

# FernBin

## Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt

Teilvorhaben: Sichere assistierte Schiffführung mit online Trajektorienplanung

Forschungsvorhaben 03SX506E

## Abschlussbericht

**30.09.2024**

Hinweis: für eine vollständige Beschreibung des Vorhabens FernBin wird auf den gemeinsamen Abschlussbericht aller Partner:innen verwiesen. In diesem sind auch die Arbeitsinhalte der RWTH in den entsprechenden Kontext gesetzt.



Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Institut für Regelungstechnik (IRT)  
Campus-Boulevard 30  
D-52074 Aachen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Der vorliegende Bericht basiert in Teilen auf folgenden Veröffentlichungen, an denen das IRT beteiligt ist, und die im Rahmen des FernBin Projektes entstanden sind:

- [IRT1] M. Huang, M. Kosch, J-J, Gehrt, R. Zweigel, D. Abel, "Application of Recent GNC Approaches for Automation in Shipping," abstract in Autonomous Inland & Short Sea Shipping (AISS), 2021
- [IRT2] H. Zhang, M. Kosch, T. Reuscher, D. Abel, "Towards Robust Navigation Solution and Flexible Sensor Fusion in Challenging Inland Shipping Scenarios," abstract in Autonomous Inland & Short Sea Shipping (AISS), 2022
- [IRT3] H. Zhang, X. Xia, M. Nitsch and D. Abel, "Continuous-Time Factor Graph Optimization for Trajectory Smoothness of GNSS/INS Navigation in Temporarily GNSS-Denied Environments," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 4, pp. 9115-9122, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3189824.
- [IRT4] M. Huang and D. Abel, "A\*-guided Incremental Sampling for Trajectory Planning of Inland Vessels in Narrow Ship Canals," 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Aachen, Germany, 2022, pp. 658-663, doi: 10.1109/IV51971.2022.9827320.
- [IRT5] M. M. Moser, M. Huang and D. Abel, "Model Predictive Control for Safe Path Following in Narrow Inland Waterways for Rudder Steered Inland Vessels\*," 2023 European Control Conference (ECC), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/ECC57647.2023.10178205.
- [IRT6] H. Zhang, Z. Wang and H. Vallery, "Learning-based NLOS Detection and Uncertainty Prediction of GNSS Observations with Transformer-Enhanced LSTM Network," 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 2023, pp. 910-917, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10422672.
- [IRT7] H. Zhang, C-C. Chen, H. Vallery and T. D. Barfoot, GNSS/Multi-Sensor Fusion Using Continuous-Time Factor Graph Optimization for Robust Localization, IEEE Transactions on Robotics, doi: 10.1109/TRO.2024.3443699
- [IRT8] H. Zhang (2024): Handling Outliers in Factor Graph for Vehicle Localization, Dissertation, geplant

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung .....</b>	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens der RWTH Aachen .....	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	8
1.4	Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation.....	10
1.4.1	Hochgenaue und integrale Navigationslösung .....	10
1.4.2	Trajektorienplanung .....	11
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens.....</b>	<b>14</b>
2.1	Ergebnisse des Forschungsvorhabens mit Gegenüberstellung der Ziele .....	14
2.1.1	Anforderungsanalyse, Systemkonzept und Tests (AP2000) .....	16
2.1.2	Hardwareausrüstung, Kalibrierung und Inbetriebnahme (AP3200) .....	17
2.1.3	Daten und Datenübertragung (AP4000, AP6000, AP8000).....	22
2.1.4	Entwicklung der Navigationslösung (AP9100) .....	25
2.1.5	Schiffsmodellierung und modellbasierte Trajektorienprädiktion (AP7200-AP7300) .....	34
2.1.6	Einbindung eines Bahnführungsassistenten und modellprädiktive Trajektorienregelung (AP9400) .....	35
2.1.7	Online und interaktive Trajektorienplanung (AP9500) .....	37
2.1.8	Entwicklung des interaktiven Dashboards (AP5000) .....	42
2.1.9	Abschlussdemonstration (AP10600) .....	45
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	47
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	47
2.4	Einschätzung der Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	49
2.5	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt vonseiten Dritter ...	51
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse (3 Seiten) .....	52
2.7	Quellenverzeichnis: .....	54

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens der RWTH Aachen

Die Binnengewässer spielen beim stetig wachsenden maritimen Handel, der von 44.369 Mrd. Tonnenmeilen 2010 auf 54.237 Mrd. Tonnenmeilen 2015 (+22%) angestiegen ist, eine wichtige Rolle [1, 2, 3]. Allerdings steht aufgrund des zunehmenden Mangels an geschultem Personal und strengeren Vorschriften über Kohlendioxid- und Luftschadstoffemissionen die Binnenschifffahrt vor großen Herausforderungen. Zum Beispiel ereignen sich trotz rückläufiger Zahlen immer noch zahlreiche Schiffsunfälle, von denen 75% auf menschliches Versagen zurückzuführen sind [4]. Um den steigenden Bedarf an hohen Transportvolumen, Sicherheitsvorschriften und Umgebungsschutz in der Binnenschifffahrt abzudecken, ist eine neue technische und betriebswirtschaftliche Revolution dringend notwendig. In diesem Kontext wird in der ersten Linie häufig die Erhöhung des Automatisierungsgrades versprochen. Somit zeigen die Vorarbeiten aus ehrgeizigen Forschungsprojekten, dass die Weiterentwicklung der Automatisierung bis hin zu einem völlig autonomen Betrieb diese Herausforderungen mindern kann [5, 6]. Jedoch lässt sich im Hinblick auf den aktuellen technischen Stand noch keine fahrerlose Schiffsführung, insbesondere beim Transport der Gefahrgüter, im öffentlichen Wasserverkehr in einem großen Rahmen umzusetzen. Im Gegensatz zur vollautonomen Schiffsführung stellt der Ansatz eines ferngesteuerten Schiffes ein tragfähiges Konzept dar. Dabei kann der Schiffsführer das zu führende Schiff an einem innovativen Steuerstand in einem entfernten Steuerungszentrum am Land steuern. Das Konzept „ferngesteuertes Schiff“ bietet unter anderem eine Möglichkeit an, die Personalengpässe zu entschärfen, indem ein Schiffsführer in die Lage versetzt wird, mithilfe von Assistenzsystemen gleichzeitig mehrere Schiffe zu steuern. Ebenso lässt sich eine Redundanz zur Erhöhung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit bereitstellen, dass viele Schiffe von unterschiedlichen Steuerungszentren aus durch mehrere Schiffsführer überwacht und ferngesteuert werden. Außerdem ist es denkbar, dass der Treibstoffverbrauch und damit die Emissionen sowie der Verschleiß mit einem höheren Automatisierungsgrad sinken werden, nicht nur dank der potenziellen Verbesserung des Schiffsantriebs mittels neuartiger Automatisierungsfunktionen, sondern auch aufgrund der zentralen Fernkoordinierung mehrerer Binnenschiffe in einem gemeinsamen Lagebild.

Ziel des Forschungsprojektes „FernBin“ ist, den oben dargestellten Ansatz des ferngesteuerten Schiffes umzusetzen, zu demonstrieren, und mit den Ergebnissen das betriebswirtschaftliche Potenzial dieses Ansatzes in der Binnenschiffindustrie zu bewerten. Dafür soll zum einen der Automatisierungsgrad des Binnenschiffs mithilfe von moderner Umfeldsensorik und fortschreitenden Assistenzfunktionen, wie Bahnplaner und -regler mit Kollisionswarnsystem, erhöht werden, um die technischen Anforderungen einer assistierten Fernsteuerung zu erfüllen. Zum anderen werden neue Steuerungszentren auf Basis der Vorarbeiten [7] mit innovativer Mensch-Maschine-Schnittstelle weiterentwickelt. Somit ergibt sich ein realitätsnahes Ökosystem nach der

Umsetzung aller technischen Maßnahmen, in welchem ein reales Binnenschiff als Versuchsträger mit den Steuerungscentren an Land in Echtzeit kommuniziert. Eine schematische Darstellung des FernBin-Systems zeigt Abbildung 1, wo alle Teilmodule und externe Verkehrsteilnehmer durch passende Kommunikationswege zusammen interagieren. Die blauen Blöcke kennzeichnen die minimal notwendigen Komponenten zur Realisierung des Systemkonzepts. Weitere Steuerstände und Verkehrsteilnehmer (sowohl konventionelle als auch (semi-)automatisierte Schiffe) sind optional, leisten jedoch einen großen Beitrag zur Robustifizierung und Verallgemeinerung des FernBin-Ökosystems.

Neben dem Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen setzt sich das FernBin-Team aus zahlreichen Forschungsinstituten und industriellen Firmen zusammen. Das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V. (DST) leitet das Verbundprojekt und kümmert sich um die Bereitstellung des Versuchsträgers mit Kamerasystem und Datenschnittstellen. Die Firma Argonics koordiniert die Modernisierung und Hardwareausrüstung des Versuchsträgers und stellt die notwendigen Netzwerkkomponenten und Schnittstellen zu Schiffsaktoren mittels eines Bahnführungsassistenten bereit. Ein Radarsystem und die Informationsdarstellungssystem ECDIS werden vom Partner ArgoNav und innovative navigation (in) installiert und weiterentwickelt, um die nachfolgende Automatisierung zu unterstützen. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) stellt die notwendige Sensorik und Datenplattform für die Infrastrukturdaten bereit. Eine Verkehrssimulation für die Binnenschiffahrt wird vom Partner Ingenieurbüro Kauppert (ibk) zur Unterstützung der Kollisionsvermeidung und Trajektorienplanung angeboten. In der Forschungsarbeit vertreten auch drei Lehrstühle an der Universität Duisburg-Essen. Dabei beschäftigt sich das Institut für Schiffbau, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) mit der Modellbildung der Schiffsdynamik. Der Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik (SRS) forscht an einem Workflowmanagement und Notfallsystem für sicherheitskritische Situationen. Das gesamte System, sowohl der Versuchsträger als auch die Steuerstände und Leitstellen, wurde vom Lehrstuhl für Mechatronik und Systemdynamik (IMECH) mit Berücksichtigung der Anforderungsanalyse konzeptioniert und aufgebaut.

**Hinweis:** Die zwischenzeitlich erfolgte Umbenennung des Instituts für Schiffs und Meerestechnik (ISMT) der Universität Duisburg zum Institut für Nachhaltige und Autonome Maritime Systeme (INAM) ist in diesem Bericht nicht umgesetzt, da sie erst kurz vor Projektende erfolgte. Die beiden Institute sind als gleichbedeutend zu verstehen.

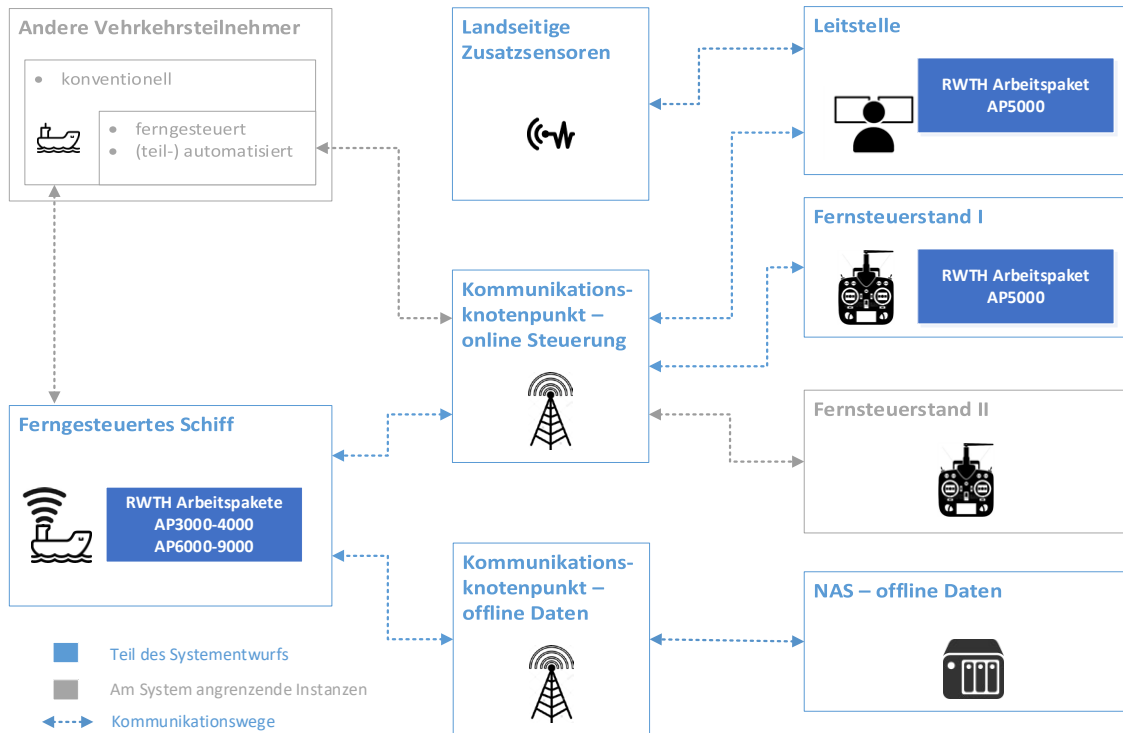


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Konzepts in FernBin. Blaue Module stellen die minimal notwendigen Funktionalitäten dar. Graue Teilsysteme sind optional. [IMECH, AP2300 Systemkonzept]

Als Versuchsträger wird das Binnenschiff „Ernst Kramer“ von der Firma Rhenus Partnership im Projekt bereitgestellt. Abbildung 2 präsentiert den Versuchsträger Ernst Kramer. Das Schiff hat eine Länge von 104,94m und eine Breite von 9.5m. Die maximale Beladung beträgt 2226t. In Abschnitt 2.1.4 folgen die Details zur Hardwareausrüstung am Versuchsträger.

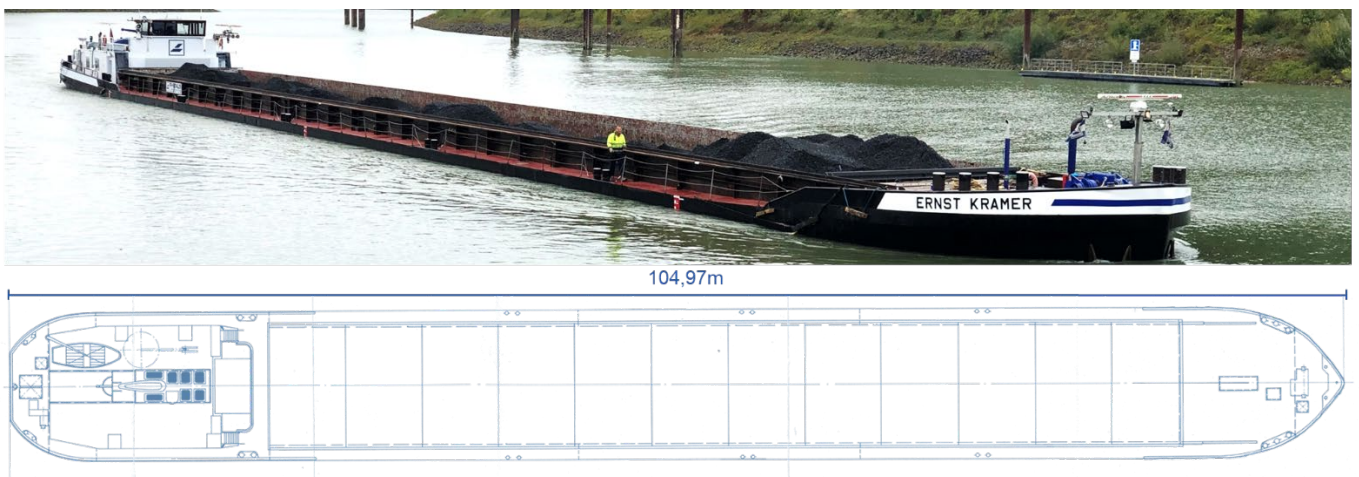


Abbildung 2: Versuchsträger Ernst Kramer

Das Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen hat im Projekt ein robustes und assistiertes Navigationssystem entwickelt, welches aus einer hochgenauen und integren Lokalisierungslösung und einer online interaktiven Trajektorienplanung zusammensetzt. In der Lokalisierungslösung werden rohe Daten aus der Satellitennavigation und dem Bewegungssensor fusioniert. Dabei lässt

sich ein neuartiger graph-optimierungsbasierter Ansatz gegen eine Basislösung mittels eines Navigationsfilters evaluieren. Außerdem wird ein klassischer Algorithmus zur Integritätsprüfung implementiert, um Aussetzer der Satellitenmessungen zu erkennen und auszuschließen. Im zweiten Forschungsschwerpunkt wird ein echtzeitfähiger Ansatz zur Trajektorienplanung entwickelt, um die Fernsteuerung zu assistieren. Der Ansatz implementiert einen graphbasierten Planungsalgorithmus, welcher für die Binnenschifffahrt in schmalen Wasserkanälen und Fahrrinnen mit Berücksichtigung der statischen und dynamischen Kollisionsobjekte maßgeschneidert ist. Der entwickelte Planungsalgorithmus wird sowohl in einer Hardware-in-the-loop Simulation als auch mit dem realen Schiff erprobt. In diesem Kontext konzeptioniert und entwickelt die RWTH gemeinsam mit den Projektpartnern die notwendigen Hardware- und Datenschnittstellen. Zusätzlich erstellte RWTH ein plattformunabhängiges Visualisierungsboard (Dashboard). Dieses Dashboard lässt sich flexibel am Steuerstand oder an der Leitstelle in Betrieb nehmen und stellt die notwendige Bedienfunktion und Navigationsdaten zur Verfügung. Im Einzelnen lauten die Projektziele des Teilprojektes der RWTH laut Antrag wie folgt:

1. Anforderungsanalyse und Konzeptionierung der notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten für die Fernsteuerung.
2. Entwicklung und Erweiterung der Lokalisierungslösung zur hochgenauen und robusten Zustandsbestimmung.
3. Entwicklung einer modellbasierten Trajektorienprädiktion unter Berücksichtigung von Schiffsdynamik, Störgrößen und Zuverlässigkeitswerten für die Trajektorienplanung.
4. Algorithmenentwicklung zur online und interaktiven Trajektorienplanung mit Kollisionsvermeidung.
5. Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Darstellung der Navigationsinformation und Bedienung des ferngesteuerten Schiffs.
6. Validierung und Evaluierung der entwickelten Ansätze in den Felderprobungen.

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Während der Projektlaufzeit befand sich der Versuchsträger in einem Parallelbetrieb sowohl für das Transportgeschäft als auch für die Erprobungstests. Somit mussten insbesondere die geplanten experimentellen Integrationstests und Feldtests aufgrund von besonderen Rahmenbedingungen, die nicht unter Kontrolle des Projektkonsortiums standen, immer wieder verschoben werden. Dies ist insbesondere darin begründet, dass das Testschiff während des Projektablaufs aufgrund von unterschiedlichen Defekten und Schäden über längere Zeiten in der Werft repariert werden musste, wodurch eine Verzögerung nicht vermeidbar war. Eine weitere Herausforderung bestand in der über lange Zeit nicht zu klärenden rechtlichen Situation bezüglich des Testbetriebs auf dem Rhein und am Duisburger Hafen. Viele Methoden wurden zunächst in einem nicht für den Güterverkehr verwendbaren Nebenarm des Rheins erprobt. Eine vorläufige Erlaubnis, die Fernsteuerung des

Binnenschiffs im regulären Fahrgebiet einzusetzen, wurde erst kurz vor dem Auftritt auf der nationalen maritimen Konferenz (NMK2023) erteilt.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde für 36 Monate geplant. Aufgrund der unvermeidlichen Verzögerung wurde das Projekt um drei Monate kostenneutral verlängert. Der Arbeitsplan besteht aus zehn übergeordneten Arbeitspaketen: Projektmanagement (AP 1000, DST), Systemspezifikation (AP 2000, DST), Hardwareausrüstung (AP 3000, DST), Datenerfassung und -bereitstellung (AP 4000, BAW), Entwicklung auf der Landseite (AP 5000, UDE-IMECH), Entwicklung der Kommunikationsschnittstelle (AP6000, DST), Manöviermodell (AP7000, UDE-ISMT), Analysen zum Fahrverhalten (AP8000, BAW), Algorithmenentwicklung der assistierten Funktionen (AP9000, RWTH), Erprobung und Abschlussdemonstration (AP10000, DST).

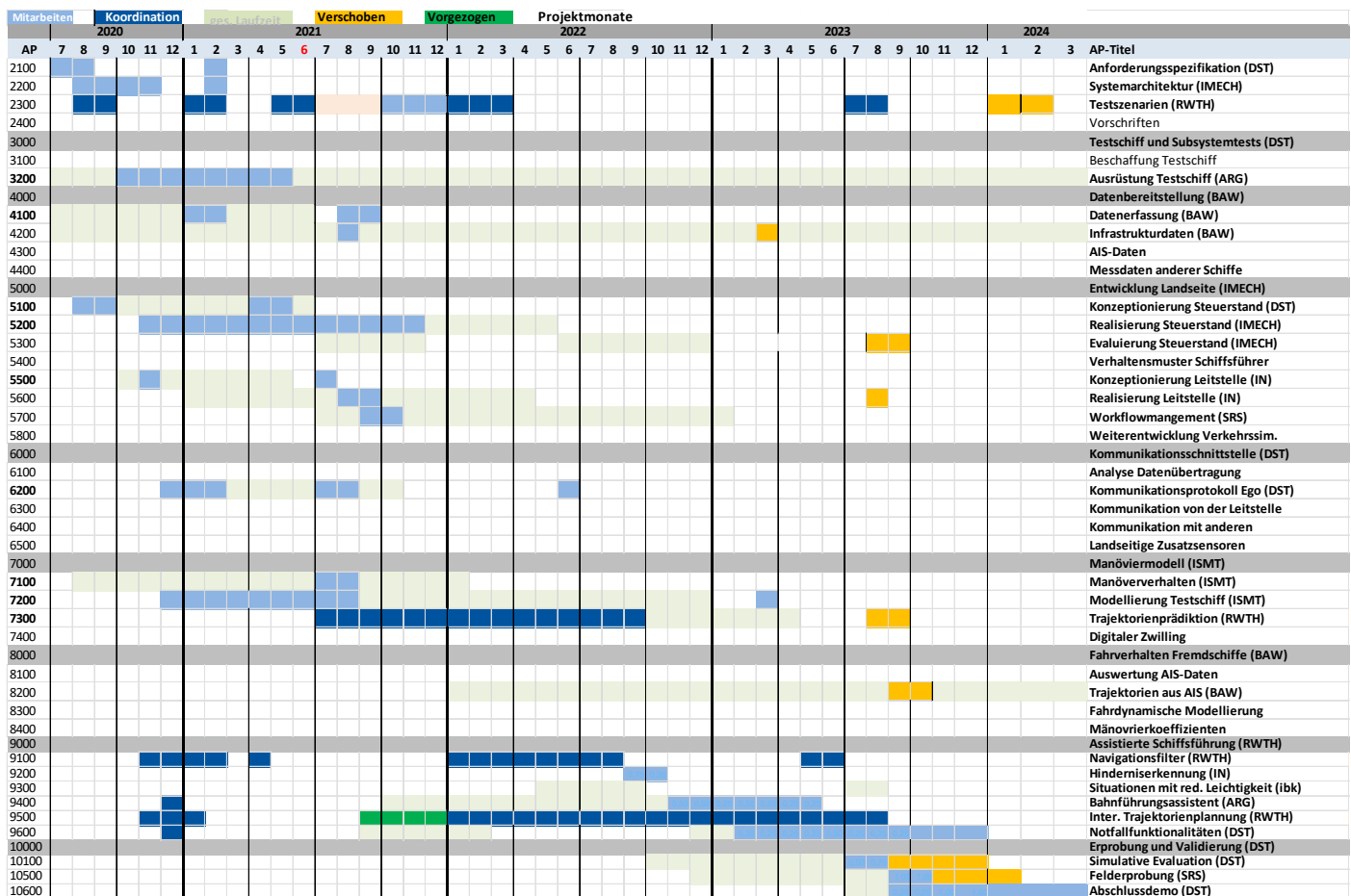


Abbildung 3: Individueller Arbeitsplan des RWTH-Teilvorhabens

Der individuelle Arbeitsplan des RWTH-Teilvorhabens nach dem Projektabschluss ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur Bereitstellung notwendiger Hardware- und Softwarekomponenten sowie Datenschnittstellen war die RWTH in den AP2000 - 8000 mit einem großen Anteil beteiligt. Dabei hat die RWTH mit den Projektpartnern gemeinsam ein Systemkonzept in AP2000 für die Schiffsnavigation und Trajektorienplanung ausgearbeitet. Nach dem Systemkonzept erfolgte die Hardwareausrüstung in AP3000, wo die notwendigen Sensoren und Rechenplattformen sowie Netzwerkkomponenten im Schiff eingebaut wurden. In AP4000, AP6000 und AP8000 wurden das Datenformat, die Datenschnittstellen und -übertragung im Konsortium festgelegt und implementiert. In AP5000 beschäftigte sich die RWTH mit der Entwicklung einer Benutzerschnittstelle auf der Landseite, die am Fernsteuerstand und der Leitstelle in Betrieb genommen wurde. Gemeinsam mit dem Partner UDE-ISMT wurde ein Schiffsmodell in AP7000 entwickelt. Weiterhin entwickelte die RWTH auf Basis des Schiffsmodells einen Ansatz zur modellbasierten Trajektorienprädiktion in AP7300. In AP9000 koordinierte die RWTH hauptverantwortlich die Arbeitspakete. Dabei wurde in AP9100 die Navigationslösung zur Fusion der Satellitenbeobachtungen und Daten aus dem Bewegungssensor implementiert. Parallel dazu wurde ein Bahnführungsassistent in AP9400 vom Projektpartner argonics bereitgestellt. Die RWTH implementierte die notwendige Schnittstelle zum Bahnführungsassistenten und erweiterte diesen mit einer interaktiven Echtzeittrajektorienplanung in AP9500. Um das gesamte Arbeitspaket AP9000 erfolgreich abzuschließen, hat die RWTH als Koordinator mehrere Workshops während der Projektlaufzeit mit allen Projektpartnern organisiert, um den Fortschritt der Projektpartner zu überwachen und Schnittstellen zwischen den Teilarbeitspaketen zu erarbeiten. Das entwickelte gesamte System zur Automatisierung und Fernsteuerung des Versuchsträgers wurde unter der Leitung von DST in AP10000 validiert und erprobt. Dazu kümmerte sich die RWTH um Tests der relevanten Automatisierungsfunktionen sowie um eine gesamte Testspezifikation aller notwendigen System- und Funktionstests im Konsortium (AP2300). Außerdem entstanden zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Präsentationen seitens der RWTH Aachen, die die erzielten Projektergebnisse auf internationaler Ebene darstellen. Weiterhin hat die RWTH an der Vorbereitung des Auftritts des Konsortiums auf der nationalen maritimen Konferenz 2023 (NMK) aktiv teilgenommen, um die notwendigen technischen Maßnahmen bereitzustellen und die Forschungsarbeit von Verbund und RWTH auf der NMK zu demonstrieren.

Aufgrund der in Abschnitt 1.2 genannten unvorhergesehenen und unbeeinflussbaren Herausforderungen wurde die Projektlaufzeit von 36 auf 39 Monate verlängert. Dabei hat die RWTH den Arbeitsplan situativ angepasst, indem mehrere Arbeitspakete, während der Stillstandzeiten des Versuchsträgers vorläufig bearbeitet wurden (siehe Abbildung 3 in grün).

#### **1.4 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Keine.

#### **1.5 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation**

Die zur Entwicklung genutzte Fachliteratur ist in Gänze in den Quellen der Veröffentlichungen [IRT1-7] zu finden. Für die in den einzelnen Domänen entwickelten Algorithmen wird der Stand der Technik im Detail ebenfalls in den Quellen [IRT1 -7] dargestellt. Dort wird auch erklärt, welche Beiträge zum Stand der Technik zur Erreichung der Projektziele erzielt wurden. Im Folgenden werden in Kürze die wichtigsten Projekte im gleichen Zeitraum zur Automatisierung der Binnenschifffahrt zusammengefasst.

##### **1.5.1 Hochgenaue und integrale Navigationslösung**

Eine hochgenaue Positionierung in einem globalen Koordinatensystem spielt eine unentbehrliche Rolle in der Binnenschifffahrt. Sie ist nicht nur für die Automatisierungsfunktionen essenziell, sondern auch zur Gewährleistung der Betriebssicherheit. In der Schifffahrt erfolgt die absolute Positionsbestimmung überwiegend mithilfe von satellitengestützten Funkortungsverfahren. Dabei findet das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) in Kombination mit einem lokalen Korrekturdatendienst, einen weitverbreiteten Einsatz in der Schifffahrt [8]. Allerdings verfügt die alleinstehende GNSS-Positionierung aufgrund der begrenzten Satellitensicht und Signalstörungen nicht über ausreichende Genauigkeit und Verlässlichkeit für die Automatisierungsfunktionen. Um eine hochgenaue und zuverlässige Navigationslösung für die hochautomatisierte Schifffahrt zu entwickeln, wird der Ansatz mit Multi-Sensor Fusion implementiert und geforscht [9]

Im Forschungsprojekt GALILEOnautic wurde ein maritimes Navigationssystem zur enggekoppelten Fusion von rohen Messdaten der Satellitensysteme GPS und Galileo und Daten einer inertialen Messeinheit (IMU) entwickelt, um eine vollständige Beobachtbarkeit aller Bewegungsrichtungen zu ermöglichen. Nebenbei wurde der Navigationsalgorithmus um die Nutzung von Geschwindigkeitsbeobachtungen aus einem Doppler-Velocity-Log erweitert. Ein ähnliches Konzept wurde im Folgeprojekt GALILEOnautic 2 weiterentwickelt, um das Navigationssystem um Integritätsprüfansätze zu erweitern. Somit können Fehler in den rohen GNSS-Daten identifiziert und von der Fusion ausgeschlossen werden.

Im Forschungsprojekt AKOON wurde eine ähnliche Navigationslösung vorgestellt. Hierzu wurde sowohl die enge Kopplung als auch die lose Kopplung der GNSS-Beobachtungen mit den IMU-Daten betrachtet und getestet. Aufgrund der Effizienz der Lösung wurde die lose Kopplung als eine Standard-Navigationslösung wahrgenommen.

Das Projekt Roboat beschäftigt sich seit 2016 mit der Entwicklung von kleinen automatisierten Fähren für städtische Gebiete. Das Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions (AMS Institute) plant zusammen mit seinen Forschungspartnern vom MIT, der Delft University of Technology und der Wageningen University and Research den Einsatz einer Flotte autonomer Boote für den Transport von Gütern und Personen sowie den Aufbau einer dynamischen schwimmenden Infrastruktur. Die halb so große Version namens Roboat II ist 2 m lang und kann bis zu zwei Passagiere befördern. Auf dem Schiff sind eine Kamera, ein Mehrschicht-Lidar-Sensor, ein GNSS-Empfänger mit einer Antenne und eine inertielle Messeinheit (IMU) montiert [10]. Eine robuste Navigationslösung basierend auf der Faktor-Graph-Optimierung zur Multi-Sensor-Fusion wurde vorgestellt, um die Signalabschaltung des GNSS in urbaner Umgebung zu eliminieren.

Auf Basis der vorherigen Entwicklungen folgt das Projekt FernBin der Zielsetzung: eine robuste und integrale Navigationslösung für langfristige Betriebsfahrt des Binnenschiffs vorzustellen. Hierzu werden neuartige Algorithmen zur Zustandsbestimmung und Integritätsprüfung entwickelt und mit klassischen Methoden verglichen.

### **1.5.2 Trajektorienplanung**

Die Forschung auf dem Gebiet der Trajektorienplanung in maritimen Anwendungen legt einen starken Fokus auf die Planung in unstrukturierter Umgebung mit größeren Freiräumen, die zur kollisionsfreien Fahrt zur Verfügung stehen. Die Trajektorienplanung auf dem Hochseebereich ist ein geeignetes Beispiel für die angestrebte Anwendung.

Das EU-Projekt MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks) zielte darauf ab, autonome Frachtschiffe zu entwickeln, die ohne Besatzung große Distanzen zurücklegen können [17]. Die Trajektorienplanung und Regelung spielten im Vorhaben eine der zentralen Rollen. Automatisierte Schiffsführungssysteme erlaubten es, Manöver wie Kursänderungen oder Geschwindigkeitsanpassungen, z. B. zwecks der Kollisionsvermeidung, autonom durchzuführen. Zudem wurde ein Fernüberwachungs- und Steuerungssystem entwickelt, um die Schiffe von einem Kontrollzentrum an Land aus zu überwachen und bei Bedarf einzugreifen. Das Projekt demonstrierte die technische Machbarkeit und wirtschaftliche Tragfähigkeit unbemannter Schifffahrt. Der Anwendungsfall beschränkte sich dabei auf das ununterbrochene Fahren im Hochseebereich, ohne das Navigieren im räumlich beschränkten Binnengewässer zu betrachten.

Ein ähnliches Ziel verfolgte auch das Projekt Finnish Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative (AAWA), welches im Jahr 2017 abgeschlossen wurde. Auch hier handelte es sich um eine Machbarkeitsstudie für das gemischt autonome und ferngesteuerte Fahren der Frachtschiffe in der Ostsee. Die Zielsetzung war dabei, Effizienz zu steigern, Betriebskosten zu reduzieren und Sicherheit zu erhöhen [18]. Der Fokus lag dabei neben der Lokalisierung mittels Sensorfusion auf den Regelungsalgorithmen zur autonomen Schiffssteuerung und

Kollisionsvermeidung. Auch robuste, zuverlässige Kommunikation zwischen dem teilautonomen Schiff und Landeszentrale war ein wichtiger Bestandteil der Forschung.

Das Projekt MTCAS zielte darauf ab, die Kollisionserkennung von Seeschiffen weitgehend zu automatisieren und Vorschläge zur Kollisionsvermeidung zu bieten. Es wurden Algorithmen entwickelt, die sowohl auf Schiffen als auch für die Überwachung durch VTS-Dienste (Vessel Traffic Services) an Land eingesetzt werden konnten. Ein zentrales Element des Projekts war die Entwicklung eines Assistenzsystems, welches zur Kollisionsvermeidung unter Einhaltung der internationalen und nationalen Verkehrsregeln eingesetzt wird [19]. Dafür wurden unter anderem die Informationen, insbesondere in Bezug auf die geplanten Schiffsrouten, verwendet, die zwischen den Schiffen ausgetauscht werden. Insbesondere wurden Lösungen für Manöver im letzten Moment betrachtet, die Planung und Umsetzung von Ausweichmanövern mittels Fast-Time-Simulation (FTS) und die Berücksichtigung der Eigenschaften des potenziellen Kollisionsgebietes. Laut der Zielsetzung musste das Assistenzsystem den Schiffsführer passiv in Form von Alarms unterstützen und die geeigneten Ausweichmanöver anbieten. Das aktive Eingreifen in die Systemsteuerung wurde nicht erforscht.

Das Projekt SciPPPer (Schleusenassistenzsystem basierend auf PPP und VDES für die Binnenschifffahrt) entwickelte ein innovatives Assistenzsystem zur Optimierung der Schleusung von Binnenschiffen. Es nutzte präzise Positionierungsdaten (PPP - Precise Point Positioning) und VDES (VHF Data Exchange System) zur Verbesserung der Navigation und Kommunikation während des Schleusenvorgangs. Ziel war es, die Effizienz und Sicherheit beim Passieren von Schleusen zu erhöhen. Durch die Integration dieser Technologien wurden Echtzeitdaten bereitgestellt, die den Schiffsführern bei der Navigation und dem Manövrieren in Schleusen unterstützen.

Übertragen auf das vorliegende Projektvorhaben birgt eine solche Betrachtungsweise ein Gefahrenpotenzial, insbesondere in Bezug auf die Kollisionsvermeidung. Das liegt daran, dass die Ausweichmanöver, die in unstrukturierten, weiträumigen Umgebungen gute Erfolgsaussichten haben, in einer engen Fahrinne scheitern können. Um dieser Gefahr vorzubeugen, untersuchen wir die Methoden, die sparsam mit dem Planungsraum umgehen und im hohen Maße die Schiffsdynamik beachten. Insofern folgt das Projekt FernBin in Bezug auf Trajektorienplanung der Zielsetzung: ein robustes Assistenzsystem zur Echtzeit-Trajektorienplanung für die Binnenschiffe, welches in der Lage ist sichere, kollisionsfreie und dynamisch realisierbare Trajektorien zu generieren. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist dabei durch den Anwendungsfall im beschränkten Gewässer gegeben.

## **1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Für die hochgenaue Navigationslösung mit dem RTK-GNSS in unterschiedlichen Bundesländern wurden vom Satellitenpositionierungsdienst SAPOS jeweiligen Bundeslandes (NRW, Hessen, BW,

Bayern und Niedersachsen) sowie der technischen Hochschule Delft<sup>1</sup> die RTK-Korrekturdaten angefragt. Die SAPOS-Dienststellen haben den Stream-Service der Daten für das Forschungsprojekt kostenfrei angeboten.

Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) stand in direktem Austausch mit dem Projektkonsortium. Insbesondere wurde die Erteilung einer Genehmigung für den Testbetrieb eines ferngesteuerten Binnenschiffes in der öffentlichen Wasserstraße im Rahmen dieser Zusammenarbeit erzielt.

---

<sup>1</sup> <https://gnss1.tudelft.nl/dpga/>

## 2 Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens

### 2.1 Ergebnisse des Forschungsvorhabens mit Gegenüberstellung der Ziele

Im Rahmen des Projektes FernBin wurde das Binnenschiff „Ernst Kramer“ automatisiert. Nach dem Forschungsvorhaben setzten sich die Schlüsselergebnisse aus drei Kategorien zusammen: a) Neuartige Algorithmen zur hochgenauen und robusten Sensorfusion und Schiffslokalisierung; b) Neuartige Algorithmen zur online und interaktiven Trajektorienplanung in engen Wasserkanälen und Fahrrinnen und c) plattformunabhängige Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Datenvisualisierung und Interaktion zwischen dem Schiffsführer und des automatisierten Binnenschiffs in einem Fernsteuerzentrum.

Die Realisierung der Fernsteuerung mithilfe eines hoch automatisierten Binnenschiffs erfordert die Integration verschiedener Systemkomponenten und Module. Eine Schiffsmodernisierung mit neuartigen Sensoren und Rechenplattformen, robuste Datenübertragung, zuverlässige Navigationslösung und sichere Trajektorienplanung sowie eine effektive Regelung zählen zu den grundlegenden Elementen der Automatisierungsfunktionen am Testschiff. Auf der Landseite wird das Fernsteuerungszentrum in Form eines Steuerstands und einer Leitstelle aufgebaut und erweitert. Der Steuerstand übernimmt sowohl die Überwachung und Kommunikation als auch die Koordinierung und Steuerung mit dem ferngesteuerten Schiff. Im Gegensatz dazu werden die Datenvisualisierung und Situationserkennung auf Basis einer mikroskopischen Verkehrssimulation an der Leitstelle in Betrieb genommen. Zwischen dem Testschiff und Fernsteuerungszentrum befindet sich ein Kommunikationsknotenpunkt mit redundantem Internetzugriff, auf dem ein Datenserver zum Datenaustausch aufgesetzt wird.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die relevanten Module, aus denen sich das FernBin-System zusammensetzt, welcher Projektpartner diese entwickelt hat und wie sie im System miteinander wechselwirken.

Im Folgenden werden die wichtigen Bestandteile sowie Funktionalitäten der von der RWTH entwickelten Systemkomponenten beschrieben. Strukturell ist die Beschreibung dabei **nach der funktionalen Reihenfolge der Arbeitsinhalte** aufgeteilt, in denen die einzelnen Module entwickelt bzw. Meilensteine erarbeitet wurden. Dazu wird die Durchführung der assoziierten (Teil-)Arbeitspakete in jedem Abschnitt vorgestellt.

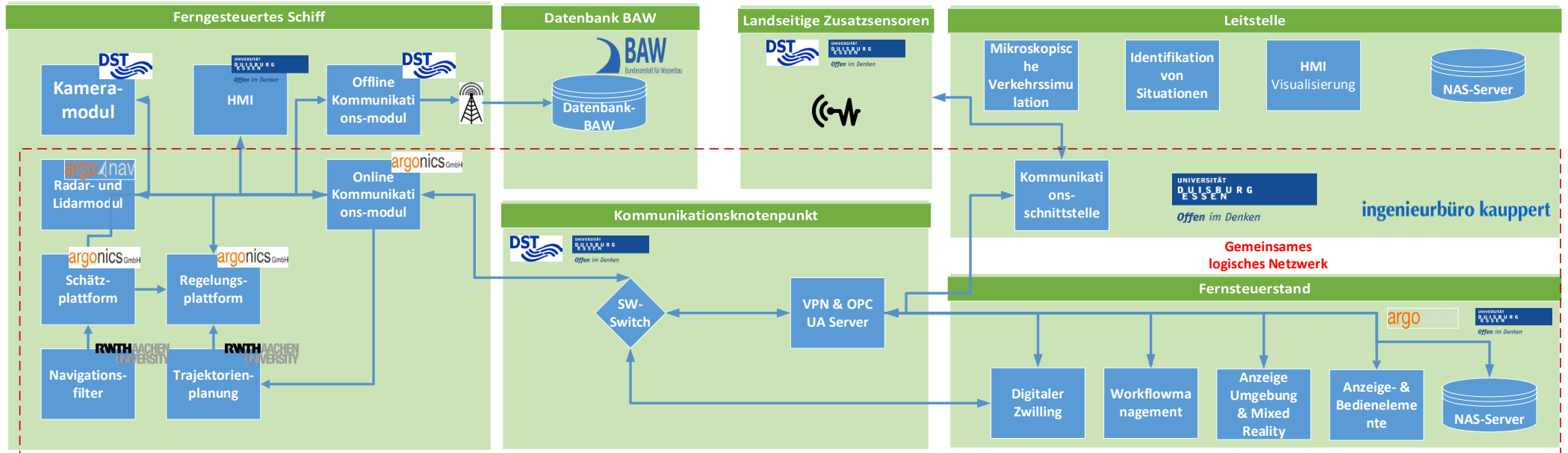


Abbildung 3: FernBin – Systemübersicht (© IMECH)

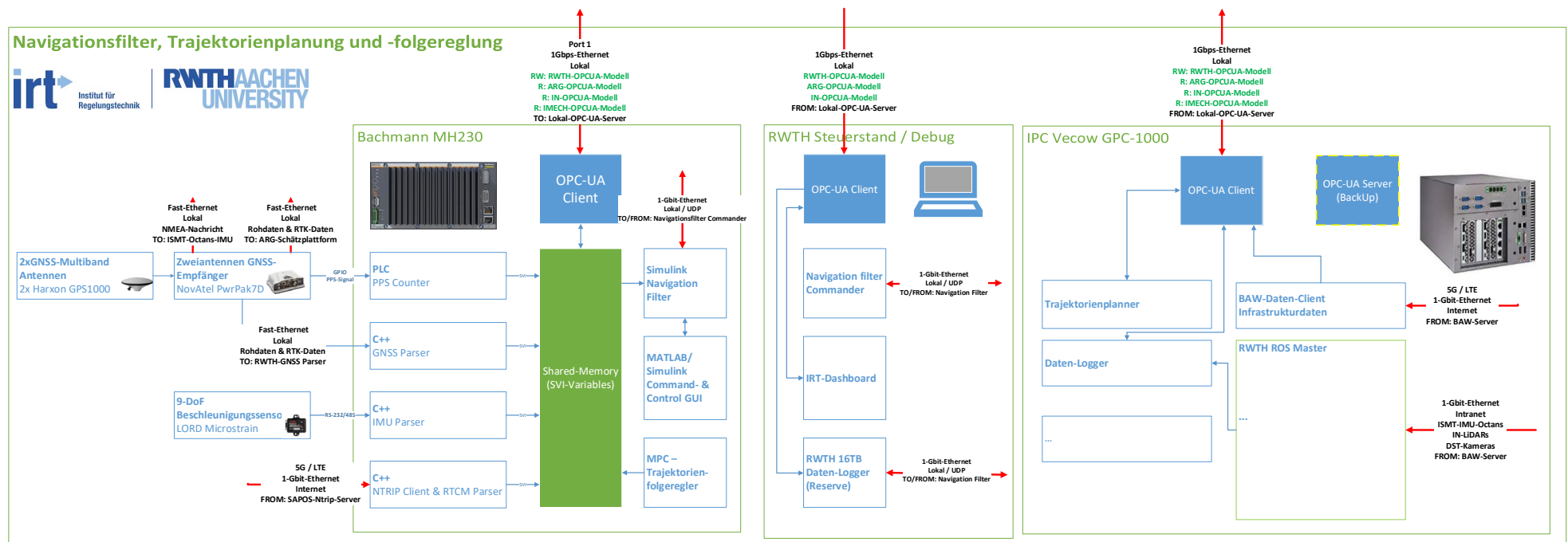


Abbildung 4: Genetisches Systemkonzept - RWTH

### 2.1.1 Anforderungsanalyse, Systemkonzept und Tests (AP2000)

Koordiniert vom Projektpartner DST wurden in der Anfangsphase des Projektes die technischen Anforderungen (siehe Bericht DST) festgelegt. Als Ergebnis ergibt sich ein gemeinsames Systemkonzept und die Definition der notwendigen Systemtests.

Abbildung 4 zeigt den Überblick des Teil-Systemkonzepts seitens der RWTH, welches aus allen zu implementierenden Hardware- und Softwarekomponenten sowie Datenschnittstellen zusammengesetzt ist. Zur Realisierung der hochgenauen Schiffslokalisierung wurden die passenden Sensorkomponenten und eine Echtzeit-Rechenplattform nach den technischen Anforderungen festgelegt. Dabei kam ein Dual-Antennen-GNSS-Empfänger mit einer Inertiale-Messeinheit zum Einsatz. Die notwendigen Software-Schnittstellen und Algorithmen zum Bearbeiten der Sensordaten werden am Echtzeit-Rechner „Bachmann“ implementiert, welcher den berechneten Schiffszustand über das lokale Netzwerk zu nachgelagerten Automatisierungsfunktionen übermittelt. Für die rechenintensiven Algorithmen der Trajektorienplanung und -folgeregulung wurde in Parallel ein industrieller PC (IPC) eingesetzt. Zwischen der Hauptentwicklung befindet sich eine RWTH-Kontrollstelle während der Entwicklung und Tests, um die Testdaten aufzunehmen und Softwareprobleme zu beheben. Ein OPC-UA-Server wurde als zentraler Datenserver sowohl im Testschiff auch als an der Landseite zum Datenaustausch durch den Projektpartner aufgesetzt. Die RWTH implementiert zum Datenserver die notwendigen Datenclients an jeder Entwicklungsstelle, um eine robuste Datenübertragung zu gewährleisten.

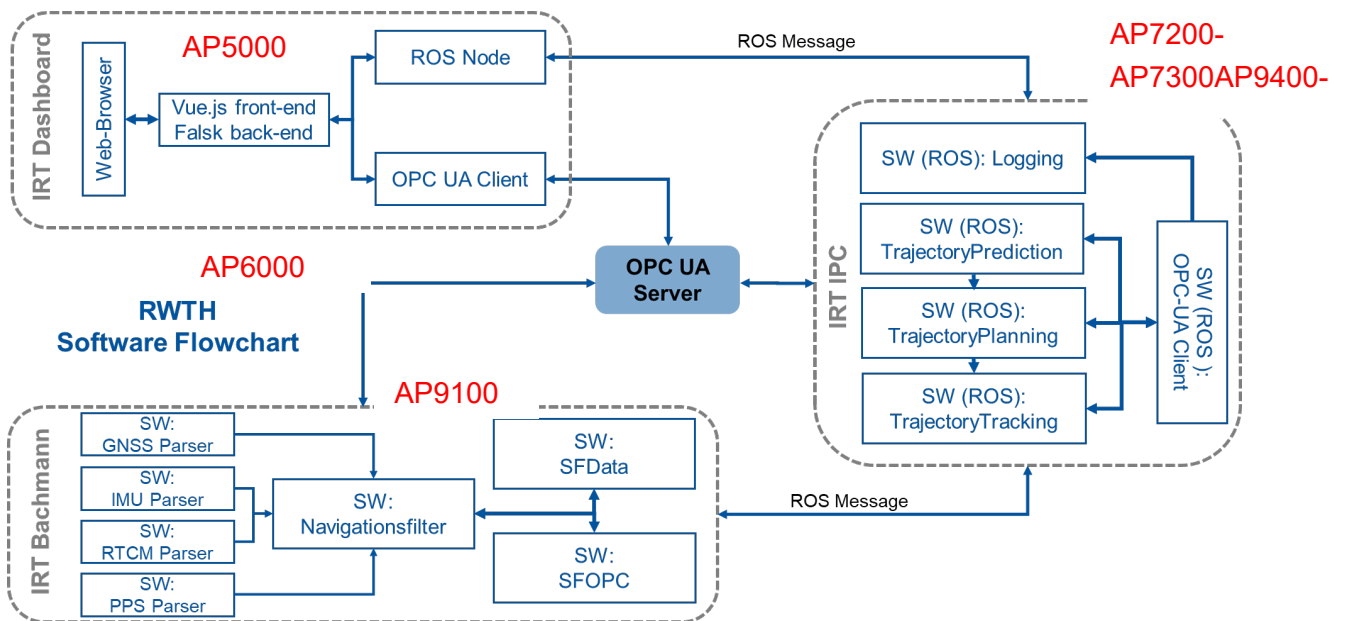


Abbildung 5: Software-Flussdiagramm der RWTH


Eine detaillierte Softwareimplementierung nach dem Systemkonzept in Abbildung 4 ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Navigationslösung im AP9100 besteht aus mehreren Softwarekomponenten (SW), um die vorverarbeitete Sensordaten zur Fusion im Navigationsfilter bereitzustellen. Zwei separate Software-Module (SFData und SFOPC) sammeln die verfügbaren Daten ein und wandeln diese in das passende Datenformat für weitere Softwarekomponenten um. Die Hauptkomponenten, Trajektorienprädiktion, Trajektorienplanung und Trajektorienfolgeregelung, für die automatisierte Schiffsführung aus dem Arbeitspaket AP7000 und AP9000 wurden am IPC implementiert. Ein lokaler OPC-UA-Server, der im AP6000 implementiert ist, stellt die Navigationsdaten für das IRT-Dashboard für Bedienung und Visualisierung am Steuerzentrum zur Verfügung. Das Dashboard basiert auf einer Webentwicklung und lässt sich somit auf unterschiedlichen Plattformen (z.B., Rechner und Tablets) aufrufen.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Die Arbeitspakete AP2100 und AP2200 wurden in der Anfangsphase des Projektes in 06/2021 abgeschlossen. In der Implementierungsphase wurden die beiden Arbeitspakete nach technischem Bedarf aktualisiert. Das Arbeitspaket AP2300 wurde aufgrund der Verzögerung der Testdurchführung in 02/2024 abgeschlossen.

### 2.1.2 Hardwareausrüstung, Kalibrierung und Inbetriebnahme (AP3200)

Eine Hardwareausrüstung am Versuchsträger wurde gemeinsam mit den Projektpartnern zur Realisierung der assistierten Fernsteuerung durchgeführt. Die RWTH hat dazu unterschiedliche Sensoren und Rechenhardware sowie Netzwerkkomponente am Testschiff montiert und in Betrieb genommen.

**Tabelle 1: Übersicht der montierten Hardware**

Pos.	Hardware	Anzahl	Beschreibung und Einsatzgebiet	Positionierung am Versuchsträger
1	GNSS / GPS-Antennen 	2	Die ausgewählten GNSS-Antennen empfangen die GPS- und Galileo-Signale, die durch einen GNSS-Empfänger zu Rohdaten für das Navigationsfilter verarbeitet werden können. Es wurden zwei gleichartige Antennen zur Realisierung eines Dual-Antennensystems beschafft, um das Navigationsfilter bei der Orientierungsschätzung zu unterstützen.	Im oberen Bugbereich des Versuchsträgers auf einem dafür vorgesehenen Sensorhalter
2	Dual-Antennen-GNSS-Empfänger	1	Zusammen mit den oben genannten GNSS-Antennen stellt der Dual-Antennen-GNSS-Empfänger die Satellitennachrichten und eine	Im Technikschränk des Bugstrahlraums

			(ungenau) Positionsbestimmung sowie andere relevante Daten für das Navigationsfilter zur Verfügung.	
3	<p>9 DoF-MEMS-IMU</p> 	1	Die inertielle Messeinheit (Inertial Measurement Unit – IMU) erfasst mittels eines Gyroskops und Beschleunigungssensoren die relative Bewegung des Schiffs, die als Teil des Navigationsfilters verarbeitet werden.	Im oberen Bugbereich des Versuchsträgers auf einem dafür vorgesehenen Sensorhalter
4	<p>Echtzeit-Rechner Bachmann</p> 	1	Auf diesem System werden das Navigationsfilter und die Schiffsregelung realisiert. Das Echtzeitsteuerungssystem ermöglicht eine sichere Ausführung der Software durch deterministische Echtzeit und Datenausgabe. Zudem steht bei diesem System eine effiziente Entwicklungsumgebung zur Verfügung, um die softwaretechnischen Funktionalitäten zu validieren.	Im Technischrank des Bugstrahlraums
5	<p>High-End-Industrierechner</p> 	1	Mithilfe dieses High End Industrierechners werden Algorithmen, die eine große Rechenleistung benötigen, entwickelt und ausgeführt. Dazu zählen insbesondere die Trajektorienplanung und nichtlineare Optimierungen. Der Rechner dient zudem zur Datenerhebung während Messfahrten.	Im Technischrank des Bugstrahlraums
6	<p>Industrie-LTE-Mobilfunkrouter</p> 	1	Ein industrieller LTE-Mobilfunkrouter mit zwei redundanten SIM-Karten wurde eingesetzt, um die Korrekturdaten von einem zentralen Navigationsdienst zu empfangen. Dadurch können signifikante Verbesserung der Navigationslösung im Navigationsfilter erreicht werden. Zusätzlich steht dieser Router im Konsortium für die kabellose Kommunikation zwischen dem Schiff und der Landeseite zur Verfügung.	Im Technischrank des Bugstrahlraums
7	<p>Industrie-5G-Mobilfunkrouter</p> 	1	Um eine Redundanz der Datenübertragung zwischen dem Testschiff und Steuerzentrum zum robusten Datenaustausch zu realisieren, wurde ein industrieller 5G-Mobilfunkrouter im Maschinenraum am Heckbereich eingesetzt.	Im Technischrank im Maschinenraum

**Hardwareausrüstung:** Tabelle 1 stellt eine Übersicht der im Projekt ausgewählten Hardware dar, die nach dem Systemkonzept zur Maximierung der Flexibilität und Wahrnehmungsqualität am Versuchsträger verteilt im Bugbereich und Heckbereich ausgerüstet wurden, siehe Abbildung 6. Ein Leitungsplan für die Datenübertragung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern festgestellt. Dazu wurden eine Glasfaserleitung für das lokale Netzwerk und eine Koaxialleitung zwischen der Zweit-GNSS-Antenne im Heckbereich und dem GNSS-Empfänger im Bugbereich angelegt. Des Weiteren befinden sich alle anderen Sensoren (die Haupt-GNSS-Antenne und die inertielle Messeinheit) der RWTH im Bugbereich. Für die Mobilfunkrouter wurden Antennen mit passender Leitung sowohl im Bugbereich als auch im Heckbereich montiert. Abbildung 7 zeigt die Sensorausrüstung der RWTH. Das montierte Dual-Antennen-GNSS-System ermöglicht eine robuste Sensorauslegung, indem die zwei Antennen mit einem großen Hebelarm (ca. 93m) jeweils vorne und hinten am Versuchsträger montiert sind. Diese Antennenauslegung stellt eine redundante Architektur dar, um die Satellitensichtbarkeit zu erhöhen, wenn eine Antenne aufgrund der Brückendurchfahrt blockiert ist.

Im Gegensatz zu den Sensoren wurden die Rechenhardware und Netzwerkkomponenten in den Räumlichkeiten des Versuchsträgers montiert, siehe Abbildung 8. Die gesamte Konnektivität wurde mittels eines gemeinsamen Netzwerks vom Projektpartner argonics gestaltet, sodass eine direkte und latenzfreie Datenübertragung zwischen der verteilten RWTH-Hardware möglich ist.

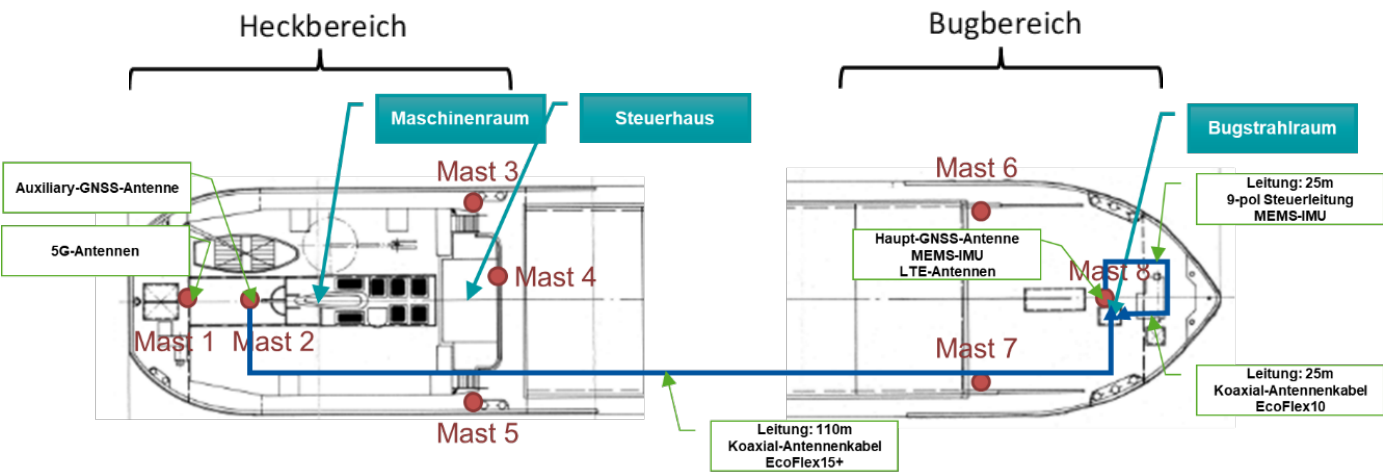


Abbildung 6: Draufsicht des Versuchsträgers mit Leitungsplan

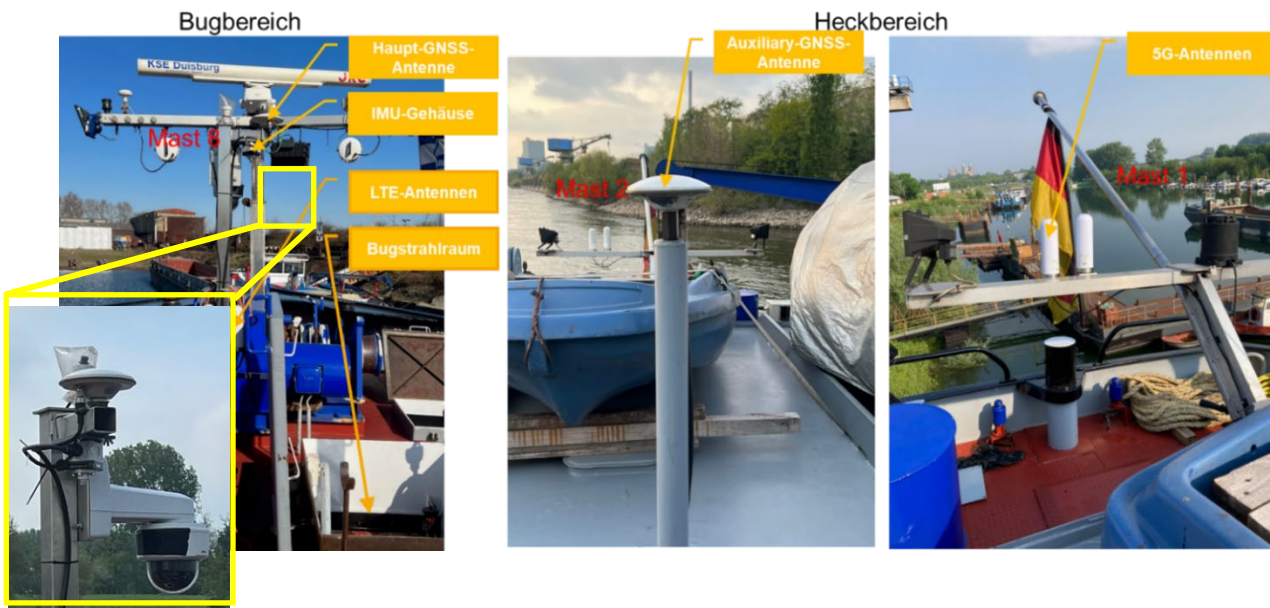


Abbildung 7: Sensorausrüstung

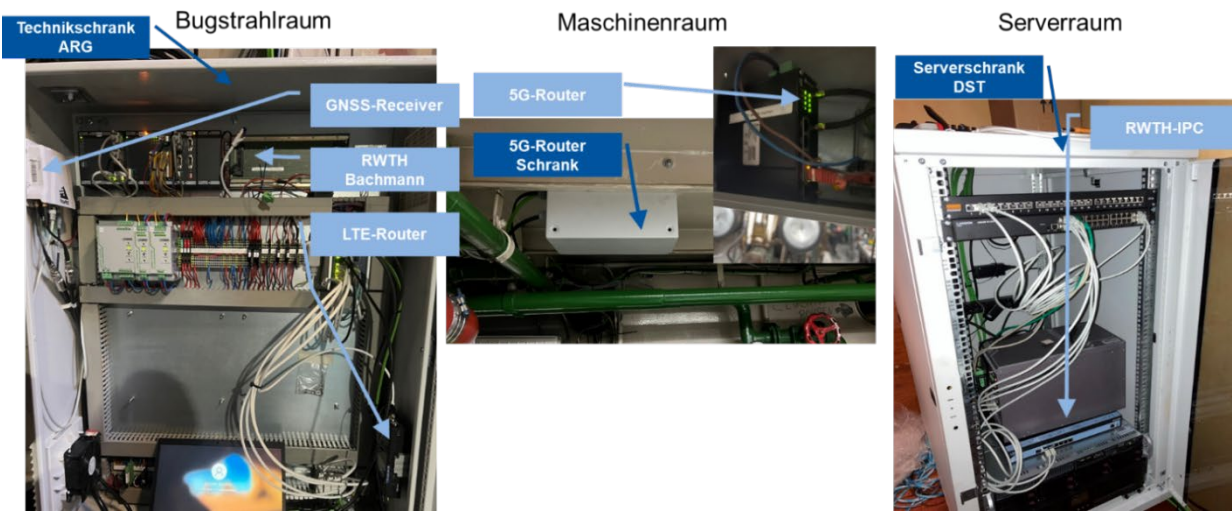


Abbildung 8: Ausrüstung der Rechenhardware und Netzwerkkomponenten

- Statische Transformationen zwischen:
- RWTH-IMU < > GNSS-Antenne-Phasenzentrum
  - RWTH-IMU < > ArgoNavLiDARs
  - RWTH-IMU < > ISTM-IMU (Octans)

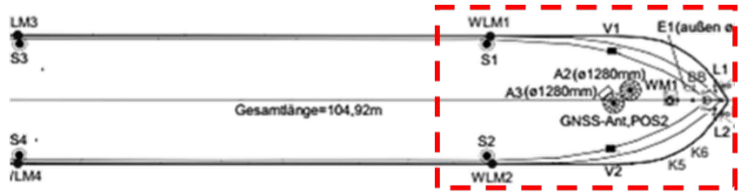


Abbildung 9: Fehlende Sensoren bei der extrinsichen Kalibrierung (markiert in rot)



Abbildung 10: Extrinsiche Sensorkalibrierung mit der RWTH-Totalstation

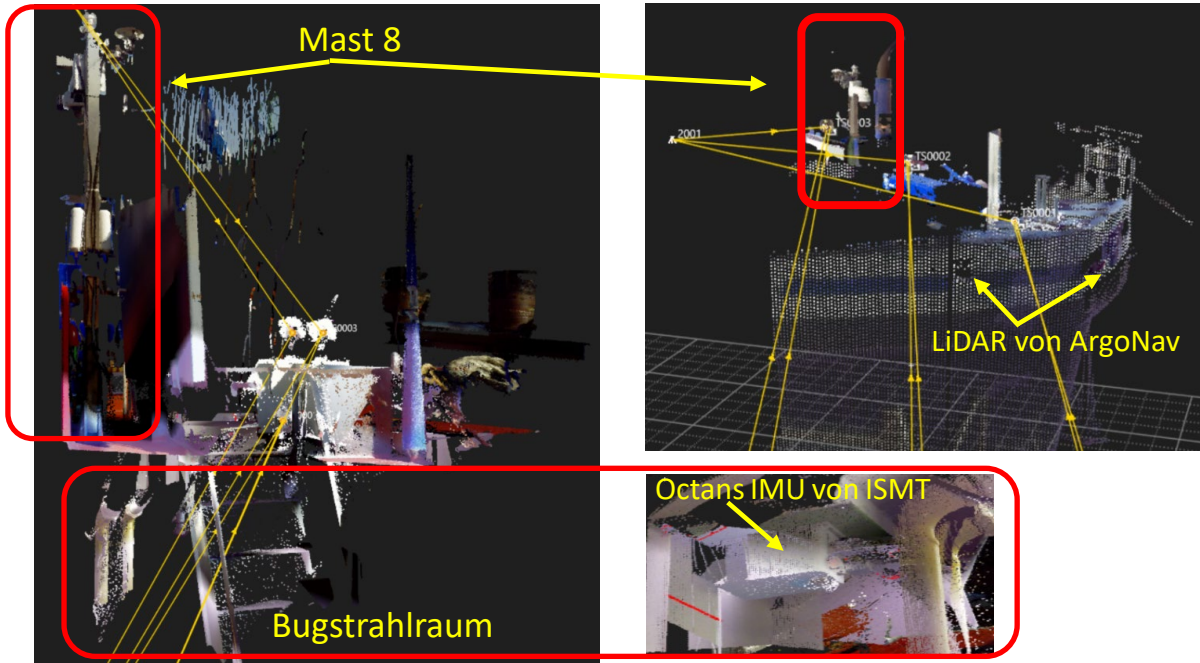


Abbildung 11: Vermessene Punktwolke zur Bestimmung der statischen Koordinatentransformationen der Sensoren

**Hardwarekalibrierung:** Um die extrinsischen Transformationen aller Sensoren der RWTH und der Projektpartner in einem lokalen Koordinatensystem zu bestimmen, wurde eine Vermessungsfirma nach der Hardwareausrüstung beauftragt. Allerdings kann diese Vermessung nicht die Transformationen aller Sensoren (z.B., zum Referenzsensor Octans) abdecken (siehe Abbildung 9). Zur Ergänzung der fehlenden extrinsischen Sensorparameter hat die RWTH mit der Totalstation eine Vermessung durchgeführt, siehe Abbildung 9. Mit Hilfe der vermessenen Punktwolke der Sensorausrüstung (Abbildung 11) lassen sich die unbekanntenen Transformationen bestimmen.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** In einem geplanten Werftaufenthalt wurde die Sensorausrüstung in 09/2021 durchgeführt. Das Arbeitspaket AP3200 wurde in 11/2021 nach Nachrüstung der fehlenden Teile abgeschlossen.

**Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable**

1. Dokument: Hardwarekonzept
2. Dokument: ergänzte Sensorkoordinaten
3. Softwaremodule: IMU-Parser
4. Softwaremodule: GNSS-Parser
5. Softwaremodule: RTCM-Parser
6. Softwaremodule: PPS-Parser

**vollständig erbracht.**

### **2.1.3 Daten und Datenübertragung (AP4000, AP6000, AP8000)**

Die Realisierung der Automatisierungsfunktionen erfordert ein einheitliches Datenprotokoll und eine latenzfreie Datenübertragung. Außerdem sind die Datenerfassung und -aufnahme während der Algorithmenentwicklung unverzichtbar. Nach der Hardwareausrüstung wurden die Datenprotokolle und -übertragung sowie die notwendigen Datenschnittstellen im Projekt in AP4000 und AP6000 konzeptioniert und implementiert. Außerdem hat die RWTH die notwendigen Datenschnittstellen implementiert, um die Infrastrukturdaten (AP4200) und die vorhergesagten Verkehrsdaten (AP8100) vom Projektpartner BAW zuzugreifen.

**Datenprotokoll:** Zur Übertragung der partnerübergreifenden Daten wurde der plattformunabhängige Datenaustauschstandard OPC-UA im Projekt benutzt. Der OPC-UA definiert ein spezifisches Datenprotokoll (OPC-UA-Datenmodell) mit einer Baustruktur. Abbildung 12 zeigt

Node Name	URI	Namespace
RWTH	4:4:RWTH	ns=4;i=40000
NavFilter	4:4:NavFilter	ns=4;i=40007
AdditionalInfo	4:4:AdditionalInfo	ns=4;i=40016
Attitude	4:4:Attitude	ns=4;i=40017
Command	4:4:Command	ns=4;i=5000
Evaluation	4:4:Evaluation	ns=4;i=5005
GeneralPose	4:4:GeneralPose	ns=4;i=40018
GeneralVelocity	4:4:GeneralVelocity	ns=4;i=40019
Status	4:4:Status	ns=4;i=40020
WGS84Position	4:4:WGS84Position	ns=4;i=40015
EKCentre	4:4:EKCentre	ns=4;i=5003
EKGNSSAnt1	4:4:EKGNSSAnt1	ns=4;i=5004
EKOctans	4:4:EKOctans	ns=4;i=5008
EKZeropoint	4:4:EKZeropoint	ns=4;i=5002
IMUCentre	4:4:IMUCentre	ns=4;i=5001
ObstaclePrediction	4:4:ObstaclePrediction	ns=4;i=40013
Sensors	4:4:Sensors	ns=4;i=40001
TrajectoryPlanning	4:4:TrajectoryPlanning	ns=4;i=40011
TrajectoryPrediction	4:4:TrajectoryPredicti...	ns=4;i=41000
TrajectoryTracking	4:4:TrajectoryTracking	ns=4;i=40012

Abbildung 12: Ein Beispiel des RWTH-Datenmodells am OPC-UA-Server

eine Übersicht der Baumstruktur des RWTH-Datenmodells, die mit Hilfe einer kostenfreien Toolbox „Siemens OPC-UA Model Editor (SiOME)<sup>2</sup>“ generiert wurde.

Die RWTH stellt sowohl die rohen Sensordaten als auch die verarbeiteten Daten, die in unterschiedlichen Kategorien zugeordnet sind, für die Projektpartner zur Verfügung. Bei der Navigationslösung werden die geschätzten Schiffszustände in unterschiedliche Referenzpunkten des Testschiffs transformiert und zum Server übermittelt. Außerdem besteht es die Möglichkeit, die Navigationslösung mittels des OPC-UA-Servers in Echtzeit zu konfigurieren und dessen Status zu ermitteln. Alle notwendigen Daten zur Bahnführung lassen sich in den Kategorien „TrajectoryPrediction“, „TrajectoryPlanning“, und „TrajectoryTracking“ ablesen. Dazu werden auch die interpretierten Kollisionsobjekte mittels der Kollisionserkennung vom Projektpartner unter „ObstaclePrediction“ bereitgestellt.

**Datenübertragung:** Zur Übertragung der RWTH-Daten, die in unterschiedlichen Rechenplattformen generiert sind, hat der Projektpartner DST einen zentralen OPC-UA-Server am Testschiff aufgesetzt. Die RWTH implementiert die OPC-UA-Clients aus diversen Entwicklungsumgebungen, um die RWTH-Daten zum Datenserver in Echtzeit zu schreiben und die Daten der Projektpartner nach Bedarf zurückzuholen. Mithilfe des OPC-UA-Servers ist eine direkte Datenkommunikation zwischen dem Testschiff und dem Fernsteuerzentrum via einen Internetzugriff möglich. Allerdings ist die Datenübertragung mit einer geringen Latenzzeit zu rechnen.

<sup>2</sup> [https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755133/siemens-opc-ua-modeling-editor-\(siome\)?dti=0&lc=en-DE](https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755133/siemens-opc-ua-modeling-editor-(siome)?dti=0&lc=en-DE)

**Infrastrukturdaten:** Die Trajektorienplanung mit Kollisionsvermeidung erfordert umfangreiche Infrastrukturdaten (AP4100) und Verkehrsdaten (AP8200) der Wasserstraße. Der Projektpartner BAW ist zur Bereitstellung dieser Daten zuständig. Die RWTH implementiert die notwendigen Datenschnittstellen zum Projektpartner, um die Daten online abzurufen und zu verarbeiten. Dafür hat der Projektpartner BAW den INSEL-Datenserver<sup>3</sup> aufgebaut, welcher die verfügbaren Daten mittels einer authentifizierten Programmierungsschnittstelle bereitstellt. Abbildung 13 stellt alle Daten am BAW-Server im Projekt dar.



Abbildung 13: Verfügbare Infrastruktur- und Verkehrsdaten am BAW-Server (Zugriff am 29.07.24)

Außerdem wurden auch die Softwareschnittstellen zu den Kartendaten (ENC-Karte) und dem automatischen Identifikationssystem (AIS) Daten seitens der RWTH implementiert.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Während des Projektablaufs wurden mehrere Workshops zum Datenmodell und zur Datenübertragung durchgeführt. Gemeinsam mit dem Projektpartner hat die RWTH das Datenmodell definiert. Somit konnte das Arbeitspaket AP4100 und AP6200 ohne massive Verzögerung jeweils in 11/2021 und 12/2021 abgeschlossen werden. Aufgrund der Verzögerung bei der Bereitstellung der prädizierten Trajektorien von Fremdschiffen wurde eine alternative Lösung im AP8200 und AP9500 angestoßen.

### **Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable**

1. Datei: OPC-UA Datenmodell
2. Softwaremodule: OPC-UA-Client
3. Softwaremodule: RWTH-Datenprotokoll basiert auf Flatbuffer
4. Softwaremodule: ENC-Parser
5. Softwaremodule: Online-AIS-Empfänger

---

<sup>3</sup> <https://inse1.baw.de/>

## 6. Softwaremodule: Online-Infrastrukturdata-Parser

**vollständig erbracht.**

### 2.1.4 Entwicklung der Navigationslösung (AP9100)

Die Zustandsbestimmung des aktuellen Schiffszustands (Position, Lage, Geschwindigkeit und Drehraten) wird als eine unverzichtbare Grundlage bei der Schiffsführung eingestuft. Für das Binnenschiff, welches in der Regel eine große Bauform darstellt, ist eine Positionierungsgenauigkeit in Zentimeterbereich und ein Orientierungsfehler unterhalb eines Grads in engen Bereichen (z. B., Hafengebiete) erforderlich, um die automatischen Anlegevorgänge zu ermöglichen. Zustandsdaten dieser Präzision sind meist nur durch die Nutzung einer Kombination von Sensorbeobachtungen im Rahmen eines Fusionsalgorithmus bestimmbar. Häufig wird eine Kombination von GNSS-Daten und Inertialsensordaten (IMU) verwendet, was eine geschickte Ausnutzung der Vorteile der Einzelsensoren erlaubt. Im Projekt wurde die Navigationslösung auf Basis der Sensorfusion mit einem Dual-Antennen-GNSS-Empfänger und einer kommerziellen Inertialmesseinheit (IMU) entwickelt. Als inertielle Messeinheit wird eine 9-DOF-MEMS-IMU des Modells LORD Microstrain 3DM-GX5-25 verwendet, welche mit der Industriesteuerung via RS-232 kommuniziert. Diese liefert Beschleunigungen in drei Raumrichtungen, die Orientierung in drei Raumrichtungen und als GNSS-Empfänger wird ein Novatel PwrPak 7D mit zwei GPS1000-Antennen der Marke Harxon verwendet, welche im Abstand von 4 m auf dem Dach des Steuerhauses montiert sind. Der Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Durch die zwei Antennen stellt der Novatel einen GNSS-Kompass zur Verfügung. Die GNSS-Korrekturdaten aus dem Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS) der unterschiedlichen Bundesländer wurden zum Pre-Processing der GNSS-Beobachtungen online abgerufen. Da eine hochgenaue Zeitreferenz der unterschiedlichen Hardware nicht vorhanden ist, wurde das 1-Pulse-per-Second (1PPS) Signal vom GNSS-Empfänger benutzt, um die Sensordaten zu synchronisieren. Abbildung 13 stellt eine grobe Hardwarestruktur der Navigationslösung dar.

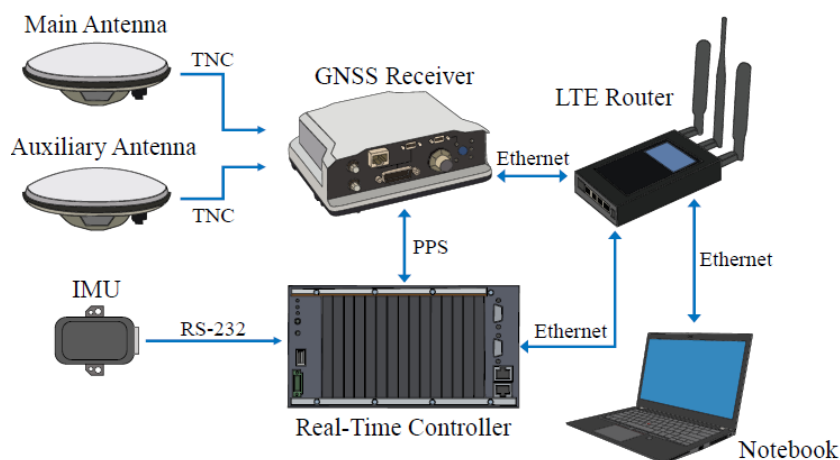


Abbildung 14: Sensor und Rechenhardware in RWTH-Navigationslösung [11]

Im Projekt FernBin setzt sich die Navigationslösung generisch aus drei Teilen: Daten-Pre-Processing, Integritätsprüfung, und Navigationsalgorithmus, siehe Abbildung 15. In dem Pre-Processing Modul werden die rohen Sensordaten transformiert und vorgefiltert. Außerdem werden die notwendigen Zwischengrößen (z. B., Satellitenposition) für die Navigationsalgorithmen berechnet. Anschließend folgt eine Integritätsprüfung, wo die Qualität der einzelnen Satelliten-Beobachtung mithilfe einer klassischen Redundanz-basierten Methode [12] und einer neuartigen Deep-Learning-basierten Methode [IRT6] bewertet wird. Die verarbeiteten Daten werden im Navigationsalgorithmus zur Bestimmung der Schiffszustände zusammen fusioniert. Dazu wurden im Projekt zwei Algorithmientypen implementiert und geforscht. Zum einen wurde eine filterbasierte Basislösung mithilfe eines Unscented Kalman-Filters in der Schifffahrt implementiert. Um die Positionierungsgenauigkeit und -robustheit der Zustandsbestimmung zu erhöhen, wurde parallel ein neuartiger optimierungsbasierter Fusionsalgorithmus entwickelt und mit der Basislösung verglichen.

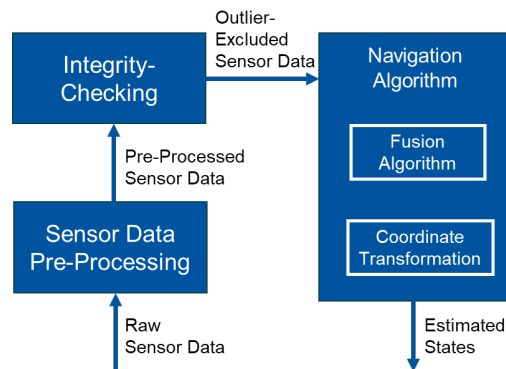


Abbildung 15: Überblick der Navigationslösung

Nachfolgend werden die zwei unterschiedlichen Navigationsalgorithmen und die Integritätsprüfung vorgestellt.

**Filterbasierter Navigationsalgorithmus:** Als eine Basislösung wurde ein bestehendes Kalman-Filter zur Sensorfusion (Navigationsfilter) dieser Daten für den vorliegenden Fall stark angepasst und um weitere Funktionalitäten erweitert. Abbildung 16 stellt das Software-Modell der filterbasierten Navigationslösung dar. Die Softwareausführung des Navigationsfilters wird dabei auf einer Industriesteuerung des Modells Bachmann MH230 umgesetzt, welche mittels Codegenerierung aus MATLAB/Simulink heraus programmiert wird. Das Pulse-Per-Second (PPS) Signal des GNSS-Empfängers wird zur zeitlichen Synchronisierung der Inertialsensor- und GNSS-Daten genutzt. Das Signal ist mittels eines Optokopplers galvanisch getrennt und auf eine höhere Spannung für die Bachmann MH230 gesetzt. Mittels eines Mobilfunkrouters werden RTCM-Korrekturdaten von externen Servern des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS aus unterschiedlichen Bundesländern bezogen und entweder direkt an den GNSS-Empfänger oder an die Industriesteuerung geleitet.

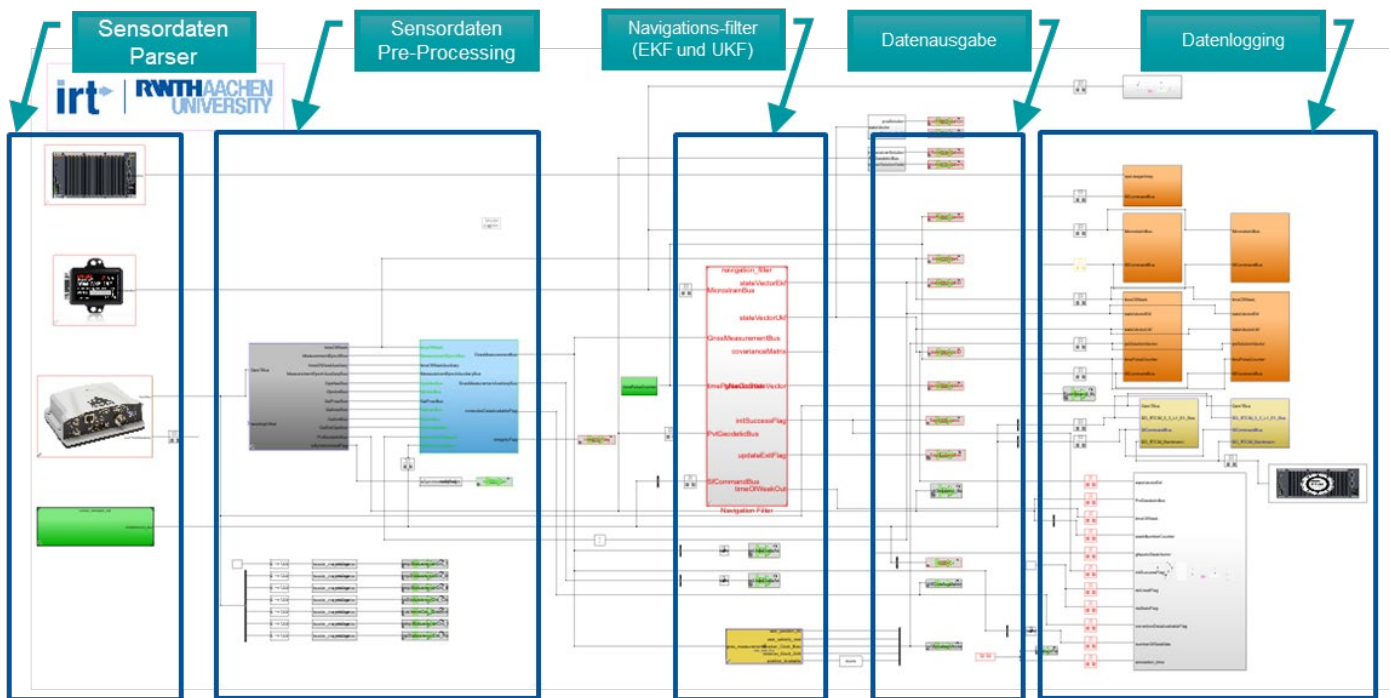


Abbildung 16: Flussdiagramm der Softwareimplementierung des IRT-Navigationsfilters

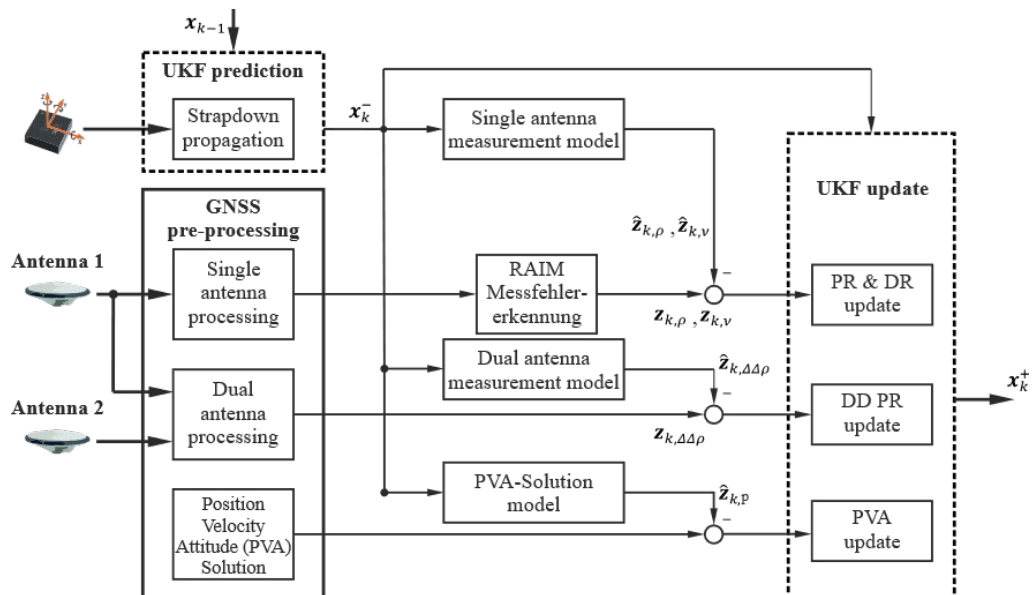


Abbildung 17: Wirkungsplan des IRT-Navigationsfilters

Der Wirkungsplan des Navigationsfilters lässt sich in der Abbildung 17 darstellen. Eine Hybrid-Kopplung der GNSS-Daten wurde im Projekt implementiert, um die Robustheit und Genauigkeit der Zustandsbestimmung gleichlaufend zu gewährleisten. Im offenen Bereich, wo eine komplette Sichtbarkeit zu den Satelliten verfügbar ist, fusioniert das Navigationsfilter die Position, Velocity, und Altitude (PVA)-Lösung des GNSS-Empfängers in einer losen Kopplung, welche einen Positionierungsfehler von maximal 2cm aufweist. Somit können die prädierten Schiffszustände der IMU korrigiert und eine hochgenaue Positionierung (Positionierungsfehler < 2 cm) bereitgestellt werden. In den Szenarien wie z.B., Brückendurchfahrt und Schleusenfahrt, wo die GNSS-PVA-Solution aufgrund der Signalstörungen eine hohe oder inkonsistente Unsicherheit ( $\geq 5\text{ m}$ ) aufweist, werden die vorverarbeiteten rohen GNSS-Beobachtungen (Pseudorange und Dopplerschift) ins Navigationsfilter integriert, um einen schlagartigen Positionierungsfehler zu vermeiden.

Die Ergebnisse des Navigationsfilters werden mittels Ethernets an den OPC-UA-Server weitergeleitet, über den auch Interaktionsmöglichkeiten mit dem Navigationsfilter möglich sind. Des Weiteren wird die OPC-UA Schnittstelle zum Start des Rohdaten-Loggings und zur Re-Initialisierung des Filters genutzt. Abbildung 18 zeigt die Lokalisierungsergebnisse aus einer Dauertestfahrt am Duisburg-Hafen mit dem IRT-Navigationsfilter. Die Peaks entsprechen dabei den Brückendurchfahrten, die in einen deutlich erhöhten Positionsfehler resultieren.

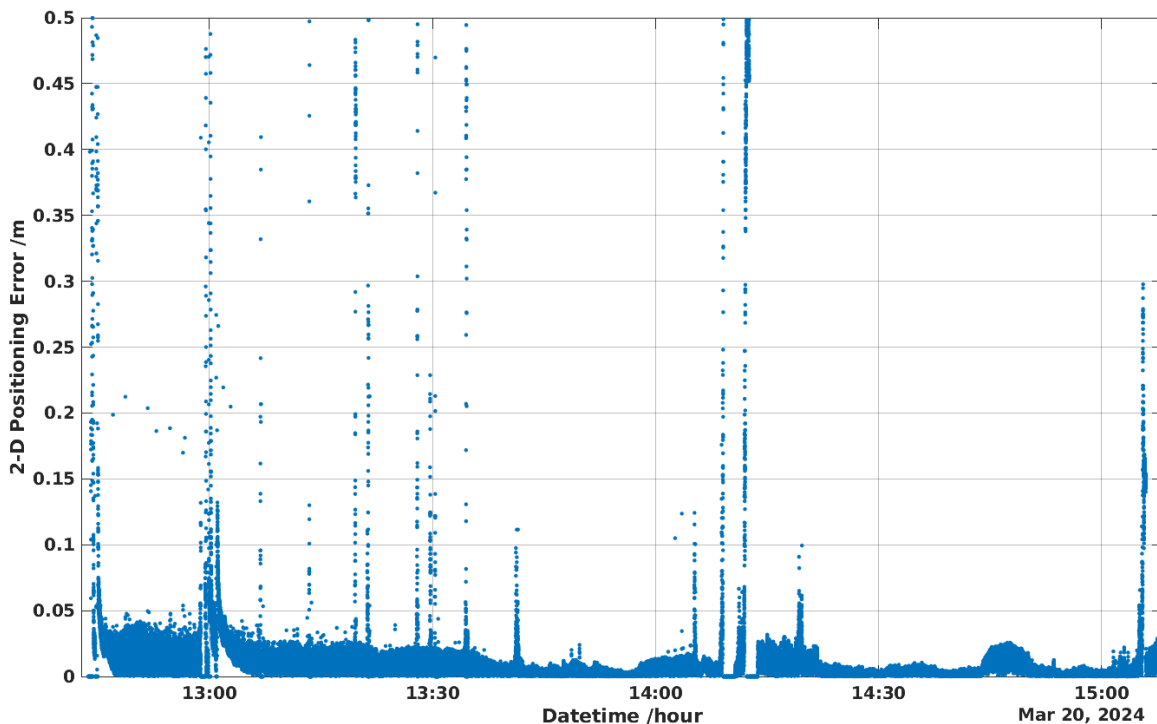


Abbildung 18: 2-D Lokalisierungsfehler des Hybrid-Navigationsfilters

## Optimierung-basierter Navigationsalgorithmus:

In herausfordernden Szenarien wie der Brückendurchfahrt zeigen sich häufig die Limitierungen einer filterbasierten Navigationslösung, sodass ein signifikanter Lokalisierungsfehler unvermeidbar ist. Dieses Problem lässt sich in der Theorie auch mathematisch abbilden, dass ein Kalman-Filter, unabhängig von den implementierten Methoden der nichtlinearen Transformation (Linearisierung mit Taylorreihen erster Ordnung oder mit Unscented-Transformation), aufgrund der starken Annahmen eine inkonsistente Unsicherheitsabbildung im Messmodell aufweist [13]. Somit überwiegt ein unbekannter Modellierungsfehler im Kalman-Filter, welcher den geschätzten Zuständen falsch abbildet. Insbesondere führt dieses Problem häufig zu einer kompletten Divergenz des Kalman-Filters. Um dieses Problem zu lösen, wurde im Projekt ein neuartiger Algorithmus zur Multi-Sensor-Fusion basiert auf der Faktor-Graph-Optimierung entwickelt [IRT3].

Ein Faktor-Graph, im Gegensatz zu einem Kalman-Filter, repräsentiert den Schiffszustand mit allen relevanten Systeminformation (z. B., Messungen zwischen dem Schiff zu eines bekannten Satelliten oder Stellgrößen) in einem probabilistischen Graph-Modell. Dieses Modell erweitert die Annahme der Markov-Kette-Erst-Ordnung im Kalman-Filter, sodass die vergangenen Zustandsinformationen auch bei der Zustandsbestimmung mittels eines Optimierungsverfahrens mitberücksichtigt werden können. Dadurch ergibt sich einen Glättungseffekt in der geschätzten Schiffstrajektorie und eine starke Reduktion des maximalen Lokalisierungsfehlers.

Abbildung 19 zeigt den Faktor-Graph Ansatz, welcher im Projekt entwickelt wurde. Das Faktor-Graph besteht aus den unbekannt Schiffszuständen  $x_t, t = 0 \dots k$  in  $k$  Zeitschritte, die mithilfe von den zuständigen Messgrößen bestimmt werden. Die Messgrößen sind als Faktoren mittels der relevant mathematischen Modellierung im Graph formuliert. Ein nichtlinearer Gauss-Netwon-basierter Solver wird benutzt, um die Schiffszustände zu optimieren. Eine Übersicht der optimierungsbasierten Navigationslösung ist in Abbildung 20 dargestellt. Diese Navigationslösung nutzt die gleichen Eingangsgrößen wie das IRT-Navigationsfilter und stellt die geschätzten Schiffszustände mit 100Hz zur Verfügung.

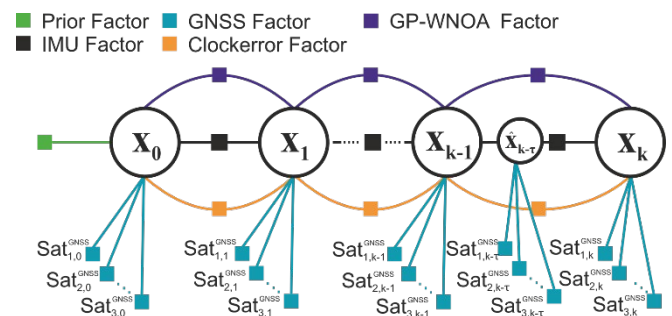


Abbildung 19: Entwickelter Faktor-Graph Ansatz

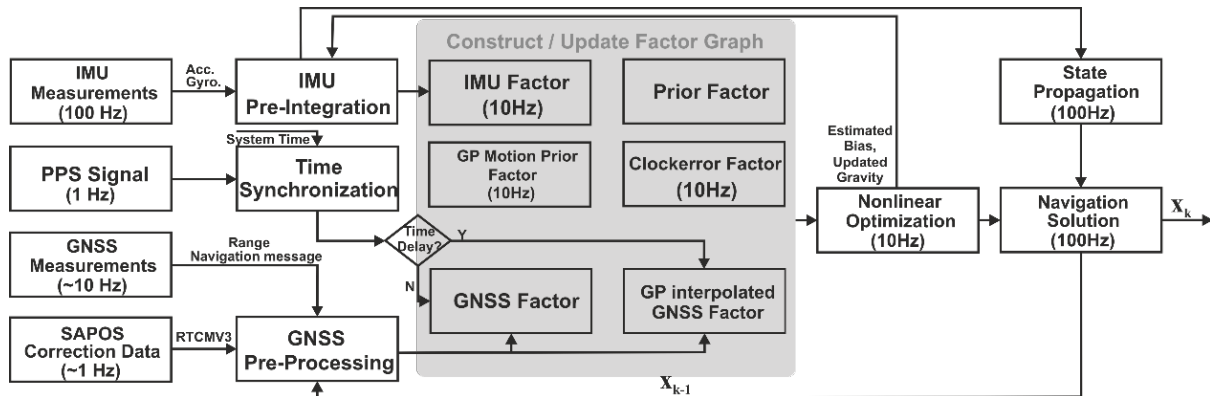


Abbildung 20: Optimierungsbasierte Navigationslösung

Der entwickelte Faktor-Graph-Ansatz wurde mit den Daten einer Messfahrt im Dortmund-Ems-Kanal erprobt und gegen die filterbasierte Methode (eng gekoppeltes IRT-Navigationsfilter) evaluiert. Abbildung 21 zeigt den Versuchsträger mit den Sensoren. Eine Messfahrt wurde mit dem Testschiff „Datteln“ vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)



Abbildung 21: Versuchsträger mit den Sensoren im Dortmund-Ems-Kanal

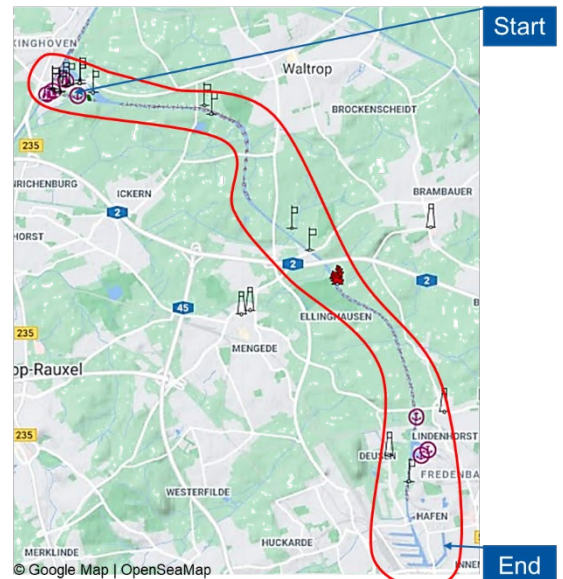


Abbildung 21: Route der Messfahrt

durchgeführt, um die Sensordaten im Dortmund-Ems-Kanal aufzunehmen.

In der Messfahrt enthält eine 17km Fahrstrecke zwischen der Waltrup-Schleuse und dem Dortmunder-Hafen, siehe Abbildung 22. Während der 40-minütigen Fahrt passiert das Schiff mehrere Brücken. Die Ergebnisse dieses Ansatzes sind in den Abbildung 23 und 24 dargestellt. In Abbildung 23 ist zu beobachten, dass der neue Ansatz mit dem Gaußschen-Prozess-Bewegungsmodell (FGO-GP in Grün) die geringste Abweichung aufweist, während das

Navigationsfilter (UKF) einen signifikanten Lokalisierungsfehler zeigt. Abbildung 24 zeigt die 2-D Lokalisierungsfehler beider Algorithmen. Dort ist festzustellen, dass der optimierungsbasierte Ansatz bei den Brückendurchfahrten, wo die GNSS-Messungen stark verrauscht sind, bessere Genauigkeit im Gegensatz zum Navigationsfilter zeigt.

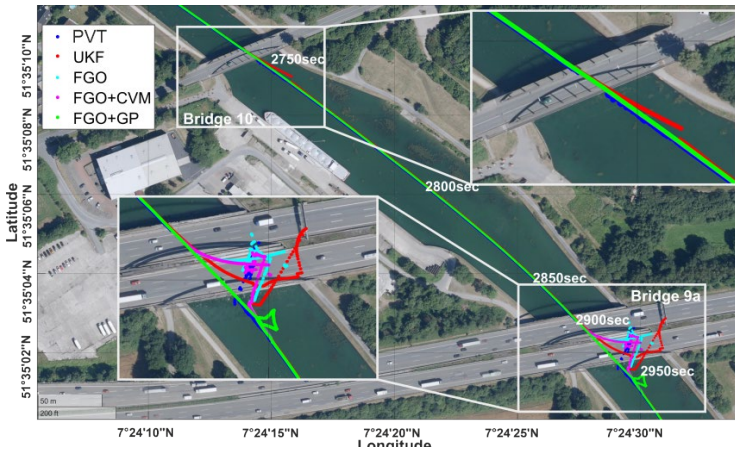


Abbildung 233: Schiffstrajektorien mit unterschiedlichen Algorithmen

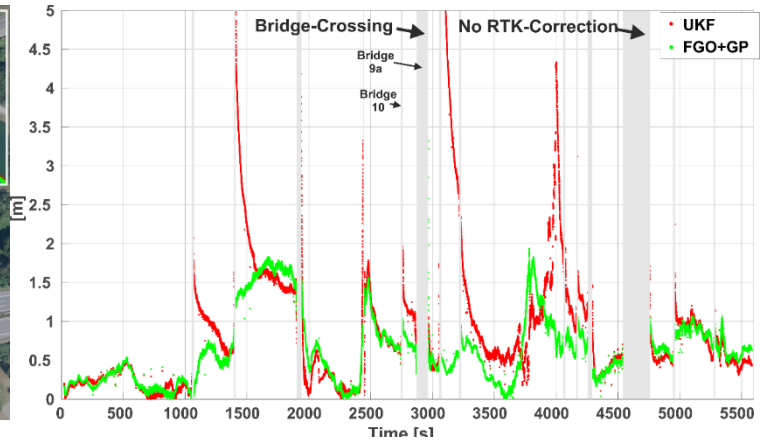


Abbildung 23: 2-D Lokalisierungsfehler aus der neuartigen Methode und dem IRT-Navigationsfilter

Der neuartige Navigationsalgorithmus basierend auf der Faktor-Graph-Optimierung wurde in der Publikation [IRT3] veröffentlicht. Ein Video ist zu diesem Forschungsergebnis verfügbar<sup>4</sup>.

**Integritätsprüfung:** Weiterer Bestandteil der Navigationslösung war die Ergänzung um ein Integritätsprüfungsverfahren der GNSS-Beobachtungen. Dafür hat die RWTH zwei Methoden im Projekt implementiert: ein klassischer Ansatz „Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)“ aus der vergangenen Arbeit [12] und ein neuartiger Ansatz, welcher mittels einer Deep-Learning-Methode die fehlerbehafteten GNSS-Messungen detektiert. Wie Abbildung 15 zeigt, wurde das RAIM-Verfahren nach dem Sensordaten Pre-Processing implementiert, um die fehlerhaften GNSS-Beobachtungen zu erkennen und von der Fusion auszuschließen. Das RAIM-Verfahren überprüft die Integrität der empfangenen GNSS-Beobachtungen basierend auf dem

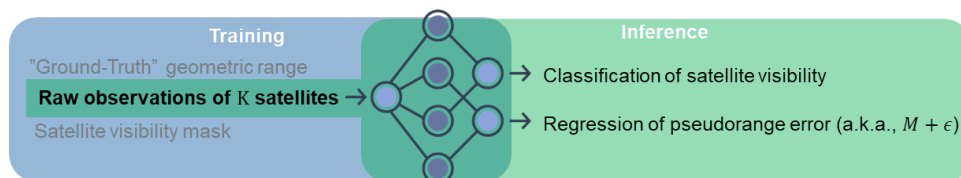


Abbildung 24: Konzept der neuartigen Deep-Learning-basierten Integritätsprüfung

statistischen Chi-Test mit residualen Messabweichungen der GNSS-Pseudoranges. Somit kann die

<sup>4</sup> [https://youtu.be/FgEeISTtr-k?si=CmMV9jee\\_vOy-WIP](https://youtu.be/FgEeISTtr-k?si=CmMV9jee_vOy-WIP)

Chi-square-Wahrscheinlichkeitsverteilung in RAIM berechnet werden, um ein Alarm-Level bei der Fehlererkennung zu schätzen [IRT6]. Allerdings setzt sich das RAIM-Verfahren den Empfang redundanter GNSS-Messungen ( $> 6$  Beobachtungen) voraus. Daher ist dieser Ansatz in herausfordernden Szenarien, z.B., bei Brücken- und Schleusedurchfahrten, wo eine maßgebliche Signalaussschaltung nicht vermeidbar ist, nicht einsetzbar.

Um diese Limitierung der Integritätsprüfung zu vermeiden, wurde im Projekt ein neuartiges Verfahren zur Integritätsprüfung der GNSS-Beobachtungen basierend auf dem maschinellen Lernen entwickelt. Abbildung 25 stellt das Konzept dieses Verfahrens dar. Dabei wurde ein neues neuronales Netz konstruiert, welches auf Basis der Signaleigenschaften eine raumzeitliche (engl., spatiotemporal) Modellierung der GNSS-Beobachtungen abbildet. Während der Inferenz nutzt das Netz die extrahierten Features aus den rohen GNSS-Messungen als Eingangsgrößen. Als Ausgangsgrößen werden zwei Ergebnisse bereitgestellt: binäre Klassifizierung der Integrität und Regression des möglichen Fehlers der einzelnen Satelliten-Beobachtung in Meter. Abbildung 26 präsentiert die Architektur des entwickelten neuronalen Netzes, welches mit der folgenden Gleichung beschreiben lässt

$$[\mathcal{V}_T^k \ \hat{\epsilon}_T^k] = \text{NN}(\{El_t^k \ Az_t^k \ C/N0_t^k \ \sigma_t^k \ RSS_t^k\}_{t=1}^T),$$

wo die Variable  $\mathcal{V}_T^k$  die Qualität der GNSS-Beobachtung zum Zeitpunkt  $T$  identifiziert und die Größe  $\hat{\epsilon}_T^k$  einen möglichen Messfehler der Messung aus dem Satelliten  $k$  in Meter schätzt. Das neuronale Netz  $\text{NN}(\cdot)$  nimmt eine zeitliche Sequenz der Feature-Vektoren in einem Zeitfenster von  $\tau = 1 \dots T$  als Input. Der Feature-Vektor beinhaltet die Basiskenngrößen über die Messqualität und geometrische Information der Satelliten. Dabei werden die Elevation-Winkel  $El_t^k$ , die Azimuth-Winkel

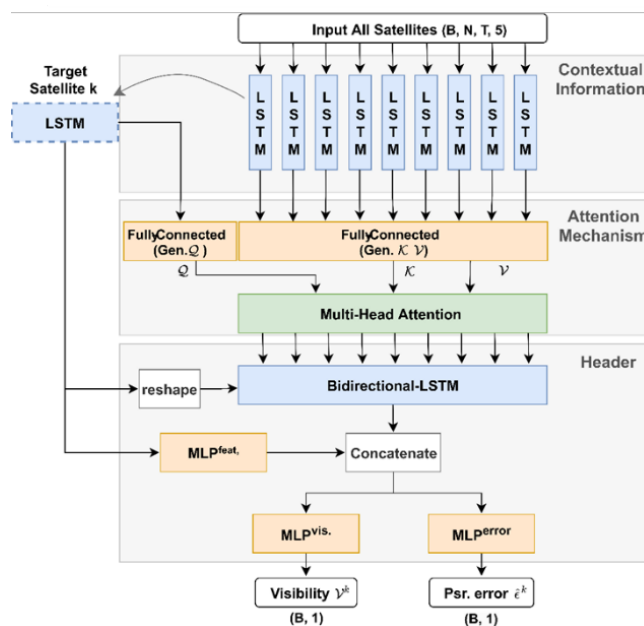


Abbildung 25: Die Architektur des entwickelten neuronalen Netzes.

$Az_\tau^k$  und die Signalstärke  $C/N_{0\tau}^k$  der Satelliten  $k$  zum Zeitpunkt  $\tau$  aus den empfangenen GNSS-Daten berechnet. Die Features  $\sigma_\tau^k$  beschreibt den Messfehler aus einem vorverarbeiteten Least-Square Positionierungsalgorithmus und das Feature  $RSS_\tau^k$  bildet den quadratischen Mittelwert des vergangenen Messfehlers  $\sigma_\tau^k, \tau = 1 \dots T$  ab. Das Netz besteht aus drei Komponenten. Das Long-Short-Term-Memory (LSTM)-Netz modelliert die zeitliche Signalvermehrung der GNSS-Beobachtungen. Anschließend verarbeitet ein Attention-Mechanismus die hochdimensionale Featuremap aus dem LSTM-Netz, um eine räumliche Korrelation der zeitlichen Information aufzubauen. Die bearbeiteten Features mit der zeitlichen Information der einzelnen Satelliten werden über ein bidirektionales LSTM-Netz kombiniert. Das Endergebnis lässt sich über zwei Multi-Layer-Perzeptron berechnen. Somit kann eine Klassifizierung der Satellitenintegrität und eine Schätzung des Messfehlers bereitgestellt werden. Zum Antrainieren des neuronalen Netzes wurde ein Teil (80%) der Daten aus herausfordernder urbaner Umgebung in der Stadt Hong Kong (HK) und Aachen (AC) benutzt. Die restlichen Daten wurden zum Testen des Netzes eingesetzt.

Das Ergebnis der entwickelten Methode ist in der Abbildung 27 gezeigt. Im Vergleich zu anderen Referenzmodellen, z. B., den klassischen Algorithmen aus dem maschinellen Lernen, zeigt das entwickelte neuronale Netz sowohl bessere Genauigkeit als auch eine verbesserte Generalisierung.

Die neue Methode zur Integritätsprüfung basierend auf Deep Learning wurde in der Publikation [IRT6] veröffentlicht. Ein Video zu diesem Forschungsergebnis ist verfügbar<sup>5</sup>.

TABLE II: Performance Metrics using HK Dataset.

Model		Precision	Recall	F1-Score	Acc.
SVM	LOS	0.87	0.86	0.86	0.82
	NLOS	0.72	0.74	0.73	
XGboost	LOS	0.90	0.88	0.89	0.85
	NLOS	0.77	0.80	0.78	
DL [26]	LOS	0.80	0.96	0.87	0.81
	NLOS	0.85	0.51	0.64	
DL (ours)	LOS	0.90	0.91	0.90	0.87
	NLOS	0.80	0.79	0.80	

TABLE III: Performance Metrics using AC Dataset.

Model		Precision	Recall	F1-Score	Acc.
SVM	LOS	0.80	1.00	0.89	0.80
	NLOS	0.39	0.01	0.01	
SVM*	LOS	0.91	0.72	0.80	0.72
	NLOS	0.38	0.70	0.49	
XGboost	LOS	0.86	0.88	0.87	0.79
	NLOS	0.47	0.42	0.45	
DL [26]	LOS	0.86	0.83	0.84	0.76
	NLOS	0.40	0.47	0.43	
DL (ours)	LOS	0.86	0.90	0.88	0.81
	NLOS	0.51	0.42	0.46	

Abbildung 26: Testergebnis zur Klassifizierung der fehlerbehafteten GNSS-Beobachtungen mittels der lern-basierten Methode zur Integritätsprüfung.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Während der Projektlaufzeit konnte das AP9100 separat von den anderen Arbeitspaketen durchgeführt werden. Damit wurde die methodische Entwicklung im AP9100 bei den Verzögerungen vorgezogen. Allerdings musste die Validierung des AP9100

<sup>5</sup> <https://youtu.be/PnXXofByEE0>

aufgrund des Werftaufenthaltes des Versuchsträgers verschoben werden, wodurch das AP9100 in 06/2023 abgeschlossen ist.

***Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable***

1. Softwaremodul: GNSS-Pre-Processing in MATLAB und C++
2. Softwaremodul: Navigationsfilter in MATLAB
3. Softwaremodul: RAIM-Integritätsprüfung in MATLAB
4. Softwaremodul: Faktor-Graph-Optimierung in C++
5. Softwaremodul: Lern-basierte Integritätsprüfung in Python
6. Softwaremodul: OPCUA-Konverter der Navigationslösung in MATLAB

***vollständig erbracht.***

**2.1.5 Schiffsmodellierung und modellbasierte Trajektorienprädiktion (AP7200-AP7300)**

Als Teil des Arbeitspakets AP7200 wurde das von UDE/ISMT zur Verfügung gestellte ManövriermodeLL analysiert und für die Verwendung in Arbeitspaketen AP7300, AP9400 und AP9500 aufbereitet. Insbesondere wurde das Modell um Dynamik des Ruders erweitert und zeitlich diskretisiert. Es wurde keine Modellreduktion vorgenommen, da das ursprüngliche Modell über einen nur sechs dimensional en Zustandsraum verfügte. Diese Anzahl von Dimensionen ermöglicht jedoch eine rechnerisch effiziente Berechnung der dynamischen Vorgänge im System und kann außerdem nicht sinnvollerweise weiter reduziert werden, ohne Genauigkeit des Modells erheblich zu beeinträchtigen.

Die als Teil von AP7300 entwickelte Trajektorienprädiktion baut auf dem in AP7200 erarbeiteten Schiffsmodell auf. Für die Prädiktion der Eigenbewegung des Schiffes werden für den gegebenen Stellgrößenverlauf „Motion Primitives“ berechnet, die die Bewegung des Schiffes in Abhängigkeit von dem vorgegebenen Ruderwinkelverlauf beschreiben. Der Ruderwinkelverlauf kann dabei extern von dem Führer vorgegeben werden. In diesem Fall wird die Annahme getroffen, dass die Kursänderung und damit auch die Ruderwinkeländerung selten passieren, sodass die Ruderposition in den nächsten Zeitschritten konstant bleibt. Alternativ kann der Ruderwinkelverlauf genutzt werden, der von dem Online-Trajektorienplanungsmodul vorgeschlagen wird. Zusätzlich zur prädizierten Trajektorie werden die Unsicherheiten der Prädiktion mithilfe von einem Extended Kalman Filter (EKF) geschätzt, die sich durch Modellgenauigkeiten sowie das potenzielle Abweichen des Schiffführerverhaltens vom prädizierten Verhalten ergeben. Dadurch können Aussagen über die Konfidenzintervalle der Trajektorienprädiktion getroffen werden. Der Einfluss der Umweltbedingungen, vor allem der Strömung, auf die Trajektorie sowie die Prädiktionsgenauigkeit

wurde vernachlässigt. Das liegt daran, dass die vorhandenen Schiffsdynamikmodelle keine Berücksichtigung der Strömung erlauben.

Die Prädiktion der Schiffsbewegung in Abhängigkeit von dem gesetzten Ruderwinkel wurde direkt in den Prozess von Trajektorienplanung und Trajektorienfolgeregelung in Arbeitspaketen AP9400, AP9500 integriert. Die Zuverlässigkeitsbereichsschätzung fand dagegen keine direkte Anwendung in den entwickelten Algorithmen, weil diese auf deterministischen Ansätzen basieren und keine strukturelle Möglichkeit anbieten, die Unsicherheiten explizit im Planungs- oder Regelungsprozess zu betrachten. Die Erkenntnisse zu den Unsicherheiten, die vorwiegend mit der Prädiktion der Bewegung von Fremdschiffen zusammenhängen, aber auch diejenigen, die die Eigenbewegung betreffen, wurden implizit bei der Auslegung der Sicherheitszonen um die Hindernisse, wie es weiter beim AP9500 beschrieben wird, berücksichtigt.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Das Arbeitspaket AP7200 wurde im Q3/2023 nach der Anpassung des neuen erhaltenen Schiffmodells abgeschlossen. Das Arbeitspaket AP7300 wurde ebenfalls im Q3/2023 abgeschlossen.

#### ***Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable***

1. Softwaremodul: Angepasste Schiffsdynamikmodell für Planungs- und Regelungszwecke
2. Softwaremodul: EKF-basierter Trajektorienprädiktor mit Zuverlässigkeitsbereich

***erbracht.***

#### **2.1.6 Einbindung eines Bahnführungsassistenten und modellprädiktive Trajektorienregelung (AP9400)**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Schnittstelle zwischen dem Bahnführungsassistenten von argonics und dem Trajektorienplanungsmodul entwickelt. Sie wurde unter anderem direkt in die Simulationsumgebung gemäß Abbildung 29 b) integriert und bildet das Verbindungsglied zwischen dem Trajektorienplanungsmodul und dem Simulator von argonics. Die wesentlichen Funktionalitäten dieser Schnittstelle ist die Datenkonvertierung zwischen unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen wie ROS2 und TCP/IP, Zeitsynchronisierung, Trajektorienglättung und Trajektorienextrapolation. Dadurch wurde Übernahme der geplanten Trajektorien als Referenztrajektorie durch Bahnführungsassistenten ermöglicht. Anschließend wurden die simulativen Tests der Trajektorienplanung auf dem von argonics zur Verfügung gestellten Simulator durchgeführt.

Ebenso wurden in diesem Arbeitspaket Methoden der modellprädiktiven Regelungen für die Entwicklung einer Regelung für Binnenschiffe untersucht. Das entwickelte Regelungssystem basiert auf dem Schiffsmodell, das gemäß AP7000 entwickelt wurde. Die wesentliche Zielsetzung bei der Entwicklung des Regelungssystems bestand darin, einen Regler zum sicheren und präzisen Abfahren der Trajektorie mit der Kollisionsvermeidungsfunktionalität zu entwickeln. Die Integration der Kollisionsvermeidungsfunktionalität in die Regelung erzeugt zusätzliche Sicherheit durch Redundanz. Es hilft außerdem dem Regelungssystem den freien Manöverplatz zu bestimmen, falls Abweichung von der geplanten Trajektorie, zum Beispiel aus dynamischen Gründen, unvermeidlich ist.

Das entwickelte Regelungssystem wurde simulativ getestet. Abbildung 28 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt aus einem Testszenario, in dem die Referenztrajektorie des Reglers (rot) das grau dargestellte Hindernis unzureichend berücksichtigt und somit kollisionsbehaftet ist. Dank des Regelungssystems weicht das Schiff in diesem Fall von der Referenztrajektorie ab und kehrt auf diese zurück, sobald das Hindernis vorbei ist.

Dieses Verfahren wurde unter dem Titel „*Model Predictive Control for Safe Path Following in Narrow Inland Waterways for Rudder Steered Inland Vessels*“ auf der Konferenz ECC23 (European Control Conference 2023) eingereicht [IRT5].

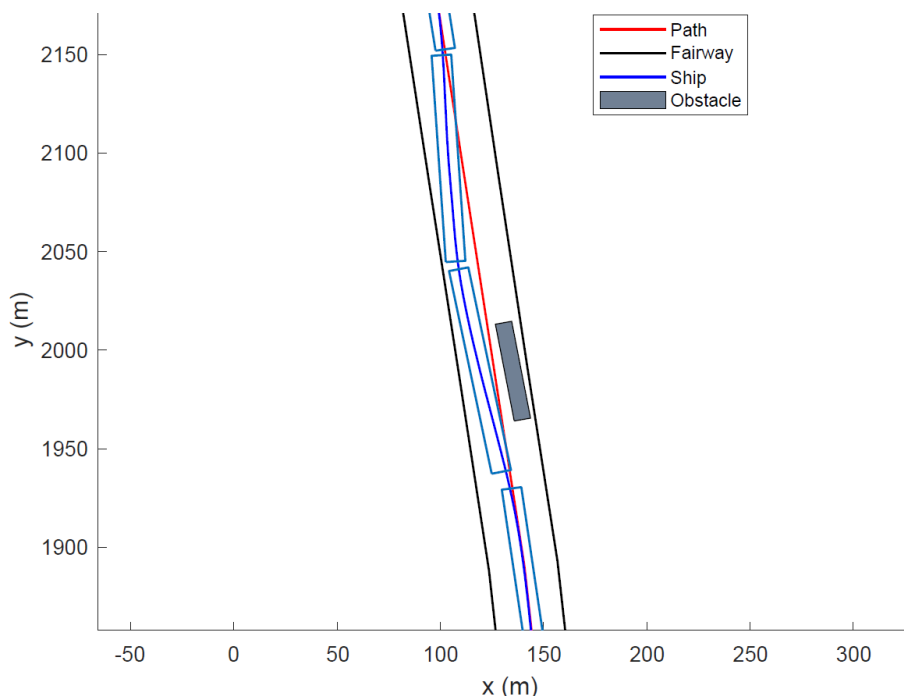


Abbildung 27: Testszenario für Trajektorienfolge. Das eigene Schiff (blau) weicht einer geplanten Trajektorie (rot) aus, um eine Kollision mit dem Hindernis (grau) zu vermeiden.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Die Untersuchung der modellprädiktiven Regelungsansätze für Trajektorienfolgeregelung wurde im Q4/2022 abgeschlossen. Die Implementierung der Schnittstelle zum Bahnführungsassistenten wurde im Q4/2023, nach der Fertigstellung des Softwaremoduls "Online-Trajektorienplanung" durchgeführt und abgeschlossen.

**Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable**

1. Softwaremodul: Trajektorienfolgeregelung
2. Softwaremodul: Schnittstelle zwischen Trajektorienplanung und Bahnführungsassistent

**vollständig erbracht.**

### **2.1.7 Online und interaktive Trajektorienplanung (AP9500)**

Im Rahmen des Projektes wurde ein A\*-basiertes Verfahren zur Trajektorienplanung entwickelt. Dies ist ein weitverbreitetes Verfahren der graphenbasierten Trajektorienplanung, welches sich dank einer intelligenten Heuristikverwendung durch schnelle Rechenzeiten auszeichnet. Die Heuristik hilft dabei, die besonders vielversprechenden Bereiche des Graphen zu identifizieren, sodass diese als Erste abgesucht werden. Ist die aufgrund einer Heuristik gemachte Schätzung ausreichend präzise, wird der Planungsprozess um ein Vielfaches beschleunigt [20]. Bei der Wahl der Heuristik wird dabei oft zwischen dem Maß an Optimalität der gefundenen Lösung und der für den Suchprozess benötigten Zeit abgewogen. So kann eine aggressivere Heuristik schneller zu einem Ergebnis führen. Dies geschieht aber auf Kosten der Qualität der gefundenen Lösung. Die Güte einer Trajektorie und jedes einzelnen Knotens, der zur Trajektorie gehört, wird dabei durch eine Kostenfunktion beschrieben, die basierend auf gewünschten Eigenschaften der Transition von einem Knoten zum anderen Knoten, auch als Kante bezeichnet, einen Kostenwert zuweist. In dem entwickelten Verfahren gehen wir von der Motivation heraus, möglichst schnell eine akzeptable Trajektorie zu generieren und diese dann je nach vorhandenem Zeitbudget zu verbessern. Daher werden bei der Planung aggressive Heuristiken verwendet, die schnell, aber suboptimal arbeiten. In einem Planungszyklus werden so mehrere Trajektorien gefunden. Die gefundenen Trajektorien werden miteinander verglichen und die Beste von ihnen übernommen. Für bessere Ergebnisse hinsichtlich der Rechenzeit und der Trajektoriengüte, werden bei der Auslegung der Heuristik unterschiedliche Faktoren, wie Flusskrümmung oder zukünftige Auswirkungen der aktuellen Schiffsausrichtung auf seine Bewegung, berücksichtigt. Auf diese Weise kann die Approximationsgenauigkeit auch bei den aggressiv parametrisierten Heuristiken erhöht werden.

Der Planungsprozess wird mit leicht variierenden Kostenparametern mehrmals nacheinander ausgeführt. Dadurch werden dem Schiffsführer mehrere Trajektorien zur Verfügung gestellt, sodass

für die verantwortliche Person eine Auswahlmöglichkeit besteht. Die Taktrate des Trajektorienplanungsmoduls beträgt 0,1 Hz. Alle 10 Sekunden wird eine neue Trajektorie geplant, damit die neu wahrgenommenen Umgebungsänderungen oder abweichende Eigenschiffsposition rechtzeitig in der Planung berücksichtigt werden können.

Während normalerweise die A\*-basierten Verfahren die Vorberechnung eines Graphen benötigen, auf dem sie ausgeführt werden, unterscheidet sich das entwickelte Verfahren davon, indem hier der Suchgraph sukzessive während des Planungsprozesses aufgebaut wird. Auf diese Weise ist der Planungsalgorithmus nicht an eine einzelne Geoposition gebunden. Dies ist insbesondere vorteilhaft, da der Anwendungsfall keinen fixen Einsatzort vorsieht, sondern sich auf den gesamten Rhein erstreckt und auch auf andere Flüsse übertragen werden kann. Als Kanten des Graphen dienen dabei die gesetzten Ruderwinkelwerte und als Knoten des Graphen - die sich daraus ergebenden Position und Ausrichtung sowie Bewegungsmuster des Schiffes.

Als wichtigste Anforderungen an die zu generierende Trajektorie wurden unter anderem lange Planungshorizonte (zwei bis drei Kilometer), ein glatter Trajektorienverlauf und ein hohes Maß an dynamischer Realisierbarkeit festgelegt. Diese Kriterien sind relevant, um die Akzeptanz des Systems beim Schiffskapitän zu erhöhen und die Zuverlässigkeit des Moduls auf hohem Niveau zu halten. Einerseits bekommt der Schiffsführer durch langes Planungshorizont einen besseren Überblick über die Situation, andererseits kann dadurch immer rechtzeitig auf eine potenzielle Kollisionsgefahr mit einem Ausweichmanöver reagiert werden. Unter dynamischer Realisierbarkeit versteht man die Fähigkeit der unterlagerten Module, vorwiegend des Regelungssystems, der geplanten Trajektorie gut zu folgen. Diese Anforderung ist in dem betrachteten Anwendungsfall umso relevanter, da die Planung auf einem teilweise stark eingeschränkten Raum stattfindet, der durch die Fahrrinnengrenzen limitiert ist. Um ein hohes Maß an dynamischer Realisierbarkeit der Trajektorie zu erreichen, wird das in den Arbeitspaketen AP7000 entwickelte und angepasste Modell verwendet. Bei diesem Modell handelt es sich um ein Abkowitz-Manövriermodell [14], welches es ermöglicht, in der Nähe eines Arbeitspunktes die Lageänderung des Schiffes in Abhängigkeit von dem gesetzten Ruderwinkel zu bestimmen. Das Modell zeichnet sich durch hohe Genauigkeit aus, geht jedoch mit einigen Einschränkungen einher. So können mit diesem Modell keine Beschleunigungsprozesse abgebildet werden. Überdies enthält das Modell keine strömungsrelevanten Informationen, sodass es bei stärkeren Strömungen zu größeren Abweichungen vom nominellen dynamischen Verhalten kommen kann.

Damit die generierte Trajektorie nicht nur dynamisch fahrbar, sondern auch verkehrstechnisch akzeptabel ist, unterliegt sie weiteren Kriterien. So werden bei der Trajektorienplanung die Trajektorien bevorzugt, die möglichst wenig Kursänderungen aufweisen und die keine abrupten Ruderwinkelverstellungen erfordern. Ferner wird gefordert, dass das Schiff sich in der in Bewegungsrichtung rechten Hälfte der Fahrrinne bewegt. Das entspricht einerseits den

Verkehrsregulierungen, laut denen sich die Wasserfahrzeuge in den engen Fahrrinnen an den rechten Fahrrinnenrand halten sollten. Andererseits wird dadurch weitgehend vermieden, dass das Schiff in den Gegenverkehrsbereich gerät. Diese Kriterien werden entsprechend in der während der Planung verwendeten Kostenfunktion codiert und auf diese Weise im Planungsprozess berücksichtigt.

Ein weiteres notwendiges Merkmal einer Trajektorie ist die Kollisionsfreiheit. In dem vorliegenden Projektvorhaben wurde Kollisionsfreiheit bezüglich der statischen Hindernisse, wie Infrastrukturobjekte, Brückenstützen etc. und anderer Wasserfahrzeuge, die als dynamische Hindernisse bezeichnet werden, betrachtet. Um das Risiko einer Grundberührung zu minimieren, wurde der freie Planungsraum für die Trajektorie des Schiffes auf den Fahrrinnenbereich begrenzt, in dem eine ausreichende Wassertiefe gewährleistet ist. Die Infrastruktur- und Fahrrinnendaten werden den online verfügbaren elektronischen nautischen Karten entnommen. Die dynamischen Hindernisse werden auf Basis der in AIS-Nachrichten enthaltenen Verkehrsdaten betrachtet. Diese Nachrichten enthalten Information, wie Position und Ausrichtung des Wasserfahrzeugs, seine Breite und Länge sowie aktuelle Geschwindigkeit über Wasser. Aufgrund dieser Information wird nicht nur die aktuelle Position des Schiffes bestimmt, sondern auch die zukünftige Bewegung der einzelnen Verkehrsteilnehmer prädiziert. Zur Bewegungsprädiktion wird angenommen, dass andere Schiffe sich bei konstant bleibender Geschwindigkeit entlang der Fahrrinne, parallel zur Fahrrinnenachse, bewegen. Jedes Hindernis wird mit einer sogenannten Sicherheitszone versehen. Darunter ist eine Zone zu verstehen, die nicht vom Eigenschiff gekreuzt werden darf. Sie hat zwei Funktionen. Zum einen dient sie dazu, zu gewährleisten, dass das Eigenschiff einen sicheren Minimalabstand zu dem Hindernis nicht unterschreitet. Zum anderen werden auf diese Weise mögliche Unsicherheiten bei der Lokalisierung des Eigenschiffes oder des Hindernisses sowie infolge einer ungenauen Bewegungsprädiktion eines Fremdschiffes berücksichtigt, indem die Sicherheitszone entsprechend ausgedehnt wird. Um das Kollisionsrisiko weiter zu minimieren und die geplanten Trajektorien verkehrsregelkonform zu gestalten, wird eine teilweise Kompatibilität mit den internationalen Kollisionsverhütungsregeln COLREGs angestrebt. Insbesondere werden Überholungs- und Begegnungssituation betrachtet, in denen Schiffsmanöver in einer verkehrsregelkonformen Weise durchgeführt werden. Eine frühere Version dieses Verfahrens wurde unter dem Titel „*A\*-guided Incremental Sampling for Trajectory Planning of Inland Vessels in Narrow Ship Canals*“ [IRT4] auf der Konferenz IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2022 eingereicht und wurde als Konferenzbeitrag akzeptiert. Für die finale Version des Algorithmus wird aktuell eine weitere Veröffentlichung geplant.

Das entwickelte Trajektorienplanungsmodul wurde entsprechend dem Arbeitspaket AP10100 ausgiebig simulativ getestet. Für die Testzwecke wurden zwei Simulationsumgebungen aufgebaut, die in Abbildung 29 dargestellt sind. In der links abgebildeten Simulationsumgebung wurde das Trajektorienplanungsmodul direkt an den auf Basis der Modelle gemäß AP7000 entwickelten

Schiffsdynamiksimulator angeschlossen. Parallel dazu wurde ein Simulator für dynamische Hindernisse verwendet, mit dem die Hindernisdaten im AIS-Format simuliert werden. Diese Daten gehen in das Modul ein, das für die Prädiktion der dynamischen Hindernisse verantwortlich ist. Dieses Setup eignet sich gut, um unterschiedliche Methoden der Trajektorienplanung für den Fall von gutem Modellwissen miteinander zu vergleichen, da die Ergebnisse durch den fehlenden Einfluss der Regelungseinheit und der potenziellen Störgrößen direkt miteinander vergleichbar sind. Die zweite Simulationsumgebung baut sich auf dem Schiffssimulator von argonics auf, in dem sowohl die Schiffdynamik als auch die Fremdschiffe simuliert werden. Ferner enthält der Simulator auch einen LQ-Regler, der basierend auf der vorgegebenen Trajektorie einen geeigneten Ruderwinkel berechnet. Das Schiffsmodell, das in dem Simulator hinterlegt ist, ist in seinen dynamischen Eigenschaften mit dem Modell vergleichbar, das dem Trajektorienplanungsmodul zugrunde liegt. Es ist mit diesem jedoch nicht identisch. Die Bewegung von simulierten Fremdschiffen ist an die historischen Verkehrsdaten angelehnt. Dieses Setup eignet sich insbesondere für Validierung der Trajektorienplanung bezüglich der dynamischen Realisierbarkeit und Kollisionsfreiheit. Der Grund dafür liegt zum einen darin, dass es über ein realitätsnahes Schiffsmodell sowie ein in der Praxis einsetzbares Regelungssystem verfügt, zum anderen darin, dass damit die Robustheit gegenüber Modellabweichungen getestet werden, mit denen in der realen Welt immer zu rechnen ist.

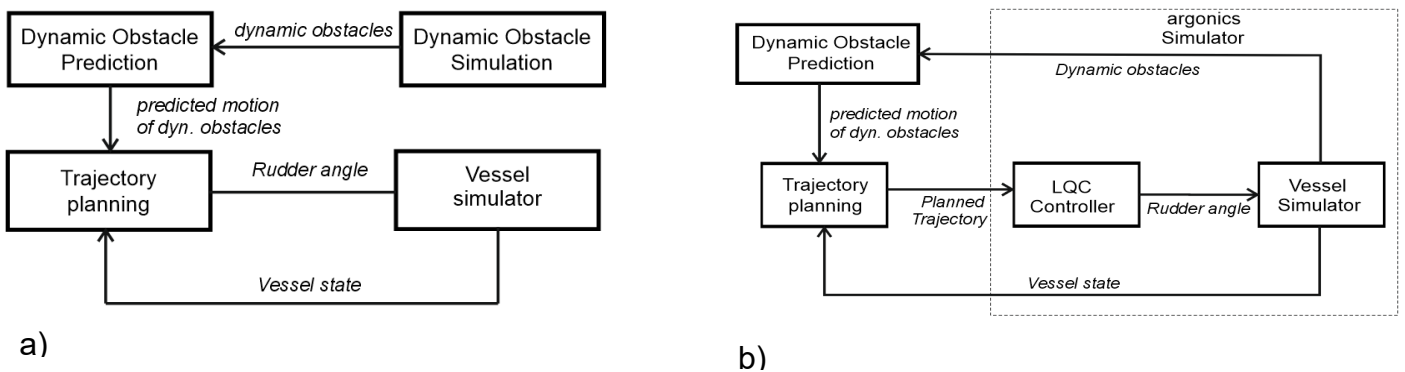


Abbildung 28: Struktur der Simulationsumgebung für Tests und Validierung der Trajektorienplanungsmethoden

Zu Testzwecken wurden mehrere Testszenarien definiert. Sie umfassen unterschiedliche Rhein-Abschnitte der Länge von 3 bis 12 Kilometer. Auf diesen Strecken wurden unterschiedliche Verkehrssituationen simuliert und miteinander kombiniert. Dazu zählen freie Flussfahrt, Überhol- oder Ausweichmanöver und komplexere Situationen, die drei oder mehr Schiffe umfassen. Es wurde untersucht, ob das Trajektorienplanungsmodul in der Lage ist, auch in schwierigen Verkehrssituationen eine kollisionsfreie Trajektorie innerhalb des vorhandenen Zeitbudgets zu generieren. Ferner wurden unterschiedliche Heuristiken und ihre Kombinationen miteinander in Bezug auf Rechenzeit und Trajektorienkosten verglichen. Hier wurde ein Fokus daraufgelegt, welche Heuristik eine bessere worst-case-Berechnungszeit aufweist, da diese Kennzahl

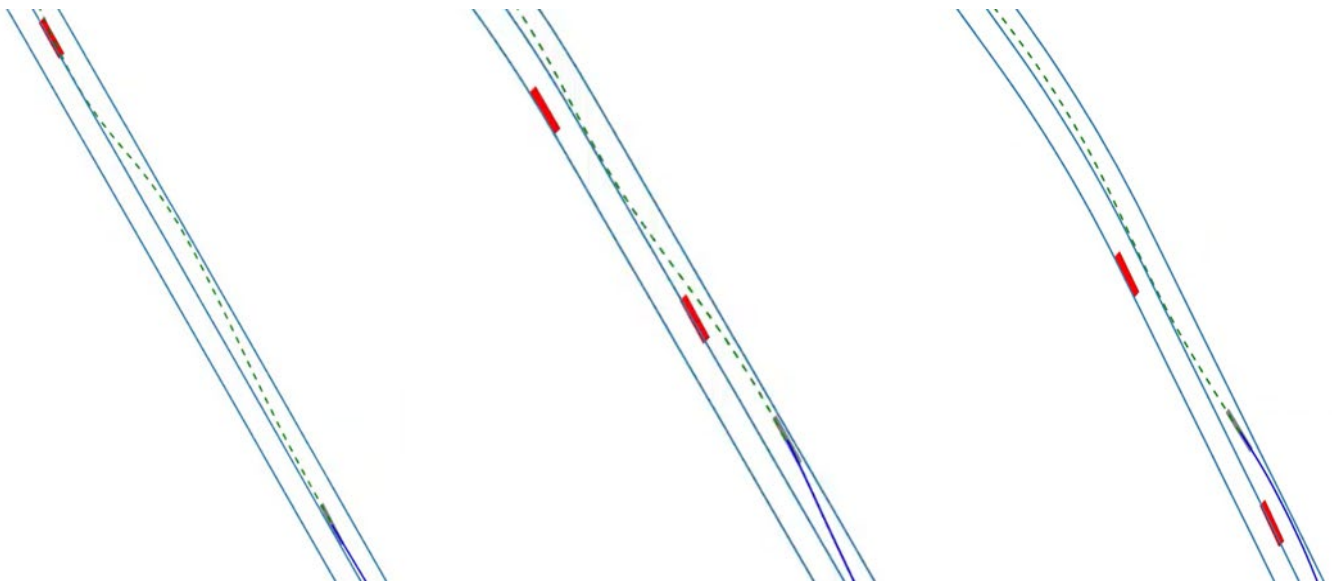


Abbildung 29: Simulationsszenario für Trajektorienplanungsmodul

entscheidend dafür ist, dass der Algorithmus zuverlässig, auch in den komplexen Verkehrssituationen funktioniert und in der Lage ist innerhalb des vorhandenen Zeitbudgets eine gültige Lösung zu generieren. Abbildung 30 zeigt beispielhaft eine geplante Trajektorie in einem Begegnungsszenario. Es ist zu erkennen, dass das Schiff (grau) im rechten Teil der Fahrrinne, unweit der Fahrrinnenmitte, fährt (a), nach rechts abweicht, um dem begegnenden Schiff (rot) auszuweichen (b) und anschließend auf die alte Spur zurückkehrt (c). Weitere simulative Ergebnisse der Trajektorienplanung stehen auch in Video-Form zur Verfügung<sup>6</sup>.

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Die Implementierung des Softwaremoduls „Online-Trajektorienplanung“ wurde weitgehend im Q3/2023 abgeschlossen. Das entstandene Modul wurde erfolgreich im Open Loop Modus (ohne Steuereingriff auf das Schiff) demonstriert. Anschließend

---

<sup>6</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=l5mOFCP2xrE>

wurde im Verlauf von Q4/2023 die Validierung auf dem Schiffssimulator von argonics durchgeführt. Während dieses Prozesses wurde das Interagieren des Trajektorienplaners mit Bahnführungsassistenten getestet und punktuelle Verbesserungen des Algorithmus vorgenommen. Diese Verbesserungen dienen in erster Linie der Erhöhung der Softwarerobustheit und einer weiteren Rechenzeitreduktion.

***Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable***

1. Softwaremodul: Online-Trajektorienplanung
2. Datenschnittstelle zur Trajektorienvisualisierung

***Vollständig erbracht.***

***Außerplanmäßig erfolgte die Entwicklung des Softwaremoduls „Prädiktor der Fremdschiffsbewegung“.***

### **2.1.8 Entwicklung des interaktiven Dashboards (AP5000)**

Zur Visualisierung der Navigations- und Trajektorien Daten liegt der Schwerpunkt in AP5000 auf der Toolentwicklung einer Mensch-Maschinen-Schnittstelle auf dem Steuerstand und der Leitstelle am Fernsteuerzentrum. Dafür hat die RWTH zwei Softwaremodule entwickelt: Eine Kartenanzeige und ein FernBin-Dashboard.

Die Kartenanzeige wurde entwickelt, um die Navigationslösung und andere optische Sensoren, z. B., Kamerabilder, darzustellen. Dieses Softwaremodul wurde im Steuerhaus des Testschiffs eingesetzt, damit eine bessere Übersicht bei der Schiffsfahrt für die Schiffsbesatzung zur Verfügung gestellt wird. Abbildung 31 stellt einen Screenshot der Kartenanzeige während einer Messfahrt dar. Die Entwicklung der Kartenanzeige erfolgt durch eine Erweiterung der Open-Source Software „MapViz“ in C++ und Robot Operating System<sup>8</sup>.

Zusätzlich wurde ein Dashboard zum Visualisieren aller Navigationsdaten und zur Realisierung einer Interaktion zwischen dem Trajektorienplaner und dem Schiffsführer im Fernsteuerzentrum entwickelt. Da das Dashboard an unterschiedlichen Rechenplattformen (PC, Tablett etc.) in Betrieb genommen werden sollte, erfolgt eine webbasierte Entwicklung des Dashboards. Somit kann die Benutzerschnittstelle in jedem beliebigen Webbrowser aufgerufen werden. Für die Implementierung

---

<sup>7</sup> <https://swri-robotics.github.io/mapviz/>

<sup>8</sup> <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>

wurde eine Vorlage aus Vue.js<sup>9</sup> genommen. Das Frontend des Dashboards wurde mit der Programmiersprache Javascript entwickelt, während das Backend auf Basis von Flask<sup>10</sup> in Python umgesetzt wurde. Ein OPC-UA-Client befindet sich im Backend des Dashboards, um die Daten zwischen dem Dashboard und dem Testschiff auszutauschen. Abbildung 32 zeigt die Startseite des Dashboards, wo der Benutzer zwischen der Leitstelle und dem Steuerstand ein Interface wählen kann. Außerdem stehen andere Bedienelemente an der Sidebar zur Verfügung.

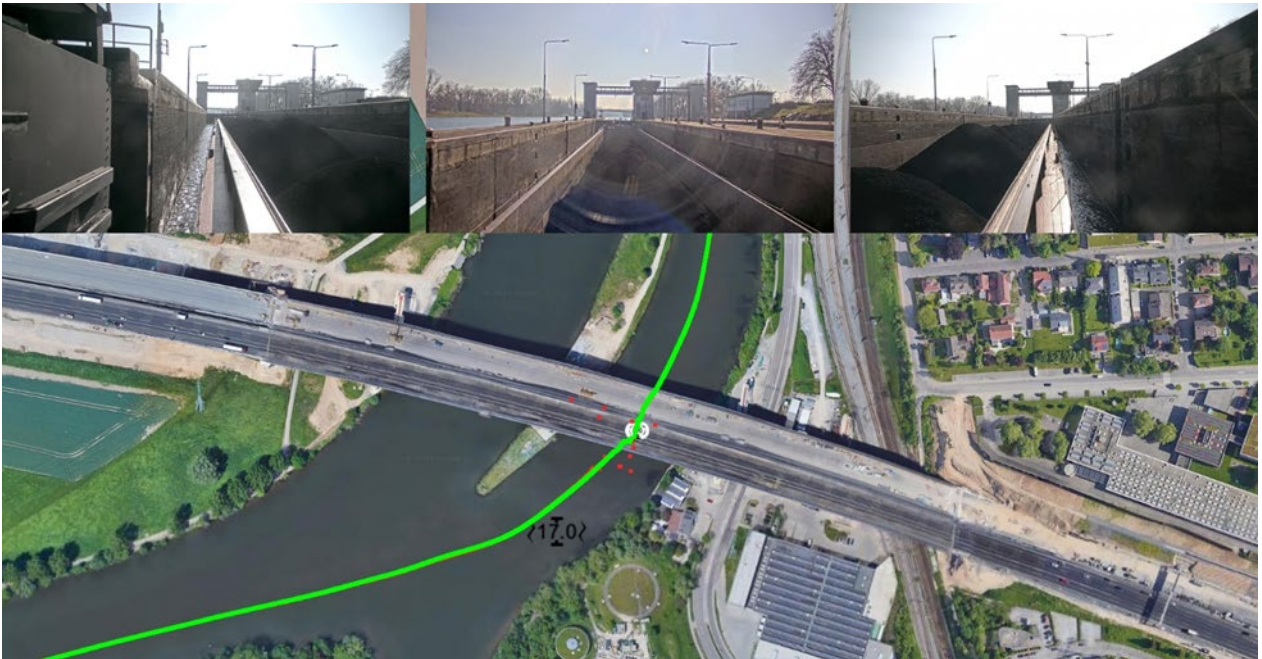


Abbildung 30: Kartenanzeige der Navigationslösung mit Kamerabildern. Rot: GNSS-Messdaten, Grün: Schiffsposition aus dem Navigationsfilter.

---

<sup>9</sup> <https://www.creative-tim.com/templates/vuejs>

<sup>10</sup> <https://flask.palletsprojects.com/en/3.0.x/>



Abbildung 31: Startseite des FernBin-Dashboards

Die interaktive Benutzerschnittstelle am Steuerstand aus einer Messfahrt mit der Live-Übertragung ist in Abbildung 33 dargestellt. Eine eingebettete Kartendarstellung zeigt die geplanten Trajektorien (in Orange) des Testschiffs (in Blau) mit anderen Verkehrsteilnehmern (in Rot) in der Mitte des Dashboards an. An der linken und rechten Seite befinden sich die Tachometer, um den Automatisierungsmodus (manuell, ferngesteuert und vollautomatisiert) und die Schiffszustände (Geschwindigkeit, Motordrehzahl etc.) darzustellen.



Abbildung 32: Benutzerschnittstelle des Dashboards am Steuerstand

**Durchführung des Arbeitspaketes:** Im Rahmen des AP5000 wurde das Fernsteuerzentrum auf der Landseite für das Projekt erweitert und entwickelt. Dafür hat die RWTH eine zentrale Lösung mit einem FernBin-Dashboard zum Visualisieren und zur Bedienung der Automatisierungsfunktion entwickelt. Allerdings musste bei der Durchführung des AP5000 mit einer längeren Verzögerung aufgrund des Cyber-Angriffs an der Universität Duisburg-Essen gerechnet werden, damit das gesamte AP5000 seitens der RWTH in 10/2023 abgeschlossen war.

### **Bezugnehmend auf den Antrag wurde das Deliverable**

1. Softwaremodul: Kartenanzeige
2. Softwaremodul: Dashboard

**vollständig erbracht.**

### **2.1.9 Abschlussdemonstration (AP10600)**

Für die Abschlussdemonstration hat das Projektkonsortium beschlossen, die Projektergebnisse sowohl auf der Nationalen Maritimen Konferenz (NMK) 2023, Bremen als auch im Rahmen einer Abschlussdemonstration zu präsentieren.

**Auftritt auf der NMK:** Für den Auftritt auf der NMK hat das Projektkonsortium eine Live-Demonstration der Fernsteuerung in Bremen aufgebaut. Das Testschiff „Ernst-Kramer“ befand sich am Duisburger Hafen und wurde von Bremen ferngesteuert. Die RWTH präsentierte die Ergebnisse der Navigations- und Trajektorienplanungsmodule auf dem IRT-Dashboard (siehe Abschnitt 2.1.8). Das Navigationsfilter lieferte live die Lokalisierungslösung des Schiffes, die von den anderen Modulen für die Fernsteuerung des Schiffes inklusive der Trajektorienplanung verwendet wurde. Das Trajektorienplanungsmodul wurde hierbei im Open-Loop-Modus in Abhängigkeit der aktuellen Schiffsposition im Duisburger Hafen betrieben. Dabei wurden die Trajektorien online generiert, es fand jedoch kein Eingriff in die Schiffssteuerung statt. Abbildung 34 zeigt den aufgebauten Fernsteuerstand mit dem IRT-Dashboard auf einem Touch-Screen.



Abbildung 33: Fernsteuerstand mit dem RWTH-Dashboard (unten links) auf der NMK.

**Abschlussdemonstration:** Außerdem wurde eine Veranstaltung zum Projektabschluss vom Projektkoordinator DST organisiert. Die Veranstaltung fand am 21 März 2024 in Duisburg statt. Von Seite der RWTH wurde eine Abschlusspräsentation vorbereitet, wo die Meilensteine der Projektarbeit, wichtigste Aspekte der entwickelten Methoden sowie erzielte Ergebnisse dargestellt und erläutert wurden.

## **2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Zum Erreichen der Projektziele wurde die RWTH Aachen in den Positionen *Personalmittel*, *Sachkosten- und Investitionen* und *Reisemittel* gefördert.

*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. Die coronabedingte Verschiebung von der experimentellen Erprobung hin zur simulativen Erprobung hat nicht zu einer Reduktion des notwendigen Personaleinsatzes geführt, sondern im Gegenteil in vielen Bereichen zu einem Mehraufwand geführt. Auch die intensiven Testkampagnen zum Schluss des Projektes hin, haben einen substanziellen Zeitaufwand verursacht. Neben wissenschaftlichen Mitarbeitenden wurden über die Projektlaufzeit hinweg studentische Hilfskräfte eingesetzt. Diese konnten in verschiedensten Bereichen des Projekts intensiv unterstützen und haben maßgeblich zum Erfolg des Projektes beigetragen.

*Sachkosten- und Investitionen* entstanden primär durch die Umrüstung und messtechnische Ausstattung des Testschiffs „Ernst-Kramer“. Der größte Posten aus diesem Bereich war das Dual-Antennen-GNSS-System. Dieses Setup war zwingend notwendig, um die hohen Präzisionsanforderungen an die Sensorfusion zu erfüllen (vgl. Kapitel 2.1.4). Außerdem wurden eine inertielle Messeinheit (IMU) und ein 5G Mobilfunkrouter nach der Genehmigung und Umwidmung des Projektträgers außerplanmäßig beschafft. Die IMU ist notwendig, um eine Multi-Sensor-Fusion für die hochgenaue Navigationslösung zu ermöglichen, während der 5G Router zur Robustifizierung der Internetverbindung zwischen dem Testschiff und dem Fernsteuerzentrum eine wichtige Rolle gespielt hat.

*Reisemittel* wurden primär für die häufige Anreise während der Hardwareausrüstung und -tests verwendet. Außerdem wurden die Reisemittel auch für die Vorbereitung und Teilnahme der nationalen maritimen Konferenz und Projekttreffen ausgegeben. Zum Präsentieren der wissenschaftlichen Publikationen haben die Reisemittel die Kosten mehrerer internationalen Reise inklusive der Teilnahmegebühr abgedeckt.

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Eine Fernsteuerung der Binnenschiffe mit fortgeschrittenen Assistentenfunktionen bietet große Potenziale, um Personal zu entlasten, dem Fachkräftemangel zu begegnen sowie die Energieeffizienz und Sicherheit von Schiffen zu steigern. Um diese Potenziale nutzbar zu machen und diese Entwicklungen in die deutsche Industrie zu integrieren, müssen anwendungsnahe Forschungs- und Entwicklungsprojekte in enger Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft

durchgeführt werden. Insbesondere ist es dabei wichtig, von der simulativen Validierung und der Umsetzung im kleinen Maßstab in den Bereich der für die Industrie relevanten Anwendungen zu kommen. Dieser Aspekt wurde in FernBin für Binnenschiffahrten in einem herausfordernden und realitätsnahen Testszenario adressiert.

Dazu wurden Ansätze aus der Literatur auf Basis der RWTH-eigenen Expertise weiterentwickelt und auf einen industriell relevanten Versuchsträger übertragen. Im Zuge dessen wurde die Expertise der regelungstechnischen Community für die Projektpartner nutzbar gemacht. Zu den technischen Entwicklungen im Projekt konnte die RWTH im Rahmen des Projektes FernBin einen wichtigen Beitrag leisten, in dem es ein robustes Navigationsfilter integrierte, eine Trajektorienplanung unter Berücksichtigung von dynamischen Hindernissen entwickelte und ein hochgenaues Regelungsverfahren implementierte. Die Kombination der entwickelten Verfahren mit den Beiträgen der Projektpartner ermöglicht eine weitgehend assistierte Schiffführung im Kontext eines ferngesteuerten Binnenschiffs. Durch die entwickelten Verfahren wurden die im Projektantrag definierten wissenschaftliche und Arbeitsziele erfüllt, bzw. alternative Lösungen mit gleicher Wertigkeit gefunden.

Die gewährte Zuwendung für die RWTH im Rahmen des Förderprojekts FernBin war notwendig, da für das Vorhaben mit Ausnahme der vorhandenen Grundausstattung keine Mittel aus der Grundfinanzierung zur Verfügung standen, die für das Forschungsprojekt eingesetzt werden konnten. Der finanzielle und zeitliche Aufwand für das Vorhaben lag im Bereich dessen, was für vergleichbare Forschungsvorhaben üblich ist. Es wurde ein hoher Versuchsaufwand betrieben und umfangreiche Tests sowohl in der Simulation als auch im realen Experiment auf dem Rhein durchgeführt. Dies ermöglichte es der RWTH, ihre Expertisen in den Themenfeldern Navigationslösung, Regelung und Trajektorienplanung für maritime Anwendungen auszubauen. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden in Berichten und Projektdokumenten dokumentiert und mittels Veröffentlichungen und wissenschaftlichen Publikationen Dritten zugänglich gemacht. Des Weiteren ergaben sich bereits eine Vielzahl von Anknüpfungspunkten mit der Industrie in Form von gemeinsamen Projektanträgen. Es lag kein außergewöhnlicher Personalaufwand vor.

Das Risiko der Entwicklung wurde während der Projektlaufzeit an vielen Stellen deutlich. Bei der Hardwareausrüstung am Testschiff mussten vielfältige Sensoren und Rechenhardware sowie Netzwerkgeräte mitberücksichtigt werden, die an vielen Stellen aufgrund der spezifischen Montage und Kommunikationsprobleme Unwägbarkeiten geschafft haben. Außerdem ließ sich eine längere Verzögerung wegen eines Werftaufenthalts des Testschiffs nach einem Wasserschaden nicht vermeiden. Auch die experimentelle Umsetzung konnte teils erheblich aufgrund der fehlenden Betriebsgenehmigung eines ferngesteuerten Binnenschiffs eingeschränkt verfolgt werden, was nur

dank des Engagements des Projektteams nicht zu einem mangelhaften Projektfortschritt geführt hat.

## **2.4 Einschätzung der Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Umsetzung der im Antrag genannten Verwertungsabsichten dokumentiert. Dabei ist zu beachten, dass die RWTH als Universität zu rein wissenschaftlichen Zwecken am Vorhaben beteiligt ist und keine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse anstrebt. Dennoch ist aufgrund der Veröffentlichung der Projektergebnisse und der engen Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein positiver Einfluss auf zukünftige Entwicklungen und konkrete Produkte zur weiteren Automatisierung in der Binnenschifffahrt zu erwarten.

Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Projektergebnisse sind Teil des Verwertungsplans und werden hier gesondert in Abschnitt 2.6 dargestellt. Schutzrechte wurden von der RWTH keine angemeldet und es sind auch zukünftig keine Anmeldungen geplant.

### **Einbindung in Lehrveranstaltungen (ab +1 Jahr nach Projektende)**

Laut Antrag: Die RWTH wird die entwickelten Verfahren zur Navigation und geregelten Automatisierung von Binnenschiffen in die Lehre einbringen und damit die Thematik jungen Akademikern nahebringen. Die im Projekt generierte Expertise und Algorithmenentwicklung ist in der Lehrveranstaltung „Navigation & Sensorfusion in der Regelungstechnik“ eingeflossen.

Die Lehrveranstaltung gibt einen Überblick über Methoden und Ansätze zur Navigation als Grundlage für eine zukünftige autonome Mobilität. Hierzu zählen die absolute, auch genannt georeferenzierte, Positionsbestimmung mittels Satellitennavigation, die Nutzung von bordeigenen Sensoren und die Bestimmung einer Navigationslösung durch Ansätze der Sensorfusion. Aspekte der Datenintegrität im Überblick und die Vorstellung verkehrsträgerübergreifender Anwendungen sind ebenfalls Bestandteil der Lehrveranstaltung.

In der Lehrveranstaltung wird seit dem Wintersemester 2021/2022 ein Überblick über Faktor-Graph-basierte Zustandsschätzung und über das Odometrie-gestützte Navigationsfilter gegeben.

### **Zusammenarbeit mit Industrie (+1 bis +2 Jahre nach Projektende)**

Laut Antrag: Die robuste und integre Lokalisierung und Sensorfusion für Automatisierungsaufgaben wird in der Industrie mit großem Interesse beobachtet und findet mehr und mehr Berücksichtigung

*in neuen Anwendungen. Hierzu kontaktiert die RWTH parallel zum Projekt potenzielle Interessenten aus der Industrie, um entsprechende Industrieprojekte zu akquirieren.*

Neben der aktiven Teilnahme an verschiedenen Begleitforschungsmaßnahmen (z. B. der „BinSmart“ Arbeitsgruppe Automation) oder den Treffen der Deutschen Gesellschaft für Navigation, fanden verschiedene andere Akquisetreffen mit interessierten Vertreter\*innen der Industrie statt. Die RWTH hat im Rahmen dieser Begleitforschung zwei Beiträge in Bezug zum Forschungsvorhaben im FernBin geleistet:

- 2021-09-17 Beitrag mit dem Titel „LiDAR-Technologie in der Binnen- und Seeschifffahrt – Methoden, Forschungsfragen und Entwicklungsbedarfe“ von Haoming Zhang
- 2022-02-18 Beitrag mit dem Titel „Zustandsschätzung und Multi-Objekt-Tracking“ von Jiaying Lin

Außerdem wurden mit verschiedenen Firmen Projektideen entwickelt und gemeinsame Forschungsprojekte angestoßen, die auf den Entwicklungen in FernBin basieren. Dazu fand ein Forschungsaustausch zum Thema Nahfeldsensorik und Objektklassifikation mit TITUS Research in 10/2021 und zum Thema „Robust model-based trajectory-tracking control for vessels“ mit der Firma „MathWorks“ in 01/2022 statt.

Zusätzlich sind auch verschiedene Direktbeauftragungen aus der Industrie geplant, die unmittelbar aus der Sichtbarkeit des Vorhabens und dem Erfolg der entwickelten Konzepte resultieren.

### **Akquise neuer Forschungsprojekte (+1 bis +3 Jahre nach Projektende)**

*Laut Antrag: Basierend auf den Projektentwicklungen ergeben sich automatisch Anknüpfungspunkte zur Überführung auf ein größeres Gesamtsystem und auf andere Verkehrsträger. Die entsprechenden Themen bergen viel Potenzial für Weiterentwicklungen, aber auch für Grundlagenforschung. Die Akquise neuer Forschungsprojekte erstreckt sich hierbei sowohl auf die Binnenschifffahrt als auch auf maritime Anwendungen.*

Durch die Erfolge bei der Schiffsautomatisierung und die vielfältigen erreichten Veröffentlichungen wurde die wissenschaftliche Position der RWTH Aachen im Bereich der Schifffahrt nachhaltig gestärkt. Gleichzeitig haben sich mehrere Forschungslücken ergeben, welche zukünftig aufbauend auf den Projektergebnissen erforscht werden können.

Ein Anschlussvorhaben mit der gleichen Forschungsfragenstellung zur hochgenauen Navigationslösung wurde das Verbundprojekt autoFerry im Jahr 2022 akquiriert und 2023 nach der Begutachtung der Fachexperte genehmigt. Mit der im FernBin gebrachten Initiative an der Navigationslösung wird die Multi-Sensor-Fusion im Projekt autoFerry um eine visuelle Odometrie erweitert, die die Daten aus dem flexiblen und wirtschaftlichen Kamerasystem zur Bestimmung der Schiffsbewegung benutzt. Auch eine grundlegende Anpassung der Trajektorienplanung wird durch das unterschiedliche Fährgebiet notwendig. An vielen Stellen kann jedoch auf den Vorarbeiten aus

FernBin aufgebaut werden, insbesondere bei der Schiffsregelung und Trajektorienplanung, der Navigationslösung sowie der Umsetzung von Nutzerschnittstellen.

Das Projekt SafeBin „Sichere Automatisierung für den Einsatz in der Binnenschifffahrt“ RWTH-Teil Antrag: „Entwicklung von Methoden zur echtzeitfähigen Risikoabschätzung und Risikobewältigung für hochautomatisierte und autonome Binnenschiffe“, das bereits Ende 2022 gestartet ist, baut auf verschiedenen Forschungslücken auf, die sich in FernBin gezeigt haben. Speziell die Sicherheit der Regelungs- und Planungsalgorithmen steht hier im Vordergrund.

Im Projekt VERA „Virtuelles Testfeld VeLABi – Datengrundlagen, Infrastrukturen und Technologien für virtuelle Erprobungen von Automatisierungsfunktionen“. RWTH-Teil Antrag: „Realitätsgetreue Nachbildung Sensor-generierter Daten in der Simulationsumgebung und Vernetzung von Simulatoren“ wird die Expertise in der simulativen Erprobung von Automatisierungsfunktionen aufgegriffen und erweitert.

Im Projekt MuSEAS mit dem Industriepartner aus der Begleitforschung lag das Ziel zur Multi-Sensor-Datenerhebung mit Annotation aus den Bundeswasserstraßen. Die RWTH überträgt die Expertise mit der GNSS-basierten Positionierung und Multi-Sensor-Fusion aus FernBin in neues Projekt und entwickelt eine online optimierungsbasierte Navigationslösung.

Die RWTH hat zudem mit dem FernBin Konsortium im Sommer 2024 eine Projektinitiative im maritimen Forschungsprogramm und eine im DTW III Programm eingereicht. Mit einem neuen Konsortium wurde zudem im Sommer 2024 eine Initiative im DTW III Programm eingereicht, welche von Erfahrungen aus FernBin profitiert. Die eingereichten Initiativen werden zum Verfassungszeitpunkt begutachtet.

## **2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt vonseiten Dritter**

Während der Projektlaufzeit sind zwei Projekte von Dritten mit bestehenden Versuchsschiffen, für die umfangreiche Automatisierungsfunktionen geplant oder bereits entwickelt sind, bekannt geworden. Die am Ende von Abschnitt 1.4 angegebene Forschungslücke bleibt davon unberührt.

Das Forschungsprojekt KoliBRI [15], gestartet ab dem 01.10.2022, fokussiert die Kollisionsvermeidung in der Binnenschifffahrt mithilfe der Integration des Radarsystems und weiterer Sensorik. Im Projekt wird das Binnenschiff „Niedersachsen“ mit dem industriellen Sensorsystem „Sentrys“ ausgerüstet. Im Gegensatz zur Algorithmenentwicklung für die Navigationslösung und autonome Schiffsführung wird die weiter verarbeitete Karteninformation mit Kollisionsobjekte, Wasserstand etc. als das anzustrebende Projektergebnis betrachtet, die für die Anpassung der Sollbahn eines automatischen Bahnführungssystems eine große Rolle spielt.

Das Schubschiff „Herkules VIII“ wurde in dem Forschungsprojekt „EcoBin“ [16] mit modernen Automatisierungssystemen ausgerüstet, um die Fahreffizienz mittels neuartigen Optimierungsverfahren und eines Verbrauchsmonitorings der Binnenschifflotte zu erhöhen. Dazu wird ein Bahnführungsassistenzsystem für die Fahrt auf Fließgewässern unter Berücksichtigung der Ankunftszeit, der Fahrdynamik und externen Störeinflüsse im Wasserverkehr entwickelt.

## 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse (3 Seiten)

### Studentische Arbeiten (ab 2 Jahre vor Projektende)

Laut Antrag: Die RWTH plant, basierend auf den Methoden und Entwicklungen im Projekt mindestens eine Bachelor- und eine Masterarbeit durchzuführen.

Im Rahmen der Projektdurchführung wurden die folgenden Studentenarbeiten betreut. Die Ergebnisse dienten als richtungsweisend für viele Projektentscheidungen.

- Xiao Xia: „Factor Graph Optimierung für die Lokalisierung mit eng-gekoppelten Fusion von GNSS/INS auf einer Zeit-kontinuierlichen Trajektorie“, MA, 2021.
- Yi-Jyun Wu: “Evaluate direct Visual-Inertial-Odometry method for enhanced GNSS/INS navigation in temporarily GNSS-denied environment for inland shipping”, 2022.
- Lars Lünemann: “Online Factor Graph Optimization with Carrier-Phase Aided GNSS/INS Integration for Continuous-Time Trajectory Estimation”, MA, 2022.
- Markus Moser: „Nichtlineare Modellprädiktive Regelung für die Pfadfolgeregelung in der Binnenschifffahrt“, MA, 2022.
- Felix Widmayer: „Online Learning of Non-Gaussian GNSS Noise Distributions using Mixture Models and Variational Inference“, MA, 2022.
- Zhanxin Wang: “Learning-based NLOS Detection and Uncertainty Estimation of GNSS Observations with Self-Attention Enhanced LSTM Network”, MA 2023
- Wei Zheng: “Constraint-Manifold UKF for robust Vessel Localization with Dual-Antenna-GNSS Observation
- Jiandong Chen: “SuperVIO: Deep-Learning enhanced visual odometry for large-scale and challenging environments”
- Chenyi Xu: “Robuste Fehlermodellierung der GNSS-Beobachtungen zur konsistenten Fahrzeuglokalisierung in herausfordernden Umgebungen”, 2023
- Shiping Ma: „Entwicklung einer unsicherheitsbewussten LIDAR-Odometrie unter Verwendung von Stein-Variations-ICP zur konsistenten Stadtllokalisierung“, 2023

### Veröffentlichungen (-2 bis +1 Jahre)

Laut Antrag: Die RWTH wird regelmäßig fachliche Konferenzvorträge halten.

Das IRT war an den folgenden, im Projekt FernBin entstandenen, Veröffentlichungen beteiligt:

- M. Huang, M. Kosch, J-J, Gehrt, R. Zweigel, D. Abel, “Application of Recent GNC Approaches for Automation in Shipping,” abstract in Autonomous Inland & Short Sea Shipping (AISS), 2021

- M. Huang, M. Kosch, J-J, Gehrt, R. Zweigel, D. Abel, "Application of Recent GNC Approaches for Automation in Shipping," abstract in Autonomous Inland & Short Sea Shipping (AISS), 2021
- H. Zhang, X. Xia, M. Nitsch and D. Abel, "Continuous-Time Factor Graph Optimization for Trajectory Smoothness of GNSS/INS Navigation in Temporarily GNSS-Denied Environments," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 4, pp. 9115-9122, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3189824.
- M. Huang and D. Abel, "A\*-guided Incremental Sampling for Trajectory Planning of Inland Vessels in Narrow Ship Canals," 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Aachen, Germany, 2022, pp. 658-663, doi: 10.1109/IV51971.2022.9827320.
- M. M. Moser, M. Huang and D. Abel, "Model Predictive Control for Safe Path Following in Narrow Inland Waterways for Rudder Steered Inland Vessels\*," 2023 European Control Conference (ECC), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/ECC57647.2023.10178205.
- H. Zhang, Z. Wang and H. Vallery, "Learning-based NLOS Detection and Uncertainty Prediction of GNSS Observations with Transformer-Enhanced LSTM Network," 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 2023, pp. 910-917, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10422672.
- H. Zhang, C-C. Chen, H. Vallery and T. D. Barfoot, GNSS/Multi-Sensor Fusion Using Continuous-Time Factor Graph Optimization for Robust Localization, *IEEE Transactions on Robotics*, doi: 10.1109/TRO.2024.3443699

### **Dissertation (ab +3 Jahren nach Projektende)**

Laut Antrag: *Die methodischen Entwicklungen und regelungstechnischen Ansätze dienen als wissenschaftliche Grundlagen für eine dem Projekt nachgelagerten Dissertation.*

- H. Zhang (2024): Handling Outliers in Factor Graph for Vehicle Localization, Dissertation

## 2.7 Quellenverzeichnis:

- [1] UNCTAD, „Review on maritime Transport,“ United Nations Publication, Genf, Schweiz, 2015.
- [2] Cahoon, S. ; Haugstetter, H.: Shipping, shortages and generation Y. In: *Proceedings of the Maritime Technology and Training conference (MarTech)*. 2008, pp. 13–14.
- [3] *Resolution MEPC.304(72) – Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. London, United Kingdom: International Maritime Organization (IMO), The Marine Environment Protection Committee, Apr. 13, 2018.
- [4] Kadow, U. ; Heinrich, J. ; Khanna, R., et al.: *Safety and Shipping – Review 2022*. Munich, Germany: Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS), May 1, 2022.
- [5] Forschungsprojekt AutoBin: <https://www.autobin.de/>, Zugriff am 06.08.2024
- [6] Forschungsprojekt AKOON: <https://www.irt.rwth-aachen.de/cms/irt/forschung/forschungsprojekte-dyn-liste/a-c/~cnzsr/akoon/> , Zugriff am 06.08.2024
- [7] Forschungsprojekt VeLABi: <https://www.velabi.de/>, Zugriff am 06.08.2024
- [8] Groves, P.: Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition, Artech House
- [9] J.J. Gehrt, S. Liu, M. Nitsch, W. Bruhn, S. Rohde, R. Zweigel, D. Abel: Robust and Reliable Multi-Sensor Navigation Filter for Maritime Application, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 2, 2020, Pages 14482-14487, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1450>
- [10] Wang, W. ; Shan, T. ; Leoni, P., et al.: Roboat II: A Novel Autonomous Surface Vessel for Urban Environments. In: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Oct. 2020, pp. 1740–1747. doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340712.
- [11] M. Nitsch, J.-J. Gehrt, R. Zweigel und D. Abel (2021): „Tightly Coupled INS/GNSS Navigation Filter for the Automation of a River Ferry“. In: Proceedings of the 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS).
- [12] Liu, Shuchen, Gehrt, Jan-Jöran, Abel, Dirk, Zweigel, René, "Dual-Constellation Aided High Integrity and High Accuracy Navigation Filter for Maritime Applications," Proceedings of the 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Reston, Virginia, January 2019, pp. 762-774. <https://doi.org/10.33012/2019.16723>
- [13] J. -B. Lacambre, M. Narozny and J. -M. Louge: "Limitations of the unscented Kalman filter for the attitude determination on an inertial navigation system," *2013 IEEE Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting (DSP/SPE)*, Napa, CA, USA, 2013, pp. 187-192, doi: 10.1109/DSP-SPE.2013.6642588.

- [14] M. A. Abkowitz, "Lectures on ship hydrodynamics—steering and manoeuvrability," *Tech. Rep.*, 1964
- [15] Forschungsprojekt KoliBri: <https://argonav.de/forschungsprojekte/>, Zugriff am 06.08.2024
- [16] Forschungsprojekt EcoBin: <https://www.smartshipping.info/ecobin/> , Zugriff am 06.08.2024
- [17] Porathe, Thomas, Burmeister, Hans-Christoph, Rødseth, Ørnulf Jan. "Maritime unmanned navigation through intelligence in networks: The MUMIN project." , *12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, COMPIT 2013*, 2013.
- [18] Forschungsprojekt AAWA, <https://www.utu.fi/en/university/turku-school-of-economics/ccr/research-projects/aawa> , Zugriff am 06.08.2024
- [19] Forschungsprojekt AAWA, <https://www.offis.de/offis/projekt/mtcas.html> , Zugriff am 06.08.2024
- [20] C. Wilt, W. Ruml, "When Does Weighted A\* Fail?", *Proceedings of the 5th Annual Symposium on Combinatorial Search, SoCS 2012*, 2012, pp. 137-144. doi: 10.1609/socs.v3i1.18250.