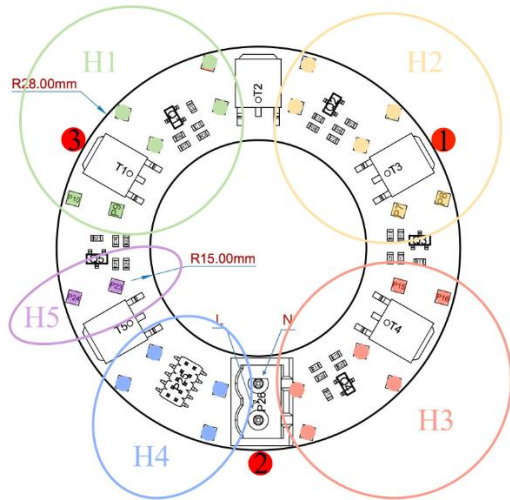


Abbildung 32: Die neu angeordnete Verdrahtung der Heizpatronen im Schmelzkopf, dargestellt durch farblich markierte Blöcke, ermöglicht ein asymmetrisches Heizen.

Des Weiteren gehört zum Testaufbau ein Schienensystem, das gezielt den Anforderungen des Projekts angepasst wurde. Es wurde ein präzises Ables- und Messsystem entworfen, um relevante Daten während der Versuche zu erfassen. Ein weiterer bedeutender Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eines Tracking-Systems. Hierfür wurden die erforderlichen Komponenten beschafft und angepasst, um eine präzise Verfolgung der Bewegung der Schmelzsonde während des Schmelzvorgangs zu ermöglichen. Hiermit wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Die gewonnenen Messdaten wurden einer detaillierten Analyse unterzogen, um die Kurvenfähigkeit der Schmelzsonde zu bestimmen und Erkenntnisse für die Optimierung des Systems zu gewinnen. Ein Bild des Testaufbaus ist in Abbildung 33 gezeigt.

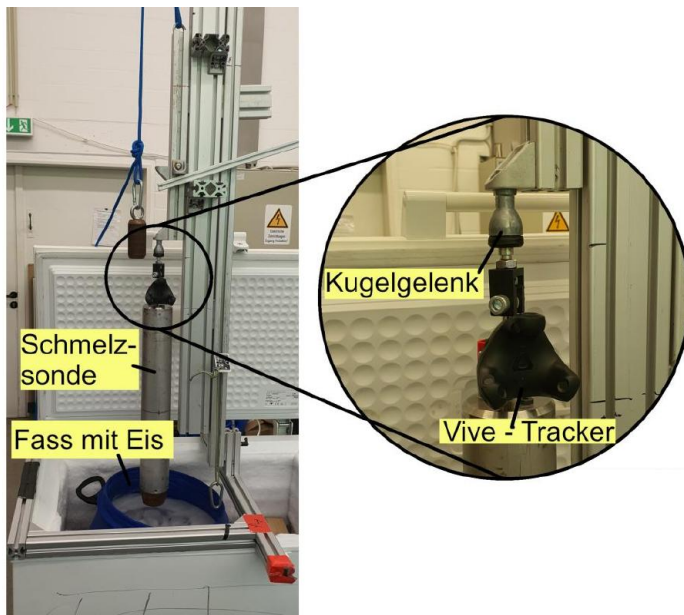


Abbildung 33: Testaufbau ermöglicht konstantes Einschmelzen der Sonde in Eis. Die Messung von Position und Ausrichtung der Sonde wurde mit Hilfe des kommerziellen Trackingsystems durchgeführt.

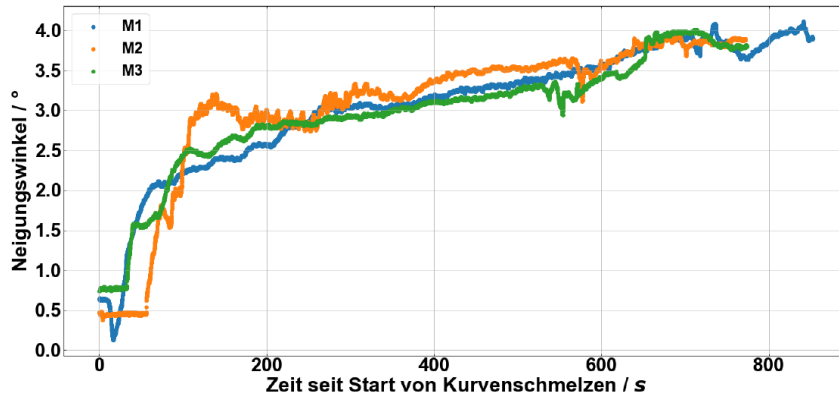


Abbildung 34: Zeitverlauf des Neigungswinkels, berechnet aus den gemessenen Ausrichtungsdaten. In dieser Konfiguration waren vier aktive Heizpatronen mit teilweise eingeschaltetem Seitenheizer im Einsatz.

Die Möglichkeit, die Schmelzrichtung, um mehrere Grade beeinflussen zu können, stellt ein völlig neuartiges Ergebnis dar, das zuvor nicht im Projekt bekannt war. Dieses hat großen Einfluss auf die Navigationsfähigkeit der Sonde und der kann einen unabsehbaren Einfluss auf die zukünftigen Fähigkeiten der TRIPLE-Sonde haben. Eine wissenschaftliche Publikation dieser spektakulären Ergebnisse ist in Vorbereitung.

### 3.14.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. Ein Konzept zur Lenkung einer Schmelzsonde ohne aktiven Vorschub wurde erstellt und im Labor mit einem geeigneten Modell validiert.

## 3.15 AP 3B00: Cable

### 3.15.1 Ziele

Das Arbeitspaket 3B00 (Kabel) fokussierte sich auf die technische Auslegung und Auswahl eines geeigneten Kabels zur Gewährleistung der Spannungsversorgung unter Berücksichtigung von Bruchlast und weiteren Randbedingungen.

### 3.15.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde eine intensive Kooperation mit der GSI GmbH gepflegt, wobei die RWTH Aachen vorrangig als unterstützende Instanz für die GSI GmbH fungierte. Die Auslegung und Festlegung der Randbedingungen für das Schmelzsondenkabel umfasste die Erstellung einer detaillierten Leistungsbeschreibung sowie die anschließende Diskussion der Rückmeldungen von verschiedenen Kabelherstellern. Diese enge Zusammenarbeit ermöglichte die Prüfung und Evaluation der Machbarkeit für die sehr hohen Anforderungen an das Kabel. Als Ergebnis wurden Spezifikationen für das Schmelzsondenkabel erarbeitet. Der TRL wurde somit für die zweite Phase des Vorhabens erhöht.

### 3.15.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. Die Spezifikation und Bedingungen für ein geeignetes Kabel, das den Anforderungen der TRIPLE-Schmelzsonde entspricht, wurden erarbeitet.

## 3.16 AP 3D00: AIT

### 3.16.1 Ziele

Das Arbeitspaket 3D00 hatte das Ziel, die notwendige Hardware (HW) und Software (SW) für einen Gesamtsystem-Integrationstest auf Breadboard-Ebene bereitzustellen und diesen durchzuführen.

### 3.16.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Im Rahmen des Vorhabens übernahm das III. Physikalisches Institut B die Aufgabe der Bereitstellung und Produktion zusätzlicher TRIPLE-IceCraft Subsysteme, darunter das TIC-CDHS (Central Data Handling System) und das TIC-COM (Communication System). Diese Systeme wurden erfolgreich produziert und bereitgestellt. Des Weiteren wurden umfassende Mitarbeit und Unterstützung bei den durchgeführten Tests geleistet, um eine reibungslose Integration der TIC-Subsysteme ins Breadboard sicherzustellen. Für die Integration eines Homing-Pinger ins Breadboard-Vollsystem wurde ein Konzept erarbeitet, welches jedoch aufgrund von unterschiedlichen Anforderungen für das USBL des nanoAUVs und des FRS der Schmelzsonde nicht weiterverfolgt wurde (siehe AP 3830). Die ursprünglich vorgesehenen DFKI-Wassertests wurden vorbereitet, aber von den Projektpartnern aufgrund eines geänderten Testplans nicht durchgeführt. Die Breadboardsysteme wurden daher Labortests und auch auf Gletschern in Zusammenarbeit mit TRIPLE-IceCraft und TRIPLE-FRS eingesetzt.

Die erforderlichen Hardwarekomponenten wurden für einen umfassenden Integrationstest auf Breadboard-Ebene beschafft und gefertigt. Das Breadboard-System der Schmelzsonde umfasst die Spannungsversorgung, das Powerline (PLC)-Modem, das Command and Data Handling System (CDHS) einschließlich aller Sensorik, das PLC-Switch und einen Netzwerkschicht.

### 3.16.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. Die erstellten Breadboard-Systeme wurden für Labor-, Wasser- und Feldtests bereitgestellt und mit verschiedenen TRIPLE-Subsystemen getestet.

## 3.17 AP 4100: System (Oberflächenstation)

### 3.17.1 Ziele

Die Aufgabenstellung für das Arbeitspaket 4100 (Oberflächenstation) bestand darin, ein Systemkonzept für eine Oberflächenstation zu erstellen.

### 3.17.2 Lösungsansatz und Zielerreichung

Die Arbeit beinhaltete die Vorbereitung auf mehrere Concurrent Engineering Workshops sowie die Teilnahme an diesen Workshops mit mehreren Mitarbeitern. Die Hauptaufgaben umfassten die Definition und Ableitung der Systemanforderungen an die Oberflächenstation basierend auf dem Missionsziel, das Erstellen eines Konzeptdesigns für die Oberflächenstation, die Dokumentation der Workshop-Ergebnisse sowie die Entwicklung und den Aufbau eines Breadboardsystems der Oberflächenstation. Das Breadboardsystem wurde auf Basis des TRIPLE-IceCrafts entwickelt und sollte für Systemtests, wie zum Beispiel AP3900 Steering, sowie für die Wassertests bereitgestellt werden.

Alle Arbeiten wurden entsprechend dem Projektplan durchgeführt und ein Systemkonzept erstellt. Das III. Physikalisches Institut B fungierte als Hauptansprechpartner für die Oberflächenstation. Zusätzlich zum Projektplan wurden die Ergebnisse des CE-Workshops in die Software VirSat integriert. Nach den Workshops fanden mehrere Arbeitstreffen mit der GSI GmbH statt, bei denen im Rahmen eines internen CE-Workshops die Auslegungsparameter für die Dome-C Mission fundiert geplant und klare Anforderungen an das System abgeleitet wurden. Die Systemanforderungen für die Oberflächenstation wurden gemäß dem ECSS-Standard in einem System Requirements Review (SRR) dokumentiert und von einem externen Reviewboard überprüft. Der SRR-Review wurde erfolgreich im Jahr 2022 abgeschlossen. Abbildung 35 zeigt einen Ausschnitt des Anforderungskataloges dieses SRR-Reviews.

source	original ID	requirement
	SR-REQ-0011	The Melt-Site Support Equipment software <u>shall</u> run on a central computer which is dedicated for the data acquisition and storage.
	justification: User requirement. note: -	
parents:		children:

source	original ID	requirement
	SR-REQ-0012	The Melt-Site Support Equipment <u>shall</u> provide the required network infrastructure and services to communicate with the Melting Probe.
	justification: Operational capability. note: -	
parents:		children:

source	original ID	requirement
	SR-REQ-0013	The Melt-Site Support Equipment <u>shall</u> provide a network connection for surface components.
	justification: Operational capability. note: -	

Abbildung 35: Ausschnitt aus dem Design-Anforderungskatalog für die Oberflächenstation im Rahmen des SRR-Reviews.

Das entwickelte Konzept für die Oberflächenstation umfasst verschiedene Schlüsselkomponenten: eine Startrampe, die Stromversorgung, ein zentraler Daten-Hub und ein Kontrollsystem sowie die Wartungsausrüstung.

Eine Skizze der Startrampe ist in Abbildung 36 gezeigt. Die Startrampe besteht aus einem 40-Fuß-Container, der alle erforderlichen Teilsysteme beherbergt. Die Schmelzsonde, einschließlich des nanoAUV, ist in diesem Container integriert. Um notwendige Arbeiten in diesem Container durchzuführen, ist der

Container außerdem mit einer Werkstatt mit verschiedenen Arbeitsstationen ausgestattet. Dies ermöglicht Reparaturen von Mechanik oder Elektronik vor Ort. Die Startrampe verfügt auch über eine integrierte IT-/Server-Infrastruktur.



Abbildung 36: Aktuelles Konzept für die Startrampe und Oberflächenstation (Bildrechte: GSI GmbH, Aachen).

Die Stromversorgung besteht aus zwei Teilsystemen. Das erste ist die Bereitstellung der Spannungsversorgung und Energie. Dies wird mit einem 20-Fuß-Container realisiert, der 3 installierte Generatoren enthält. Der benötigte Treibstoff wird mittels eines Pumpsystems zu den Tanks der Generatoren geleitet. Neben der Versorgung der Schmelzsonde versorgen die Generatoren auch den Rest der Ausrüstung zur Unterstützung des Schmelzorts. Die Stromversorgung stellt ein Niederspannungsnetzwerk von 230V / 400V bereit. Das zweite Teilsystem ist die Treibstoffversorgung. Hier ist ein Treibstofftank mit dem benötigten Diesel montiert und installiert.

Der zentrale Datenhub und das Kontrollsystem werden in einem 20-Fuß-Container untergebracht und beinhalten sämtliche wichtigen Computer- und Serversysteme für die Oberflächenoperationen. Während des Schmelzvorgangs der Schmelzsonde können die Daten hier visualisiert, überprüft und kontrolliert werden, um sicherzustellen, dass der Schmelzprozess ordnungsgemäß abläuft. Darüber hinaus werden die Steuerdaten für die Spannungsversorgung, die im Stromversorgungssystem erfasst werden, ebenfalls angezeigt. Sobald die Schmelzphase abgeschlossen ist, wird der Betrieb des nanoAUV über das Kontrollzentrum überwacht. Außerdem besteht die Möglichkeit, Befehlsnachrichten an verschiedene Systeme zu senden. Alle Daten werden auf einem Serversystem gespeichert und zusätzlich redundant gesichert.

Die Wartungsausrüstung und Integrationswerkzeuge sind Teil des Systems und sind in die Startrampe integriert. Hier befinden sich alle Werkzeuge und Spezialwerkzeuge, die benötigt werden, um das Gesamtsystem zu betreiben, instand zu halten und gegebenenfalls zu reparieren. Ein weiterer Teil des

Teilsystems ist das Testequipment, das benötigt wird, um einzelne oder mehrere Systeme zu testen. Je nach Prüfverfahren sind spezielle Werkzeuge und Hilfsmittel erforderlich.

Für Wassertests und Feldversuche wurde ein Breadboard-System für die Steuerung und Kommunikation mit der Oberfläche auf Basis des TRIPLE-IceCraft entwickelt, um die geplanten Daten- und COM-Schnittstellen bereitzustellen. Dieses Breadboard-System wurde erfolgreich in verschiedenen TRIPLE-Systemtests eingesetzt, darunter die GNC-Wassertests in Aachen (2022) und die TRIPLE-FRS-Gletschertests auf dem Jungfraufirn in den Jahren 2022 und 2023.

### 3.17.3 Fazit

Die Ziele des APs wurden erreicht. Anhand vom Missionsziel wurde ein Konzeptdesign einer Oberflächenstation erstellt und dokumentiert. Auf Basis von TRIPLE-IceCraft wurde ein Breadboard-System aufgebaut und in verschiedenen Tests eingesetzt.

## 4 Nutzen und Verwertbarkeit

Zu Projektstart wurde ein Verwertungsplan erstellt. Dieser Plan ist unverändert gültig. Im Folgenden wird auf den aktuellen Stand der Verwertung zu den entsprechenden Positionen des Verwertungsplans eingegangen.

### **Know-How Transfer zur wirtschaftlichen Anwendung durch einen Industriepartner (ab -2 bis +5 Jahre nach Projektende)**

Für das GNC-System des nanoAUV ist ein Technologietransfer in die industrielle Anwendung im Folgevorhaben TRIPLE-GNC angedacht. Ein möglicher Verwertungspartner ist die EvoLogics GmbH oder andere Unternehmen aus dem Bereich der maritimen Industrie und der Offshore-Industrie. In Phase 1 wurde ein Konzept entwickelt, das noch nicht in einem realen Einsatz unter dem Eis getestet und validiert wurde. Erst mit der Übertragung in Produktivcode und einer Demonstration kann eine Aussage über den Transfer in die Industrie getroffen werden.

Für die Demonstration des TRIPLE-FRS-Gesamtsystems auf Alpengletschern wurde von der GSI GmbH eine Schmelzsonde als Trägersystem gefertigt. Zudem ist geplant, die Bereitstellung einer Schmelzsonde für die Demonstration an der Neumayer Station III in der Antarktis am Ende der Phase 2 der TRIPLE-Projektlinie als Unterauftrag an den Industriepartner GSI GmbH zu beauftragen.

### **Patentierung von Schlüsseltechnologien der Schmelzsonde (ab -2 bis +1 Jahre nach Projektende)**

Patentanmeldung „Schmelzkopf einer Eis-Schmelzvorrichtung“ und Weiterverfolgung der Patentierung und Internationalisierung des Patents.

### **Einbindung in die Lehre (ab -2 bis +5 Jahre nach Projektende)**

Die im Vorhaben generierten Ergebnisse fließen in die Lehrveranstaltungen „Regelungstechnik“ sowie „Navigation & Sensorfusion in der Regelungstechnik“ des IRT ein. Das GNC-Konzept sowie Simulationsergebnisse dienen als Anschauungsbeispiel für die Automatisierung von Fahrzeugen in den Vorlesungsfolien, im Skript Regelungstechnik, als Klausuraufgaben, sowie als anschaulicher Demonstrator.

Die wissenschaftliche Verwertung erfolgt in der Lehre und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, insbesondere in der Vorlesung Astronomie und Astrophysik im Masterstudiengang Physik.

Die im Vorhaben generierten Ergebnisse fließen außerdem in die Lehrveranstaltungen „Computational Foundations of Digital Twin Technologies“ sowie das zugehörige „Computational Foundations of Digital Twin Technologies Lab“ des MBD ein. Das Trajektorienmodell, sowie deren Kopplung an Umgebungsdaten eines virtuellen Testbettes dienen auch hier als Anschauungsbeispiel für die Umsetzung von Kernkomponenten eines digitalen Zwillings. Die aus dem TRIPLE Projekt stammenden Inhalte bilden außerdem die Grundlage für eine der Projektarbeiten, welche im Rahmen der Abschlussprüfung durch die Studierenden bearbeitet werden müssen.

## **Abschlussarbeiten (-2 bis +1 Jahr nach Projektende)**

Folgende Abschlussarbeiten wurden im Rahmen der Projektlaufzeit abgeschlossen oder begonnen. Darunter fallen auch Arbeiten, die in enger Synergie mit den Vorhaben TRIPLE-FRS und TRIPLE-Ice-Craft durchgeführt wurden.

### **Dissertationen**

- Jan Audehm, Entwicklung des Systems für die akustische Vorfelderkundung einer Schmelzsonde für die TRIPLE-Projektlinie, RWTH Aachen, seit 2020
- Mia Giang Do, Developments of Technologies for the Exploration of Ocean Worlds, RWTH Aachen, seit 2021
- Maximilian Nitsch, Navigation of a Miniaturized Autonomous Underwater Vehicle Exploring Waters Under Ice, RWTH Aachen University, 2024
- Boledi, Leonardo (2023): Numerical Multiphysics Modeling with Space-Time Finite Elements Assessing the Performance of Thermal Melting Probes (Unpublished doctoral dissertation). Aachen: RWTH Aachen University, 2023

### **Masterarbeiten**

- Qiao, Ruixi: "Robustified Navigation Filters for a Miniaturized Autonomous Underwater Vehicle", Masterarbeit am IRT der RWTH Aachen, abgeschlossen am 29.07.2022
- Maximilian Karl Scharf, On the Performance of an Acoustic Geometry Calibration System for the IceCube Upgrade, Masterarbeit, RWTH Aachen, September 2020
- Lutz Deriks, Development of a camera system as payload demonstrator for the TRIPLE-IceCraft, Masterarbeit, RWTH Aachen, Oktober 2020
- Ben Burgmann, Development of a simulation model for the validation of acoustic signal processing of the TRIPLE Forefield Reconnaissance System, Masterarbeit, RWTH Aachen, November 2021
- Shreyans Sakhare, Numerical Simulations for the Sonar System of the TRIPLE Forefield Reconnaissance System, Masterarbeit, RWTH Aachen, Mai 2022
- Jonas Büning: „Melting Probe Efficiency Modeling“, MA, in Bearbeitung

### **Bachelorarbeiten**

- Likhachev, Dmitrii: „Simulative Investigation of the Localization System of a Miniaturized AUV for Extraterrestrial Exploration“, Bachelorarbeit am IRT der RWTH Aachen, abgeschlossen am 18.03.2021

- Keuker, Laurens: “Development and Comparison of AHRS-Algorithms for Accurate and Robust Attitude Estimation of an Autonomous Underwater Robot”, Bachelorarbeit am IRT der RWTH Aachen, abgeschlossen am 11.11.2022
- Sharif Omar El Mentawi, Bachelorarbeit, Analyse von Sonarmessungen zur Gletscherexploration im EnEx-RANGE-Projekt, Juli 2020
- Andreas Nöll, Bachelorarbeit Test of the Mini-Mainboard for the Acoustic Module of the IceCube Upgrade, Dez. 2020
- Simeon Lämmlein, Aufbau eines Raspberry-Pi basierten Kamerasystems für TRIPLE-IceCraft zur Erforschung subglazialer Welten, Bachelorarbeit, RWTH Aachen, Oktober 2021
- Stefan Andreas Kaiser, Testexperimente zur Manövrierbarkeit der TRIPLE-IceCraft Schmelzsonde, Bachelorarbeit, RWTH Aachen, August 2022
- Fabian Schmiech, A review on Jupiter’s moon Europa and its ability to host extraterrestrial life, Bachelorarbeit, RWTH Aachen, September 2022
- Ronja Westphalen, Analyse des thermomechanischen Verhaltens des Schmelzsondenkabels im TRIPLE-IceCraft-Projekt, Juli 2023
- Lukas Michels, Verbesserung der Algorithmen zur Fehlererkennung und Korrektur (FDIR) im Kontrollsystem des TRIPLE-IceCraft, September 2023

Weitere Abschlussarbeiten werden weiterhin in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern nach Ablauf des Vorhabens durchgeführt.

### **Veröffentlichungen (+1 bis +3 Jahre nach Projektende)**

Die im Rahmen des Vorhabens veröffentlichten Arbeiten sind dem Kapitel „Veröffentlichung der Ergebnisse“ auf S.59 zu entnehmen.

### **Akquise neuer Forschungsvorhaben (-2 bis +3 Jahre nach Projektende)**

Für den Transfer der Konzepte aus dem Vorhaben TRIPLE-nanoAUV 1 (Phase 1) wurden die Vorhaben TRIPLE-nanoAUV 2, TRIPLE-GNC, TRIPLE-FRS-2 und TRIPLE-LifeDetect akquiriert, an denen die RWTH Aachen beteiligt ist. Das Vorhaben TRIPLE-IceCraft 2 befindet sich aktuell in Planung. Die Vorhaben haben das Ziel, das nanoAUV, die Schmelzsonde und die wissenschaftliche Nutzlast zu bauen, zu testen und zu demonstrieren, um eine große Feldkampagne in der Antarktis (Dome-C Region) vorzubereiten.

Am MBD wurden darüber hinaus in Kooperation mit dem DLR-Planeteninstitut (Dr. Ana-Catalina Plesa) ein DFG-Forschungsprojekt akquiriert, welche in direktem thematischem Kontext des TRIPLE Projektes steht (Compositional heterogeneities in the outer ice shell of Europa – a scale-coupled computational study - Project number 460819306). Ebenfalls in Kooperation mit Dr. Ana-Catalina Plesa, sowie einiger am MBD aktiver MitarbeiterInnen wurde das International Space Science Institute (ISSI) Team ‚Bridging the Gap: From Terrestrial to Icy Moons Cryospheres‘ (<https://teams.issibern.ch/icymoonscryospheres/>) eingeworben.

### Öffentlichkeitsarbeit (ab -2 bis +1 Jahre nach Projektende)

Das Vorhaben erzielt eine hohe Aufmerksamkeit, die für Öffentlichkeitsarbeit genutzt wird. Hierzu zählen neben der Einrichtung von Instituts-eigenen Webseiten, der Präsenz auf der RWTH Wissenschaftsnacht und dem RWTH Youtube Channel, auch die Erstellung einer gemeinsamen Webseite für alle TRIPLE-Vorhaben: <https://triple-project.net/>. Medienwirksame Ergebnisse wurden und werden kontinuierlich auf Twitter-, Instagram- und LinkedIn-Accounts veröffentlicht. Die RWTH hat eine Pressemitteilung zum Vorhabenstart erstellt, die von der Aachener Zeitung sowie der Lokalzeit Aachen aufgegriffen wurden und zu weiteren Beiträgen geführt haben.

In Zusammenarbeit mit dem Vorhaben TRIPLE-IceCraft wurde eine Präsenz im DLR-Blog und auf den Social-Media-Plattformen Instagram und Twitter / X etabliert. Zudem konnten durch die Erstellung von Jahresberichten und Beiträgen zu den Fotos des Monats auch Sichtbarkeit bei der Forschungsstation am Jungfraujoch erreicht werden.

Die Teilnahme am Workshop Junge DEGA trug zur weiteren öffentlichen Sichtbarkeit bei.

## 5 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Erreichung der Projektziele wurde die RWTH Aachen in den Positionen Personalmittel, Sachkosten- und Investitionen und Reisemittel gefördert.

Der größte Posten im zahlenmäßigen Nachweis machen die Personalausgaben aus. Diese wurden wie geplant abgerufen und verausgabt. Personalmittel wurden primär für wissenschaftliche Mitarbeitende verwendet, die direkt an der Entwicklung der Automatisierungslösung beteiligt waren. Aufgrund der umfangreichen Entwicklungen im Projekt war dieser Einsatz unbedingt erforderlich. Neben wissenschaftlichen Mitarbeitenden wurden auch über die Projektlaufzeit hinweg studentische Hilfskräfte eingesetzt. Diese konnten in verschiedensten Bereichen des Projekts intensiv unterstützen und haben maßgeblich zum Erfolg des Projektes beigetragen.

Die Beschaffung von Gegenständen und Sachausgaben erfolgten gemäß dem Projektplan. Die Kostenübernahme für eine Patentanmeldung „Schmelzkopf einer Eis-Schmelzvorrichtung“ wurde wie beantragt durchgeführt. Eine Übersicht des Patentportfolios ist als Anhang beigefügt.

Sachkosten- und Investitionen entstanden vor allem durch die Beschaffung eines Doppler Velocity Logs (DVL) der Firma WaterLinked zur Geschwindigkeitsmessung. Das DVL wurde für die experimentelle Validierung mit dem Navigationsfilter (AP2720) benötigt. Im Verlauf des Vorhabens zeigten die ersten Versuche sowie die simulative Validierung, dass ein DVL zwingend notwendig ist, da eine INS/USBL Navigation nicht zu einer zufriedenstellenden Zustandsschätzung führt, mit der die Regelung arbeiten kann. Weitere Kosten entstanden durch die Beschaffung von Kleinteilen wie Recheneinheiten, Sensoren und Stecker, die für die experimentellen Validierungen benötigt wurden.

Reisemittel wurden primär für Messkampagnen und Konferenzteilnahmen verwendet. Durch die Konferenzteilnahmen konnten die Ergebnisse des Vorhabens einem breiten Publikum vorgestellt werden und sind dadurch in der Branche bekannt. Nationale Reisen sind zu Projektarbeitstreffen sowie den halbjährlichen Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen unternommen worden. Darüber hinaus dienen sie der Präsentation von Forschungsergebnissen auf nationalen Tagungen, z.B. der DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. Ergebnisse von TRIPLE-nanoAUV 1 wurden auch in mehreren gemeinsamen Beiträgen mit TRIPLE-IceCraft und TRIPLE-FRS auf internationalen Konferenzen präsentiert. Zusätzlich zum ursprünglichen Projektplan konnten zwei Messkampagnen auf Alpengletschern realisiert werden. Alle Änderungen des Ausgabenplans wurden in enger Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber durchgeführt.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das langfristige Ziel der TRIPLE-Projektlinie ist die Bereitstellung einer Nutzlast für eine interplanetare Mission zum Jupitermond Europa zur Exploration des unter dem Eis befindlichen Flüssigkeitsreservoirs. Um als potenzieller Partner für eine solche Mission in Betracht zu kommen, ist es erforderlich, umfangreiche Expertise im Bereich des Baus und Betriebs von Schmelzsonden und autonomen Unterwasserfahrzeugen erlangen. Dazu gehören die Integration des AUVs in eine Schmelzsonde, sowie die Realisierung der Autonomiefunktionen durch ein Guidance, Navigation and Control System. Das maßgeblich erforderliche Alleinstellungsmerkmal des TRIPLE-Systems ist der Einsatz unter einer Eisdecke. Als vorbereitende, terrestrische Demonstration wird eine Erkundungsmission unter der ca. 4000m dicken Eisdecke der Zentralantarktis (Dome-C) angestrebt. Es gibt praktisch keine vergleichbare Mission, welche darauf abzielt, ein autonomes Kleinstfahrzeug mit einer Schmelzsonde durch eine 4000m dicke Eisdecke zu transportieren, dieses auszusetzen, nach der Exploration wieder aufzunehmen und sicher zur Oberfläche zurücktransportieren. Das System zum Transport sowie dem Aussetzen und Einholen ist für das Vorhaben daher ein unverzichtbares Element. Expertise in dem Bereich existiert vor allem für Anwendungen im Freiwasser. Experimentelle Entwicklungen auf dem Gebiet (z.B. EurEx) konnten sich bisher nicht durchsetzen. Die (Weiter-)Entwicklung einer Schmelzsonde für den Transport durch das Eis sowie die Entwicklung des nanoAUV, als dessen Nutzlast wird, daher als notwendig angesehen. Die geleisteten Arbeiten stellen daher einen angemessenen Beitrag zur Realisierung einer zukünftigen Raumfahrtmission dar.

## 7 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Im Vorhabenzeitraum hat das DFKI im Vorhaben EurEx-LUNa einen Feldtest mit dem AUV DeepLeng im zugefrorenen Torneträsksee in Nordschweden durchgeführt. Das DFKI lässt seine Erfahrung als Verbundpartner in TRIPLE mit einfließen. Im Gegensatz zum nanoAUV kann DeepLeng jedoch nicht in die TRIPLE-Schmelzsonde integriert werden, da es sich um ein konventionelles und daher großes/schweres AUV handelt.

Weitere Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen sind der RWTH während der Vorhabenlaufzeit nicht bekannt geworden.

## 8 Veröffentlichung der Ergebnisse

Mit zahlreichen Veröffentlichungen in Zeitschriften, Proceedings und Konferenzvorträgen konnte eine hohe Sichtbarkeit für die Projektlinie TRIPLE erzeugt werden. Dies wird gestützt insbesondere durch die Auszeichnung der am Projekt beteiligten Wissenschaftlerin Mia Do für ihren Vortrag zur DPG-Frühjahrstagung Heidelberg 2022 mit dem Preis für den besten Vortrag vom Fachverband Extraterrestrische Physik und der Arbeitsgemeinschaft Extraterrestrische Forschung e. V.. Sie wurde daraufhin auch zu einem Festvortrag auf der nachfolgenden Frühjahrstagung 2023 in Dresden eingeladen. Für die Veröffentlichung eines Artikels im Akustik Journal der Deutschen Gesellschaft für Akustik wurde das TRIPLE Konzept auch für das Titelbild der Zeitschrift ausgewählt.

[IRT1] Nitsch, M.; Bande Firvida, M.; Panten P.; Meckel, S., Koch; T., Stenger, D.; Rachuy, C.; Gehrt, J.-J.; Clemens, J.; Waldmann, C. (2021): TRIPLE-nanoAUV: A Guidance, Navigation and Control System for an Autonomous Underwater Vehicle to Explore the Oceans of Icy Moons. In: 18th International Planetary Probe Workshop (IPPW 2021).

[IRT2] Stenger, D.; Nitsch, M.; Abel, Dirk (2022): Joint Constrained Bayesian Optimization of Planning, Guidance, Control, and State Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle. In: 2022 European Control Conference (ECC): 12-15 July 2022 / publisher: IEEE, 1982-1987, 2022. DOI: 10.23919/ECC55457.2022.9838053

[IRT3] Nitsch, M.; Stenger, D., Dirk, A. (2023): Automated Tuning of Nonlinear Kalman Filters for Optimal Trajectory Tracking Performance of AUVs. In: 22nd IFAC WORLD Congress: 9-14 July 2023 / publisher: IFAC-PapersOnLine, 11608-11614, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.480>

[IRT4] Navigation of a Miniaturized Autonomous Underwater Vehicle Exploring Waters Under Ice. Aachen: RWTH Aachen University, 2024

[PHYS1] Journal Article in Annals of Glaciology – Lars Steffen Weinstock, Simon Zierke, Dmitry Eliseev, Peter Linder, Cornelius Vollbrecht, Dirk Heinen, Christopher Wiebusch, The Autonomous Pinger Unit of the Acoustic Navigation Network in EnEx-RANGE: an autonomous in-ice melting probe with acoustic instrumentation, 2020, 10.1017/aog.2020.67, Zeitschriftpublikationen

[PHYS2] DEGA (Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.) – Akustik Journal – Mia Giang Do et al. – Akustisches Vorfelderkundungssystem für die Navigation von Schmelzsonden in Eis - Oktober2023 (eingeladener Artikel und Coverbild), Zeitschriftpublikationen

[PHYS3] OCEANS 2021: San Diego – Porto, D. Heinen, J. Audehm, F. Becker, G. Boeck, C. Espe, M. Feldmann, G. Francke, P. Friend, N. Haberberger, K. Helbing, C. T. Nghe, M. Stelzig, M. Vossiek, C. Wiebusch, S. Zierke, The TRIPLE Melting Probe - an Electro-Thermal Drill with a Forefield Reconnaissance System to Access Subglacial Lakes and Oceans, 10.23919/OCEANS44145.2021.9705999 (Februar 2022), Konferenz Proceeding

[PHYS4] Institutstagung III. Physikalisches Institut B in Monschau 2021, M. G. Do, TRIPLE: Technologies for Rapid Ice Penetration and subglacial Lake Exploration, Konferenz Proceeding

[PHYS5] DAGA 2022 Stuttgart, J. Audehm, B. Burgmann, M. G. Do, S. El Mentawi, D. Heinen, J. Hermannsgabner, A. Nöll, S. Sakhare, C. Wiebusch, Y. Ye, S. Zierke, Das Sonar des TRIPLE-Vorfelderkundungssystem für die Navigation in Gletschereis, Konferenz Proceeding

[PHYS6] DAGA 2023 Hamburg, M. G. Do, J. Audehm, C. Benning, D. Malik, S. El Mentawi, C. Günther, O. Gries, D. Heinen, A. Nöll, A. Rifaie, S. Sakhare, J. Savelberg, C. Wiebusch, Y. Ye, S. Zierke, Akustisches Vorfelderkundungssystem in Eis für eine zukünftige Raumfahrtmission, Konferenz Proceeding

[PHYS7] IceCube Polar Science Workshop, Dirk Heinen, et al., TRIPLE-IceCraft - A Retrievable Melting Probe for Transporting Scientific Payloads, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS8] ASSW2021, Dirk Heinen, et al., TRIPLE-IceCraft - A Retrievable Melting Probe for Transporting Scientific Payloads, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS9] IPPW 2021, J. Audehm, et al., TRIPLE-FRS - A Forefield Reconnaissance System for Melting Probes to Explore Icy Worlds, <https://www.youtube.com/watch?v=Egql6Vyd5BM> (ab Minute 44:40), Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS10] DPG-Frühjahrstagung Heidelberg 2022, M. G. Do, et al., On the Subsurface Exploration of Ocean Worlds in the Outer Solar System with the TRIPLE project, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS11] DPG-Frühjahrstagung Heidelberg 2022, D. Heinen, et al., TRIPLE-IceCraft - A Retrievable Melting Probe to Transport Scientific Payloads into Subglacial Lakes or Oceans, , Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS12] DPG-Frühjahrstagung Heidelberg 2022, S. Zierke, et al., TRIPLE-IceCraft: A retrievable melting probe for transporting scientific payloads through glacial ice, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS13] DPG-Frühjahrstagung Heidelberg 2022, J. Audehm, et al., The In-Ice Sonar System for the TRIPLE Forefield Reconnaissance System, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS14] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2022-I in Wuppertal, D. Heinen, et al., Integration TRIPLE-IceCraft, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS15] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2022-I in Wuppertal, M. G. Do, et al., Aletschgletscher: Einsatz von Schmelzsonden, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS16] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2022-II in Oberpfaffenhofen, D. Heinen, Der Weg in die Antarktis zur Neumayer III, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS17] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2022-II in Oberpfaffenhofen, S. Zierke, Assembly Integration and Testing (Comms, Software & Handling), Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS18] 19th International Planetary Probe Workshop (IPPW 2022), S. Zierke, et al., TRIPLE-IceCraft - A retrievable melting probe for transporting scientific payloads through glacial ice, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS19] Institutstagung III. Physikalisches Institut B in Monschau 2023, D. Heinen, TRIPLE-IceCraft: Unser Weg zur Neumayer-Station III, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS20] DPG-Frühjahrstagung Dresden 2023, M. G. Do, et al., A melting probe for the exploration of subglacial lakes within the TRIPLE project line, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS21] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2023-I in Bremen, J. Audehm, et al., Research Station and Infrastructure at the Jungfraujoch, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS22] Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE-2023-I in Bremen, Stefan Kaiser, et al., Manövrierbarkeit von Schmelzsonden, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS23] 20th International Planetary Probe Workshop (IPPW 2023), D. Heinen, et al., Testing the Retrievable Melting Probe TRIPLE-IceCraft in a Terrestrial Analog in the Ekström Ice Shelf in Antarctica, Konferenzbeiträge und Wissenschaftskommunikation

[PHYS24] Zusätzliche Aktivitäten zur Präsentation von Ergebnissen und Wissenschaftskommunikation:

- Mitarbeit an der TRIPLE-Webseite "triple-project.net": Befüllung der Systembeschreibung zur Schmelzsonde und des Vorfelderkundungssystems sowie Aktualisierung der News-Seite
- Präsentation der Feldtestergebnisse vom Aletsch-Gletscher für die Forschungsstation auf dem Jungfraujoch
- Beitrag zum Activity Report 2022 der High Altitude Research Station Jungfraujoch, M. Stelzig, et al., Validation of Sensor Systems in an Analogue Scenario for Icy Moon Exploration
- Erstellung des Twitter-Accounts TRIPLE-IceCraft. Befüllung mit Inhalten zum Feldtest auf dem Langenferner zu TRIPLE-IceCraft und darüber hinaus TRIPLE-FRS. Ziel ist die spätere Begleitung des Feldtest 2023 an der Neumayer-Station III in der Antarktis über diesen Account. (Stand 12.10.23 87 Follower)
- Mitarbeit an der DLR-Blogreihe „TRIPLE-IceCraft-Expedition“ zum Bericht über die Expedition der IceCraft Schmelzsonde an der Neumayer-Station III in der Antarktis

[MBD1] Boledi, Leonardo (2023): Numerical Multiphysics Modeling with Space-Time Finite Elements Assessing the Performance of Thermal Melting Probes (Unpublished doctoral dissertation). Aachen: RWTH Aachen University, 2023

[MBD2] Baader, F.; Boxberg, M.S.; Chen, Q.; Förstner, R.; Kowalski, J.; Dachwald, B. (2024): "Field-test performance of an ice-melting probe in a terrestrial analogue environment." *Icarus* 409 (2024): 115852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115852>

[MBD3] Boxberg, M.S.; Chen Q.; Plesa, A.-C., Kowalski, J. (2023): Ice transit and performance analysis for cryorobotic subglacial access missions on Earth and Europa. *Astrobiology*. 1;23(11):1135-52. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0071>

[MBD4] Kowalski, J.; Boledi, L.; Boxberg, M.S.; Chen, Q.; Simson, A.L. (2023): Cryotwin–Digital infrastructure for virtually-assisted preparation and analysis of cryo-robotic exploration missions. In 84th EAGE Annual Conference & Exhibition 2023 Jun 5 (Vol. 2023, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023101223>

[MBD5] Kowalski, J.; Boxberg, M.S.; Grundmann J.T.; de Vera J.P.; Heinen, D; Funke, O. (2023): The TRIPLE project–Towards technology solutions for life detection missions. *Copernicus Meetings*; 2023 Feb 22. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17371>

[MBD6] Boxberg, M.S.; Simson, A.; Chen, Q.; Kowalski, J. (2022): Investigation of ice with geophysical measurements during the transit of cryobots. In EGU General Assembly Conference Abstracts 2022 May (pp. EGU22-10195). DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10195>

[MBD7] Boxberg, M.S.; Baader, F.; Boledi, L.; Chen, Q.; Dachwald, B; Francke, G.; Kerch, J.; Plesa A.-C.; Simson, A.L.; Kowalski, J. (2021): Concepts to utilize planetary analogue studies for icy moon exploration missions. *Copernicus Meetings*; 2021 Apr 19. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13052> (<https://www.youtube.com/watch?v=MPDJMMOVE8A>)

[MBD8] Boxberg, M.S.; Boledi, L.; Chen, Q.; Plesa, A.-C. ; Simson, A.L.; Kowalski, J (2021): A Virtual Testbed Infrastructure for Cryo-robotic Subsurface Exploration. 18th International Planetary Probe Workshop, 17. Jun. - 10. Aug. 2021, Online <https://elib.dlr.de/143633/>

[MBD9] Boxberg M.S.; Audehm, J.; Becker, F.; Boledi, L.; Burgmann, B.; Chen, Q.; Friend, P.; Haberberger, N.; Heinen, D.; Nghe, C.T.; Simson, A.L. (2021): TRIPLE–Ice Data Hub, Model-based Mission Support and Forefield Reconnaissance System. DOI: <https://doi.org/10.23689/fidgeo-3968>

## 9 Literaturverzeichnis

Heinen D., et al., The TRIPLE Melting Probe - an Electro-Thermal Drill with a Forefield Reconnaissance System to Access Subglacial Lakes and Oceans, IEEE OCEANS 2021, San Diego – Porto, San Diego, CA, USA, IEEE Conferences, 02/2022, DOI:10.23919/OCEANS44145.2021.9705999

Heinen D., Linder P, Zierke S, Wiebusch C., An efficient melting probe for glacial research. Annals of Glaciology. 2021;62(84):171-174. doi:10.1017/aog.2020.28