

Universität Rostock  
Institut für Automatisierungstechnik (IAT)  
Lehrstuhl Regelungstechnik  
Richard-Wagner-Str. 31 / Haus 8  
18119 Rostock

**Verbundvorhaben „Autonome elektrische Schifffahrt auf  
Wasserstraßen in Metropolregionen“**

Teilvorhaben  
**SWARM-Control, Echtzeit-Trajektorienoptimierung  
und Folgeregelung auf befahrenen Binnengewässern für autonome Wasserfahrzeuge**

**01.09.2019 - 15.10.2022**

Schlussbericht im Auftrag des Projektträgers Jülich (PTJ)

**Forschungsschwerpunkt:  
MARITIM.smart**

**Forschungsprogramm:  
Maritimes Forschungsprogramm**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03SX485F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**April 2023**

Zusammengestellt von:

**Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch  
Dr.-Ing. Björn Kolewe  
Dr.-Ing. Tobias Hahn  
M. Sc. Robert Damerius**

## **A B S C H L U S S B E R I C H T**

Projekt

Systematischer Entwurf eines Regelsystems zur Bahnverfolgung für Binnenschiffe auf eng begrenzten und stark befahrenen Gewässern sowie die Echtzeit-Trajektorienoptimierung auf Grundlage der Seekarten und unter

	Berücksichtigung lokal erkannter beweglicher und feststehender Hindernisse sowie anderer Wasserfahrzeuge.
Kurzname	SWARM-control
Zuwendungs-Empfänger	UNIVERSITÄT ROSTOCK 18055 Rostock
Ausführende Stelle	UNIVERSITÄT ROSTOCK <ul style="list-style-type: none"> <li>• Institut für Automatisierungstechnik (IAT)</li> </ul>
Projektlaufzeit	01.09.2019 - 15.10.2022
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch
Projekträger	Projekträger Jülich der Forschungszentrum Jülich GmbH
Förderung	Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Förderkennzeichen	03SX485F
Zuwendungsbescheid	vom 30.08.2019
Änderungsbescheide	vom 09.12.2019, 13.07.2022
Mitarbeiter	Dr.-Ing. Tobias Hahn M. Sc. Robert Damerius M. Sc. Ian Karez M. Sc. Johannes Marx Dr. Rudy Cepeda-Gomez

## Gefördert und unterstützt durch:

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Inhalt

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>5</b>
	ZIELE DES TEILVORHABENS .....	5
<b>2</b>	<b>PROJEKTFÜHRUNG (KURZDARSTELLUNG) .....</b>	<b>6</b>
2.1	AUFGABENSTELLUNG .....	6
2.1.1	<i>Bahnfolgeregelung für Binnenschiffe.....</i>	6
2.1.2	<i>Echtzeit-Trajektorienoptimierung mit lokaler Kollisionserkennung.....</i>	6
2.1.3	<i>Simulative und Experimentelle Überprüfung der Konzepte und Algorithmen.....</i>	7
2.2	VORAUSSETZUNGEN, RAHMENBEDINGUNGEN .....	8
2.3	PLANUNG, ABLAUF .....	9
2.4	STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	9
<b>3</b>	<b>WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE .....</b>	<b>12</b>
3.1	AP 2 POSITIONSERKENNUNG FERNFELD.....	12
3.2	AP 3 POSITIONSERKENNUNG NAHFELD.....	13
3.3	AP 4 WIND, STRÖMUNG, GEWÄSSERTOPOGRAFIE.....	16
3.4	AP 5 DYNAMIC MOTION SYSTEMENTWICKLUNG .....	18
3.4.1	<i>AP 5.a Modellierung und Simulation des Bewegungsverhaltens.....</i>	18
3.4.2	<i>AP 5.b Entwurf einer Regelung zur Trajektorienverfolgung und Störungsausregelung</i>	27
3.4.3	<i>Erweiterung des Regelsystems um eine Trajektorienfolgeregelung.....</i>	34
3.4.4	<i>AP 5.c Sensordatenfusion und Störgrößendifferenzierung.....</i>	36
3.4.5	<i>AP 5.d Allokation und Stellgrößengenerierung .....</i>	44
3.4.6	<i>AP 5.e Schnittstellendefinition Antriebe.....</i>	46
3.5	AP 7 ENTWICKLUNG EINES TRAJEKTORIENKORREKTURSYSTEMS.....	47
3.5.1	<i>AP 7.a Analyse und Konzepterstellung .....</i>	47
3.5.2	<i>AP 7.b Erstellung einer Simulations- und Testumgebung für Bewegungsplanung.....</i>	65
3.5.3	<i>AP 7.c bis AP 7.h Trajektoriengenerierung .....</i>	74
3.6	AP 11 LABORERPROBUNG IN DER SCHLEPPRINNE.....	75
3.6.1	<i>AP 11.a Aufbau und Erprobung eines Steuerungssystems für die Prototypenentwicklung</i>	75
3.6.2	<i>AP 11.b Validierung und praktische Erprobung der Ergebnisse durch Modellversuche in der Schlepprinne .....</i>	78
3.7	AP 12 FREIFELDVERSUCHE IM REALLABOR .....	84
3.7.1	<i>AP 12.a Weiterentwicklung des Prototypensystems für den Einsatz im Reallabor.....</i>	84
3.7.2	<i>AP 12.b Modellversuche im Erprobungsgebiet.....</i>	88
<b>4</b>	<b>VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>98</b>
4.1	VERWERTUNGSPLAN MIT ZEITHORIZONT .....	98
<b>5</b>	<b>BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET VON ANDEREN STELLEN.....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>101</b>
6.1	JOURNAL-BEITRÄGE .....	101
6.2	KONFERENZ-BEITRÄGE.....	101
6.3	STUDENTISCHE ARBEITEN .....	101

6.4	SONSTIGES.....	101
	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>106</b>

# 1 Zusammenfassung

Ziel des Verbundvorhabens war die Erforschung und Entwicklung von Technologien, die den Anforderungen für den autonomen Betrieb von elektrisch angetriebenen Wasserfahrzeugen auf Binnenwasserstraßen begegnen. Die Anforderungen betreffen sowohl die Echtzeit-Trajektorienplanung auf dem stark begrenzten Raum von Flüssen, Kanälen und Schleusen, als auch das möglichst präzise Abfahren dieser Trajektorie unter Einflüssen wie Strömungen, Untiefen, Wind und Begegnungsverkehr, die besonderen Herausforderungen auf den Binnenwasserstraßen darstellen. Es wurden sowohl die technologischen Anforderungen an das Wasserfahrzeug selbst betrachtet aber auch die technologischen Anforderungen hinsichtlich der Infrastruktur, Kommunikation und Positionierung. Die Prozesse des An- und Ablegens sowie des Be- und Entladens waren in diesem ersten Schritt von untergeordneter Bedeutung, das Vorhaben sollte sich zuerst der Frage des autonomen Bewegens auf dem Wasser widmen. Hierbei war insbesondere die Frage der für eine sichere Navigation notwendigen Sensorik zu klären und ob diese autarke Navigation, abgesehen von einer Satellitenpositionierung, ohne weitere landgestützte Hilfsmittel möglich ist. In diesem Zusammenhang sollte die Notwendigkeit zusätzlicher Infrastruktur für einen sicheren autonomen Betrieb an der Wasserstraße erforscht werden.

Ein weiterer Aspekt war die Optimierung der Technologie hinsichtlich der Zielgrößen der möglichst genauen Positionierung und des möglichst geringen Einsatzes von infrastrukturellen Mitteln, um perspektivisch weder Verkehrssicherheit noch Marktfähigkeit zu gefährden. Als Ergebnis des Forschungsprojektes entsteht eine Technologie, die den autonomen und elektrifizierten Betrieb von Wasserfahrzeugen auf Binnenwasserstraßen im Bereich von Ballungsräumen ermöglicht. Die technische Machbarkeit wurde durch einen Demonstrator, bestehend aus zwei Versuchsträgern, nachgewiesen, die während des Projektes zur Erprobung der Zusammenführung der genutzten Technologien dienen. Die betrieblichen Aspekte wurden in Form von Nutzungskonzepten verdeutlicht und anhand eines konkreten Anwendungsfalls nachgewiesen.

## Ziele des Teilvorhabens

Das komplexe Gesamtziel des Verbundvorhabens setzt sich aus den untergeordneten Zielen der einzelnen Teilvorhaben zusammen. In den Teilvorhaben wurden innovative Ansätze und Methoden der einzelnen Verbundpartner aus verschiedenen Fachgebieten detailliert erforscht. Anschließend zielten die interagierenden Arbeitspakete auf die Zusammenführung, Umsetzung und Validierung der erforschten theoretischen Grundlagen ab. Die Gesamtevaluierung mündete in der Testung des geschaffenen Systems mit zwei Versuchsträgern in einem Gebiet der Spree-Oder-Wasserstraße.

Die Ziele des Teilvorhabens SWARM-control fokussierten sich auf den systematischen Entwurf eines Regelsystems zur Bahnverfolgung für Binnenschiffe auf eng begrenzten und stark befahrenen Gewässern sowie die Echtzeit-Trajektorienoptimierung auf Grundlage der Seekarten und unter Berücksichtigung lokal erkannter beweglicher und feststehender Hindernisse sowie anderer Wasserfahrzeuge.

## 2 Projektführung (Kurzdarstellung)

### 2.1 Aufgabenstellung

#### 2.1.1 Bahnfolgeregelung für Binnenschiffe

Die Bahnregelung von Schiffen auf Binnengewässern ist von diversen speziellen Anforderungen geprägt. Neben den begrenzten Platzverhältnissen zum Manövrieren sind Binnengewässer oft durch örtlich begrenzte Strömungsverhältnisse charakterisiert und in städtischen Regionen kommen böige Winde, Düseneffekte und Windabschattungen hinzu. Diese haben einen signifikanten Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Schiffes und stellen hohe Anforderungen an die Regelung. Weiterhin beeinflussen hydrodynamische, durch geringe Gewässertiefen verursachte Effekte das Schiff, was gegebenenfalls in den Regelungsalgorithmen berücksichtigt werden muss.

Ein Schwerpunkt dieses Vorhabens war die Erforschung von generischen Methoden zur Filtrierung und Vorsteuerung der auf das Schiff wirkenden wind- und strömungsinduzierte Störgrößen sowie deren frühzeitige Kompensation. Dies reduziert deren Einfluss auf den Versatz des Schiffes erheblich und ermöglicht das sichere Manövrieren an Engstellen, Schleuseneinfahrten und bei hohem Verkehrsaufkommen. Im Detail wurden folgende Teilziele verfolgt:

- Entwicklung von regelungstechnischen Modellstrukturen inklusive der Abbildung von binnengewässertypischen Störungen zur Nutzung im automatischen Entwurf der Regelungsparameter sowie in Echtzeitsimulationen innerhalb HiL-Tests des Gesamtsystems.
- Entwicklung geeigneter Filter zur Berücksichtigung der Sensordaten (Strömung, Wind, Gewässertiefe) bei der Positions- und Bewegungsbestimmung des Schiffes
- Untersuchungen zur Eignung von robusten und adaptiven Methoden zur Parametrierung des Reglers
- Entwicklung von Ansätzen und Entscheidungskriterien zur situationsabhängigen Umschaltung der Allokationsalgorithmen zwischen energieoptimaler Krafterzeugung und erweiterten Anforderungen im Rahmen von Präzisionsmanövern

#### 2.1.2 Echtzeit-Trajektorienoptimierung mit lokaler Kollisionserkennung

Fahrwege von Binnenschiffen sind in der Regel durch örtliche Gegebenheiten, die betonnte Fahrrinne und weiteren Seezeichen weitgehend vorgegeben bzw. sind fest geplant. Im realen Schiffsbetrieb sind jedoch aus verschiedenen Gründen Abweichungen von dieser Route notwendig. Typische Szenarien sind hier Ausweichvorgänge bei Schiffsbegegnungen bzw. bei festen oder mobilen Hindernissen im Fahrweg, wetterbedingte Abweichungen durch Wind und Strömung oder auch Nothaltemanöver in Gefahrensituationen.

Sind Abweichungen von der geplanten Route notwendig oder schon aufgetreten, muss eine neue Fahrtroute erstellt werden, die gewissen Anforderungen genügen soll. Diese wären:

- Die neue Route muss sicher und ohne weitere Hindernisse befahrbar sein. Dabei sollten neben den Seekartendaten auch Fahrwege anderer Wasserfahrzeuge und mobiler Hindernisse dem Zeithorizont der Planung entsprechend Berücksichtigung finden.
- Die neue Route soll möglichst energieeffizient sein, das heißt der Energiebedarf für die geplante Route sollte als Optimierungskriterium Eingang in die Trajektorienplanung finden.
- Die neu geplante Strecke soll in möglichst kurzer Zeit durchfahren werden können.

Die genannten Kriterien beeinflussen sich untereinander. Aufgabe der Trajektorienplanung ist es somit auch eine geeignete Wichtung der Kriterien zu finden. Ob diese Wichtung fest vorgegeben wird oder auf Grund der aktuellen Datenlage berechnet werden kann, war Gegenstand der Forschungsarbeit in diesem Teilprojekt.

Aus den genannten Anforderungen und Vorgaben ergeben sich im Detail folgende Teilziele:

- Entwurf einer Bewegungsprädiktion zur Bestimmung des voraussichtlichen Fahrwegs in einem bestimmten Zeithorizont
- Konzeption und Realisierung geeigneter Kollisionserkennungsalgorithmen für feststehende und mobile Hindernisse sowie anderer Wasserfahrzeuge.
- Entwicklung und Umsetzung eines Optimierungsalgorithmus zur energie- und zeitoptimalen Planung einer Trajektorie für einen vorgegebenen Zeithorizont oder zur Erreichung eines vorgegebenen Zielpunkts unter vorgegebenen Randbedingungen

### **2.1.3 Simulative und Experimentelle Überprüfung der Konzepte und Algorithmen**

Neben der Konzeption und Realisierung der Regelungsalgorithmen und Trajektorienoptimierung stand die simulative und experimentelle Validierung der Umsetzung als abschließendes Projektziel im Fokus. Im Detail sollten folgende Punkte erreicht werden:

- Simulative Überprüfung des Regelungssystems und der Trajektorienoptimierung an einer eigens geschaffenen Simulationsumgebung. Dies beinhaltet die Überprüfung und Bewertung der geschaffenen Systeme unter definierten und reproduzierbaren Anwendungs- und Störszenarien.
- Experimentelle Überprüfung an physischen Schiffsmodellen. Zur Validierung der aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse sollen Experimente mit maßstäblich kleinen Modellen im Versuchsbecken des Instituts für Automatisierungstechnik durchgeführt werden. Hier kann mit geringem Aufwand und unter kontrollierbaren Bedingungen eine erste praktische Überprüfung des entwickelten Systems stattfinden.
- Experimentelle Überprüfung an Versuchsträgern in Realgewässern. Nach der ersten praktischen Erprobung im Versuchsbecken stehen Versuchsträger für einen Test unter realen Bedingungen zur Verfügung. Hier sollen neben der im Projekt entwickelten Sensorik zur Nahfeldererkennung auch die Allokationsalgorithmen und Schnittstellen zu den Antrieben getestet werden. Diese Erprobung soll sowohl für die Beschaffung von wirklichkeitsnahen Trainingsdaten für das Anlernen der KI zur Objekterkennung innerhalb der Nahfeldsensorik dienen als auch den Nachweis zur Einsatzbereitschaft des Gesamtsystems auf realen Schiffen erbringen.
- Experimentelle Überprüfung am Demonstrator im Strömungskanal und im Reallabor. Nach den Vorabtests mit den institutseigenen Versuchsträgern erfolgt der Einbau des Regelungssystems in die projektspezifischen Demonstratoren und der Durchführung der Messreihen in der Schlepprinne der SVA Potsdam. Abschließend erfolgt die Erprobung des Systems mit zwei Demonstratoren im Reallabor auf der Spree-Oder-Wasserstraße.

## 2.2 Voraussetzungen, Rahmenbedingungen

Das Institut für Automatisierungstechnik (IAT) als Mitglied im *Center for Marine Information Systems* (CeMarIS) an der Universität Rostock beschäftigt sich mit der Entwicklung moderner Regelungskonzepte und deren Anwendung auf verschiedenen Gebieten. Die theoretischen Grundlagen wurden in einer Reihe von DFG-Projekten erarbeitet und sind international bekannt. Insbesondere besitzt das Institut langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Regelungstheorie, der Prozessidentifikation und der Simulation von maritimen Prozessen.

In dem im Jahr 2008 abgeschlossenen Projekt ADANAV (Adaptives Navigationssystem zur präzisen Lage-, Geschwindigkeits- und Kursregelung, 2004-2008, BMBF FKZ: 03SX198B) wurde ein modernes modular aufgebautes, adaptives Bahnregelungssystem für Schiffe entwickelt, welches auch neue Antriebe wie Pods- und Querstrahlruder sicher in die Regelung einbezieht. Dabei standen die Identifizierung von erweiterten Dynamikmodellen, die Filterung von Messdaten und das modulare Regelungskonzept im Vordergrund.

Im Projekt MARSPEED (Trainingssimulator für maritime Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge, 2008-2010, FKZ: BMWi 16IN0620) wurde ein Trainingssimulator für das Führen maritimer Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge entwickelt. Herausforderungen lagen hier in der physikalischen und systemtheoretischen Modellierung der maßgeblichen hydro- und aerodynamischen Bewegungsvorgänge, der anschließenden Identifikation realer Systemparameter mit einem autonomen Versuchsträger und der Echtzeitsimulation hochdynamischer Vorgänge. Hierfür wurde ein komplexes Mess- und Sensorik-Konzept zur Bewegungs-, Lage- und Positionserfassung für den Einsatz in hochdynamischen Systemen entworfen und getestet.

Das Projekt MULTIMAR (FKZ: UR08060), welches im Rahmen des Exzellenzförderprogrammes des Landes Mecklenburg-Vorpommern absolviert wurde, beinhaltete Untersuchungen zur Entwicklung und konkreten technischen Realisierbarkeit von Verfahren und Methoden zur Systemidentifizierung des Manövrierhaltens eines Wasserfahrzeuges durch Präzisionsortung mittels GALILEO-Sensorik im Forschungshafen Rostock.

Das interdisziplinäre Verbundforschungsvorhabens AGAPAS (Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See, 2009-2011, FKZ: BMBF 03SX259C) zielte auf die Entwicklung eines sich selbst aktivierenden autonomen Rettungssystems ab, das auf See über Bord gegangene Personen selbständig auffindet und deren Bergung durchführt. Aufgaben des IAT waren unter anderem die Automation des autonomen Rettungsfahrzeuges, die Kommunikation mit dem Mutterschiff und die Visualisierung und Überwachung des gesamten Rettungsprozesses in einer elektronischen Seekarte.

Im Projekt DP Motion und DP Motion II (02/2017 bis 02/2020, FKZ: BMWi 03SX428C) stand die Entwicklung und Validierung einer durchgehenden Methodik für den simulationsbasierten Entwurf eines industriefähigen DP0-Systems im Bereich des Dynamischen Positionierens (DP) im Fokus.

Das Projekt GALILEOnautic 2 (10/2018 bis 09/2021) beinhaltet die Entwicklung modularer Strukturen zur Abbildung von Reglerentwurfmodellen, den Entwurf hybrider Regelungsstrukturen, Fehlerdiagnose und fehlertolerante Regelung sowie die Erprobung der entwickelten Lösungen mit einem USV und auf dem Forschungsschiff Deneb.



CeMarIS ist Mitglied in der STG, in mehreren Arbeitsgruppen der DGON-Schifffahrtskommission und im Technical Committee Marine Systems der IFAC.

Im Jahre 2010 hat das Institut für Automatisierungstechnik die international hochrangige IFAC-Conference: Control Applications in Marine Systems (CAMS) 2010 ausgerichtet. Durch die Vergabe der Konferenz an das IAT der Universität Rostock wurden die bisherigen Arbeiten der maritimen Forschungsgruppe am Institut für Automatisierungstechnik von der internationalen Fachwelt honoriert.

## 2.3 Planung, Ablauf

Das geplante Vorhaben gliedert sich in 12 aufeinander aufbauende Arbeitspakete, die ausführlich im Leit Antrag beschrieben sind. Im Folgenden werden nur die für die Universität Rostock relevanten Hauptarbeitspakete dargestellt.

Der geplante Ablauf laut Antrag gliedert sich in eine theoretische Phase, in der Konzepte und Strategien entworfen und Simulationen durchgeführt werden sollten, und eine anschließende praktische Phase der Evaluation der entwickelten Module in Modellversuchen. Folgende Punkte sollten daher konsekutiv bearbeitet werden:

- Regelungstechnische Modellierung und Simulation des Bewegungsverhaltens der A-SWARM-Module und deren Beeinflussung durch Umweltgrößen
- Entwurf von Algorithmen zur Allokation, der Trajektorienfolgeregelung sowie der Störgrößenregelung unter Vorgabe von Präzision und Effektivität
- Entwicklung der Sensordatenfusion und Sensordatenfilterung zur hochpräzisen Positions- und Lagemessung in sechs Freiheitsgraden
- Untersuchung der Möglichkeiten einer energieoptimalen Allokation und Stellgrößengenerierung in verschiedenen Betriebsszenarien
- Analyse und Konzeptentwicklung eines Trajektorienkorrektursystems
- Entwicklung einer Simulations- und Testumgebung für die Bewegungsplanung
- Optimale Trajektoriengenerierung für unbeschränkte Umgebungen
- Generierung einer Trajektorie mit statischen Hindernissen
- Erweiterung der Trajektoriengenerierung für bewegte Hindernisse
- Integration von weichen Randbedingungen in die optimale Planung
- Aufbau eines Steuersystems für die reale Erprobung
- Experimentelle Erprobung im Reallabor

Der beschriebene Ablauf konnte während des gesamten Projektes derartig durchgeführt werden. Die Erprobung des Regelsystems auf den Versuchsträgern erfolgte im Berliner Westhafen und auf den Wasserstraßen der näheren Umgebung.

## 2.4 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Förderprojekt LAESSI befasste sich mit der Entwicklung von Assistenzsystemen zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inland-Wasserstraßen. Das Projekt fokussierte dabei die genaue Pfadführung auf Basis von satellitenbasierten Positionsdaten, Lageinformationen, der Verwendung von AIS und elektronischen Wasserstraßenkarten. Im Projekt wurden Fahrerassistenzfunktionen in den Bereichen Brückenankunftswarnung, exakte Bahnführung, Navigation beim Anlegen und in Engstellen sowie einer Darstellung der Schiffsbewegung und ihrer Einflussfaktoren (Conning-Anzeige) entwickelt. Andere Verkehrsteilnehmer sind passiv

(keine Kooperation) in das Assistenzsystem einbezogen. Es wurden keine Nahfeldererkennung durchgeführt oder Informationen aus LIDAR und lokalen Kamerasystemen in die Pfadführung mit einbezogen [1].

Das Projekt **MTCAS** hatte als Ziel, die Kollisionserkennung von Seeschiffen weitestgehend zu automatisieren und Vorschläge für die Kollisionsvermeidung anzubieten. Das Vorhaben entwickelte Algorithmen für den Schiffseinsatz und für die Beobachtung durch Seeverkehrsdienste (VTS) an Land. Integraler Bestandteil des Projektes war die Schaffung eines Assistenzsystems, das basierend auf ausgetauschten Schiffsrouten Konfliktsituationen vermeiden soll und internationale Regeln zur Vermeidung von Kollisionen auf See (Flächenverkehr) sowie die Einbettung in nationale Vorschriften (Linienverkehr) berücksichtigen kann. Der Schiffsoffizier steht hier mit seinen Erfahrungen im Mittelpunkt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Lösungen zur Thematik Manöver des letzten Augenblicks, der Planung und Umsetzung von Ausweichmanövern mittels Fast-Time-Simulation (FTS) sowie der Vorausswahl und Berücksichtigung von Eigenschaften des potentiellen Kollisionsgebietes gelegt. Ebenso werden PNT-Einheiten als Basistechnik vorausgesetzt und genutzte Sensordaten bewertet. Der Einsatz von Bahnreglern wird in MTCAS nicht ausgeführt [2].

Im EU-Projekt **MUNIN** - Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks wurde die technische Machbarkeit der autonomen Schiffsführung untersucht. Dabei haben sich eine Reihe von Institutionen verschiedenen Themengebieten zugewandt. Diese haben sich angefangen von der juristischen Seite über die ökonomischen und technischen Aspekte bis hin zur Navigation und dem Maintenance im Maschinenbereich erstreckt. Die Autonomie des Schiffs wurde lediglich für den offene Seeraum angestrebt, so dass das Schiff bestenfalls von Lotsenposition zu Lotsenposition selbstständig fahren sollte. Für den Hafen und begrenzten Fahrwassern sollte eine Bemannung erfolgen. Hierfür wurden u.a. Szenarien für ferngesteuertes Manövrieren erstellt und entsprechende Algorithmen entwickelt, welches die Gelegenheit bot, bestehende moderne Datenübertragungstechnologie für die manuelle Remote-Steuerung, multiple Bahnvorsagen für die Kollisionsverhütung sowie FTS Technologie zu testen. Insbesondere wurde der SW-Ansatz zu einem SCC (shore control centre) und einem SOC (shore-based operation centre) verfolgt [3].

**Rolls Royce** untersucht zurzeit geeignete Kommunikationstechnologien und neue Sensorkonzepte, die zur umfangreichen Erfassung von Messdaten auf einer 65 Meter Fähre in Finnland installiert sind. Rolls Royce verfolgt insgesamt den langfristigen Ansatz der Umsetzung von landseitig-unterstützten (bis 2020), ferngesteuerten und unbemannten Schiffen in Küstennähe (bis 2025) und den Übergang zu komplett autonomen Schiffen für die offene See (bis 2035). Der Hafenbetrieb und die Binnenschifffahrt sind bei diesen Überlegungen ausgeklammert.

**KONGSBERG** hat im September 2017 einen Forschungsauftrag des Research Council of Norway angenommen, in dem elektrisch betriebene, autonome Fährschiffe (Neubauten) entwickelt werden sollen, die automatisch an- und ablegen, navigieren und queren/überfahren. Hierbei werden Sensorfusionsansätze und radarbasierte Kollisionsverhütung als Basis von autonomen und/oder unbemannten Schiffen aufgeführt. Die Entwicklungen sollen u.a. in einem maritimen Testgebiet im norwegischen Trondheimfjord erprobt werden. Auch KONGSBERG geht den Entwicklungsweg über ferngesteuerte Schiffe. Zusammen mit der norwegischen

Firma JARA entwickelt KONGSBERG ein rein elektrisches Containerschiff (Neubau für bis zu 120 Container), das autonom bis zu 30 nautische Meilen zwischen drei Häfen zurücklegen soll. Am 29. September 2017 wurde mitgeteilt [4], dass das finale Schiffsdesign fertiggestellt wurde. Laut Internetseite des Projekts soll das Schiffskonzept bereits 2020 im Einsatz sein.

Im Projekt **Roboat** wird eine On-Demand-Infrastruktur für den City-Bereich entwickelt, in der autonome Plattformen zu verschiedenen Aufgaben eingesetzt werden. Das Projekt nennt als Beispiel: Koppelung von Plattformen zu schwimmenden Brücken und Bühnen, Einsammeln von Abfällen, Lieferung von Waren und Transport von Personen.

Es wurde Algorithmen und Methoden zur automatischen Wegplanung unter Vermeidung von Kollisionen mit bekannten Hindernissen und Berücksichtigung der Bootsdynamik und -geometrie entwickelt. Unbekannte, in den Karten nicht verzeichnete Hindernisse werden nicht erkannt oder berücksichtigt [5].

### 3 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

#### 3.1 AP 2 Positionserkennung Fernfeld

Innerhalb des APs wurde eine Schnittstellendefinition für den Empfang der Positionsdaten von den 4 GNSS-Modulen in den Ecklaternen des Versuchsträgers entwickelt. Die Positionswerte wurden innerhalb des Protokolls zum Austausch der Statusinformationen zwischen den Komponenten des Versuchsträgers realisiert. Der Aufbau des Statusprotokolls ist in Tabelle 1 aufgelistet.

A-SWARM Statusprotokoll URO -> VEINLAND via UDP						
Position	Beschreibung	Einheit	Datentyp	Offset	Länge	Anmerkung
				in Byte	in Byte	
0	Header	-	uint8	0	3	0x41,0x53,0x50 / ASCII "ASP"
1	Automatische Steuerung aktiv URO	-	uint8	3	1	0 - deaktiviert / 1 - aktiv
2	Status Sensorfusion URO	-	uint8	4	1	0 - Tiefpass gefiltert / 1 - Kalmanfilter
3	Status Bewegungsfilter URO	-	uint8	5	1	0 - ungültig / 1 - gültig
4	Status IMU	-	uint8	6	1	0 - keine Daten, 1 - Daten okay
5	Ruderwinkel Bug	rad	float	7	4	Wertebereich $\pm\pi$
6	Drehzahl Bug	rad/s	float	11	4	
7	Fehler Antrieb Bug	-	uint8	15	1	0 - keine Fehler
8	Fehler Rudermaschine Bug	-	uint8	16	1	0 - keine Fehler
9	Antriebsbatterie Bug	V	float	17	4	
10	Ruderwinkel Heck	rad	float	21	4	Wertebereich $\pm\pi$
11	Drehzahl Heck	rad/s	float	25	4	
12	Fehler Antrieb Heck	-	uint8	29	1	0 - keine Fehler
13	Fehler Rudermaschine Heck	-	uint8	30	1	0 - keine Fehler
14	Antriebsbatterie Heck	V	float	31	4	
15	Gerätebatterie 24V	V	float	35	4	
16	GPS Quality Edge 1	-	int8	39	1	-1 - keine Daten, 0 - Fix not valid ... 5 - RTK float
17	GPS Quality Edge 2	-	int8	40	1	-1 - keine Daten, 0 - Fix not valid ... 5 - RTK float
18	GPS Quality Edge 3	-	int8	41	1	-1 - keine Daten, 0 - Fix not valid ... 5 - RTK float
19	GPS Quality Edge 4	-	int8	42	1	-1 - keine Daten, 0 - Fix not valid ... 5 - RTK float
20	GPS Quality Backup	-	int8	43	1	-1 - keine Daten, 0 - Fix not valid ... 5 - RTK float
21	Windsensor	-	uint8	44	1	0 - keine Daten, 1 - Daten okay
22	Inclinometer	-	uint8	45	1	0 - keine Daten, 1 - Daten okay
23	AIS	-	uint8	46	1	0 - keine Daten, 1 - Daten okay
24	Echolog	-	uint8	47	1	0 - keine Daten, 1 - Daten okay
25	Status Infineon KI PC	-	uint8	48	1	
26	Status Infineon Edge 1	-	uint8	49	1	
27	Status Infineon Edge 2	-	uint8	50	1	
28	Status Infineon Edge 3	-	uint8	51	1	
29	Status Infineon Edge 4	-	uint8	52	1	
30	Status Infineon Lidar Bug	-	uint8	53	1	
31	Status Infineon Lidar Heck	-	uint8	54	1	
32	Position Latitude	rad	double	55	8	Wertebereich $\pm\pi$
33	Position Longitude	rad	double	63	8	Wertebereich $\pm\pi$
34	Heading	rad	float	71	4	Wertebereich $\pm\pi$
35	COG	rad	float	75	4	Wertebereich $\pm\pi$
36	Geschwindigkeit x	m/s	float	79	4	
37	Geschwindigkeit y	m/s	float	83	4	
38	Drehgeschwindigkeit	rad/s	float	87	4	
39	SOG	m/s	float	91	4	
40	Geschwindigkeit durchs Wasser	m/s	float	95	4	
41	Wassertiefe	m	float	99	4	
42	Windgeschwindigkeit	m/s	float	103	4	
43	Windrichtung	rad	float	107	4	Wertebereich $\pm\pi$
Nachrichtenlänge [Byte]:				111		
Bytereihenfolge:				Little Endian		

**Tabelle 1 Aufbau des Statusprotokolls**

Die Statusnachricht wird per UDP-Multicastnachricht übertragen. Die Bytereihenfolge ist Little Endian.

### 3.2 AP 3 Positionserkennung Nahfeld

Innerhalb des APs wurde ein Konzept zur Übertragung der von der Nahfeldsensorik erkannten festen und beweglichen Hindernisse entwickelt. Als Grundlage dient eine elektronische 2D-Seekarte (Inland ECDIS). Alle statischen Objekte der Seekarte werden dabei als Projektion in konvexen Polygonen approximiert. Die von der Nahfeldsensorik erkannten beweglichen und festen Hindernisse werden ebenfalls in konvexe Polygone transformiert und diese dann mit den Kartendaten zusammengeführt. Die so generierten Karten der in Fahrzeugnähe befindlichen Objekte werden zur Bewegungsplanung genutzt. Das Prinzip der Kartengenerierung ist in Abbildung 1 dargestellt.

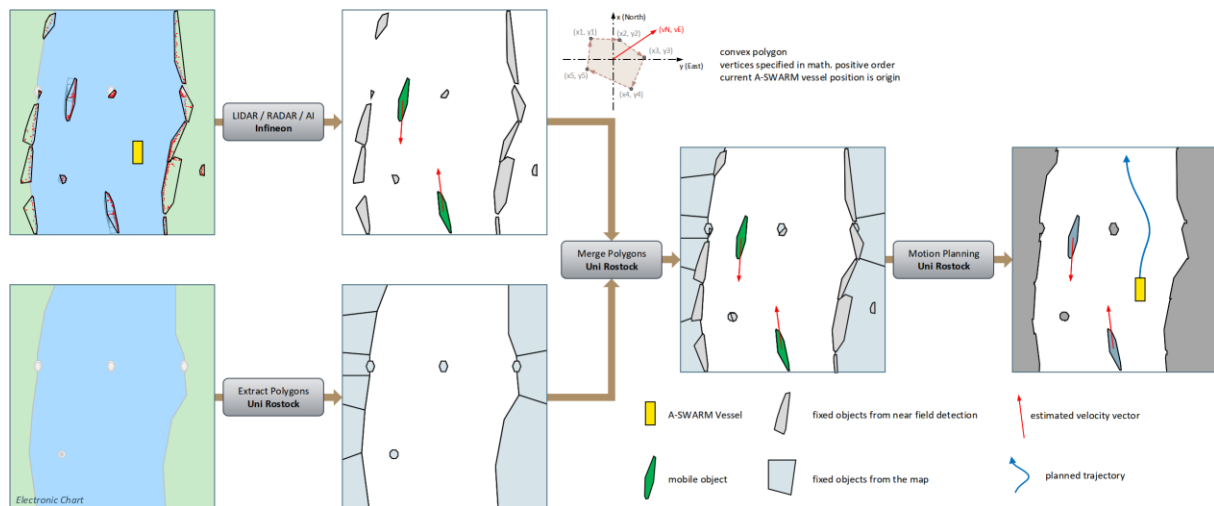


Abbildung 1 Konzept der Generierung von Seekarten zur Bewegungsplanung

Zur Datenübertragung zwischen Modulen des A-SWARM Steuer- und Regelsystems wurde ein generisches Intermodulprotokoll (IMP) entwickelt [6]. Das Intermodulprotokoll definiert eine Reihe von Nachrichten, die für den Austausch von Basisdaten zwischen den Modulen eines GNC-Systems bestimmt sind. Es werden nur generische Nachrichten definiert, die unabhängig von der Anwendung und somit auch unabhängig vom Fahrzeugtyp sind. In Tabelle 2 sind die definierten Nachrichtentypen aufgelistet.

Message ID	Name	Description
0x00	Info Request Message	Request information from a module.
0x01	Info Response Message	Response to an information request message.
0x47	Guidance Message	Provide a guidance state.
0x4C	Log Message	Provide a text log.
0x4E	Navigation Message	Provide a navigation state.
0x50	Convex Polygon Message	Provide a set of convex polygons.
0x54	Guidance Trajectory Message	Provide a state trajectory or waypoint list.

Tabelle 2 Generische Nachrichtentypen des Intermodulprotokoll

Zur Datenübertragung zwischen Nahfeldsensorik und Trajektorienoptimierung wurde die Message 0x50 Convex Polygon Message genutzt. Die Nachricht dient der Übermittlung einer variablen Anzahl von konvexen Polygonen. Ein konvexes Polygon muss aus mindestens drei Eckpunkten bestehen. Eine Kante wird durch zwei aufeinander folgende Eckpunkte gekennzeichnet. Mehrere Eckpunkte dürfen nicht auf einer Linie liegen, d. h. der Winkel zweier

aufeinander folgender Kanten darf nicht gleich sein. Es darf keine doppelten Eckpunkte geben. Es werden statische und dynamische Polygone unterschieden. Alle Geschwindigkeiten eines dynamischen Polygons beziehen sich auf den Mittelwert aller Eckpunkte dieses Polygons. Jeder Eckpunkt hat eine x- und eine y-Koordinate, die in Metern angegeben wird. Die x-Achse zeigt nach Norden, während die y-Achse nach Osten zeigt, siehe Abbildung 2. Die Polygonmeldung enthält eine geografische Position, die den Ursprung angibt, auf den sich die Eckpunktkoordinaten beziehen.

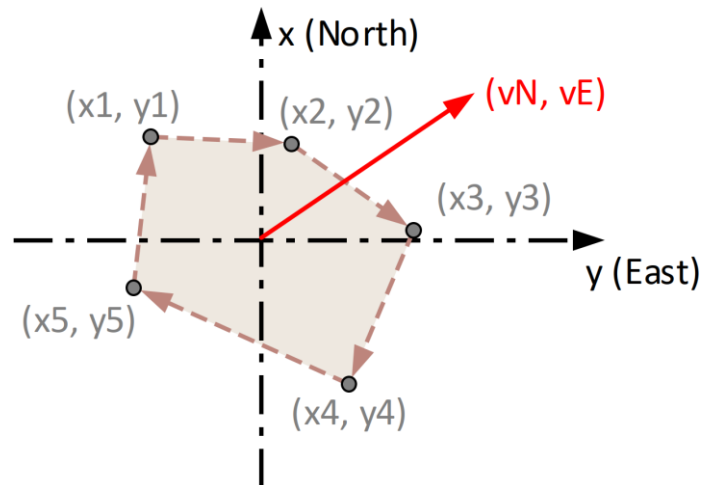


Abbildung 2 Definition eines konvexen Polygons

ID (0x50 (1 byte)	timestamp (5 bytes)	maxSegmentIndex (1 byte)	segmentIndex (1 byte)	originLLA (24 bytes)	numPolygons (2 bytes)	polygon data (N bytes)	Convex Polygon 1					Convex Polygon P ...			
							polygonID (2 bytes)	classification (1 byte)	velocities (12 bytes)	numVertices (1 byte)	x1, y1 (8 bytes)	x2, y2 (8 bytes)	...	xV, yV (8 bytes)	

Abbildung 3 Aufbau der 0x50 Convex Polygon Message

In Abbildung 3 ist der Aufbau der Convex Polygon Message dargestellt. Nachfolgend sind die Felder der Nachricht beschrieben:

### ID

Die ID ist auf 0x50 gesetzt, was dem ASCII-Code für "P" entspricht.

### timestamp

Der Zeitstempel, angegeben in UTC-Sekunden des Tages, der den Gültigkeitszeitpunkt der Nachricht angibt. Es handelt sich um einen vorzeichenlosen Wert (5 Byte) mit einer Auflösung von 100 Nanosekunden.

### maxSegmentIndex

Der maximale nullbasierte Segmentindex, der das letzte Nachrichtensegment angibt. Das heißt, die maximale Anzahl von Polygonnachrichten, die zu einem Polygondatensatz gehören, ist (maxSegmentIndex + 1).

### segmentIndex

Der aktuelle nullbasierte Segmentindex für diese Nachricht.

### **originLLA**

Geografische Position (Breitengrad, Längengrad, Höhe), die als Ursprung für alle Polygone der Nachricht verwendet wird. Es ist zu beachten, dass die Byte-Reihenfolge im Netzwerk Big-Endian ist.

Name	Datentyp	Beschreibung
<b>latitude</b>	double	Geografische Position (Breitengrad im Bogenmaß) nach WGS84, Bereich $[-\pi/2, +\pi/2]$ .
<b>longitude</b>	double	Geografische Position (Längengrad im Bogenmaß) nach WGS84, Bereich $[-\pi, +\pi]$ .
<b>altitude</b>	double	Geografische Position (Höhe in Metern) nach WGS84, positiv nach oben

### **numPolygons**

Ein 16-Bit-Wert ohne Vorzeichen, der die Anzahl der Polygone angibt, die im Polygondatenfeld enthalten sind. Beachten Sie, dass die Reihenfolge der Netzwerk-Bytes Big-Endian ist.

### **polygon data**

Die Anzahl der Polygone wird durch numPolygons angegeben. Alle Polygone werden nacheinander angegeben. Die Daten für ein Polygon enthalten die folgenden Daten.

#### **polygonID**

Eine eindeutige 16-Bit-Nummer, die das Polygon identifiziert. Der Datentyp ist uint16.

#### **classification**

Ein 8-Bit-Wert, der eine Klassifizierung des Polygons angibt. Das höchstwertige Bit gibt an, ob das Polygon ein statisches oder ein dynamisches Polygon ist. Alle Werte im Bereich  $[0, 127]$  bezeichnen statische Polygone und alle Werte im Bereich  $[128, 255]$  bezeichnen dynamische Polygone. Die tatsächlichen Klassifizierungen in den entsprechenden Bereichen sind nicht festgelegt und können je nach Anwendung definiert werden. Beachten Sie, dass die folgenden Geschwindigkeiten nur für dynamische Polygone gesendet werden.

#### **velocities**

Die Geschwindigkeiten sind nur verfügbar, wenn das Polygon ein dynamisches Polygon ist, d.h. wenn das höchstwertige Bit der Klassifizierung gesetzt ist. Alle Geschwindigkeiten eines Polygons beziehen sich auf den Mittelwert aller Scheitelpunkte dieses Polygons. Das Format ist wie folgt.

Name	Datentyp	Beschreibung
<b>velocityNorth</b>	float	Geschwindigkeit in nördlicher Richtung in Metern pro Sekunde.

<b>velocityEast</b>	float	Geschwindigkeit in östlicher Richtung in Metern pro Sekunde.
<b>yawRate</b>	float	Rotationsgeschwindigkeit um die Abwärtsachse des Navigationsrahmens in Radiant pro Sekunde

### **numVertices**

Die Anzahl der Eckpunkte, die in dem konvexen Polygon enthalten sind. Der Datentyp ist uint8.

### **vertex data**

Die Anzahl der Eckpunkte wird durch numVertices angegeben. Alle Eckpunkte werden nacheinander angegeben. Die Eckpunkte werden in mathematisch positiver Reihenfolge angegeben, d. h. um die Abwärtsachse. Die Daten für einen Scheitelpunkt lauten wie folgt.

x-Koordinate (4 Bytes)	y-Koordinate (4 Bytes)
---------------------------	---------------------------

### **x-Koordinate**

Die x-Koordinate (Nordrichtung) des Scheitelpunkts in Metern in Bezug auf den geografischen Ursprung (originLLA). Der Datentyp ist float.

### **y-Koordinate**

Die y-Koordinate (Ost-Richtung) des Scheitelpunkts in Metern in Bezug auf den geografischen Ursprung (originLLA). Der Datentyp ist float.

## **3.3 AP 4 Wind, Strömung, Gewässertopografie**

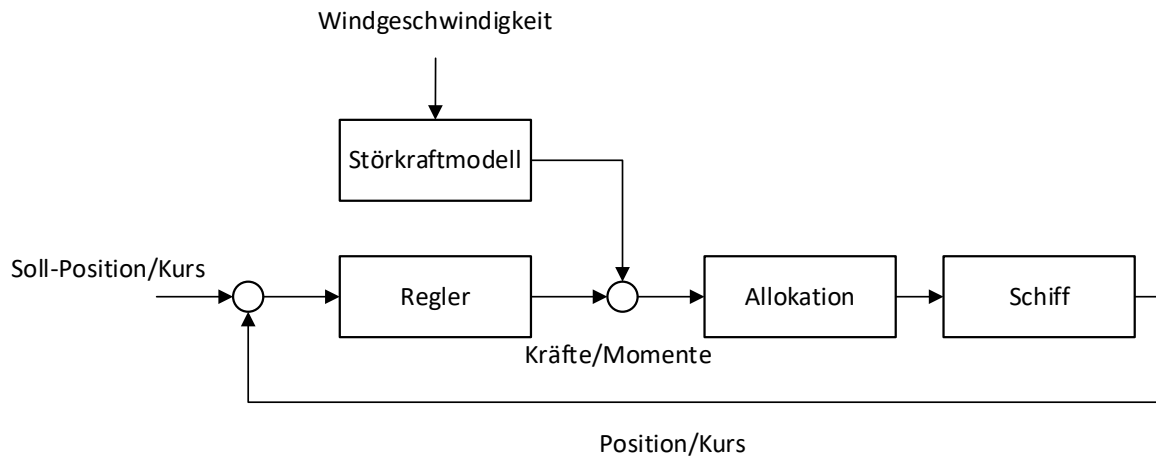
Zur regelungstechnischen Modellierung wurden datenbasierte, lokal-lineare Modellansätze (ILMON [19], Lookup-Table) genutzt, welche die resultierenden Windkräfte des Fahrzeuges ( $F_{WX}$ ,  $F_{WY}$ ,  $F_{WZ}$ ) als eindeutige Funktion der gemessenen Windgeschwindigkeiten ( $V_{WX}$ ,  $V_{WY}$ ,  $V_{WZ}$ ) abbilden:

$$F_W = f \left( [V_W]_f \right) \quad (1)$$

Da die ursächlichen Windgeschwindigkeiten im erdfesten Koordinatensystem gemessen werden, erfolgt innerhalb des Störkraftmodells eine Koordinatentransformation  $[\cdot]_f$  auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem in dem die resultierenden Störkräfte zur Vorsteuerung vorliegen müssen.

Die Parametrierung erfolgte über das skriptgesteuerte Durchfahren des gesamten Bereiches der Windangriffswinkel sowie der Windgeschwindigkeiten in der X-Y-Ebene über die Windmodelle. Die so aus den Windgeschwindigkeiten geschätzten Störkräfte wurde als Vorsteuerung in die Grundstruktur der Regelung integriert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**





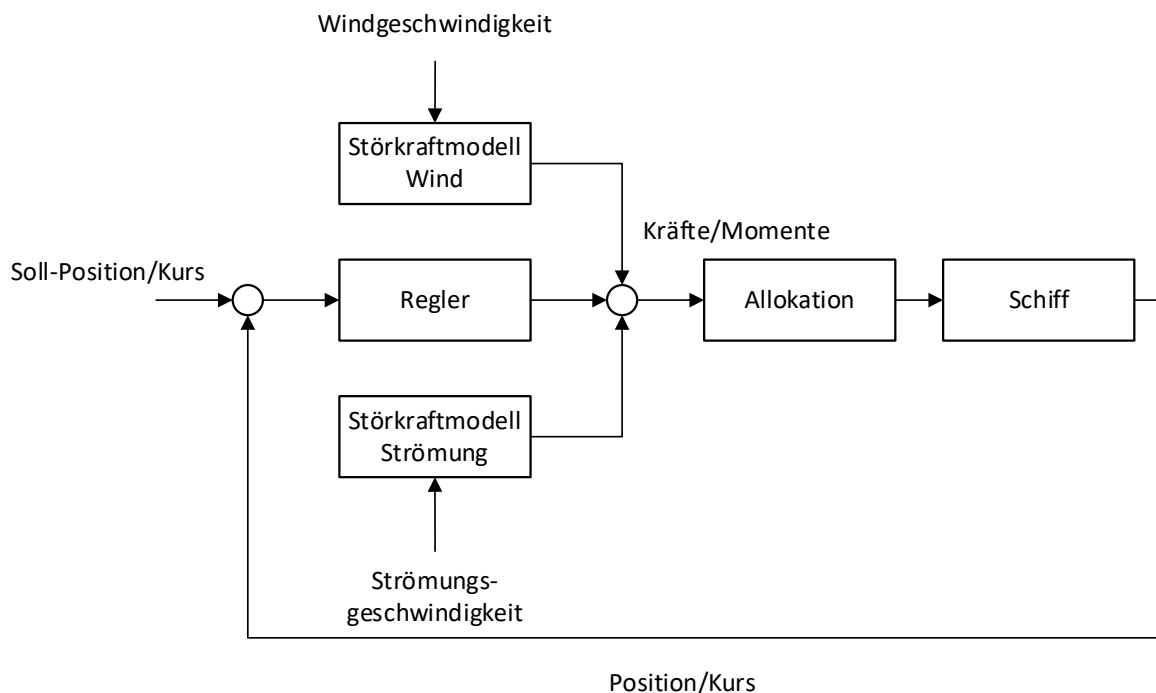
**Abbildung 4: Generelle Struktur einer DP-Regelung mit Störkraftvorsteuerung**

Analog zur Windlastmodellierung wurde die regelungstechnische Modellierung der Strömungskraft in einem ersten Schritt durch datenbasierte, lokal-lineare Modelle realisiert. Es galt eine Abbildung der zweidimensionalen am Schiff anliegenden Strömungsgeschwindigkeiten auf die resultierenden, auf das Schiff wirkenden Strömungskräfte  $F_s$  ( $F_{sx}$ ,  $F_{sy}$ ) zu finden.

$$F_S = f\left([V_S]_f\right) \quad (2)$$

Wie auch die Windgeschwindigkeiten liegen die gemessenen und simulierten Strömungsgeschwindigkeiten im erdfesten Bezugssystem vor und müssen für die Verwendung im Regelsystem in das fahrzeufeste Koordinatensystem transformiert werden.

Die so berechneten Driftkräfte können direkt als Vorsteuerung verwendet werden. Die strukturelle Erweiterung des Regelungssystems ist in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5 Erweiterung der Regelungsstruktur um eine Driftkraftvorsteuerung**

Die Vorsteuerungen der Störungskräfte sind in der Struktur identisch unterscheiden sich aber in der Dynamik der ursächlichen Umweltgrößen. Während sich bei böigen

Wetterbedingungen oder in der Nähe von teilabschattenden Strukturen (Deiche, Gebäude, andere Schiffe) die Windgeschwindigkeit im Verhältnis zur möglichen Dynamik des Fahrzeuges schnell ändern können, sind schnelle Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit selten und wenn dann hauptsächlich bei Mündungen von kleineren Seitenkanälen zu erwarten. Es wurde neben der hier entwickelten Vorsteuerung im Filterentwurf des Regelungssystems ein Störkraftschätzer in die Filterstruktur integriert, welcher eine Schätzung der Driftkräfte ohne Messung der Strömungsgeschwindigkeiten zulässt.

### 3.4 AP 5 Dynamic Motion Systementwicklung

#### 3.4.1 AP 5.a Modellierung und Simulation des Bewegungsverhaltens

Für die Simulation des Fahrzeuges aber auch für den modellbasierten Regler- und Filterentwurf ist es notwendig, das dynamische Verhalten des Schiffes zu modellieren. Während für die hydrodynamische Modellierung in der Regel CFD-Modelle generiert werden, ist für die regelungstechnische Behandlung eine einfachere Modellierung notwendig. Da ein Großteil der regelungstechnischen Methoden auf sogenannten linearen Modellen beruht, d.h. Modelle, die sich als lineare Differentialgleichung darstellen lassen, ist die Modellierung zu diesem Zwecke auf die wesentlichen Aspekte der Schiffsbewegung zu konzentrieren. Auf Basis dieser einfachen Modelle kann ein Regler- bzw. Filterentwurf stattfinden.

Aufgabe in der Modellierung ist die Wahl einer mathematischen Struktur, die bei geeigneter Parametrierung das Verhalten der zu modellierenden Strecke wiedergibt, während die Identifikation auf die Parametrierung der entwickelten Modelle abzielt. Die Modellierung ist daher Grundlage für die Identifikation.

Als Nomenklatur für die Modellierung und folgende Schritte soll der Richtlinie der *Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)* [20] gefolgt werden.

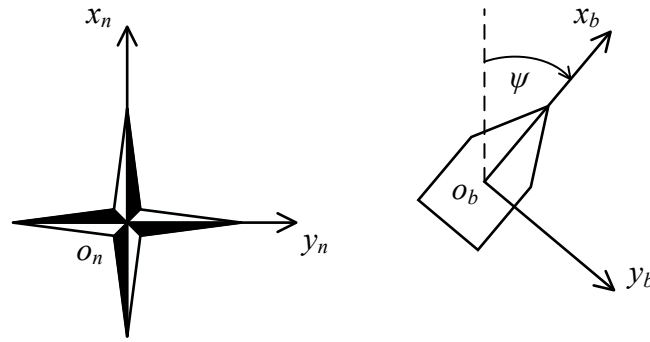
**Tabelle 3: Nomenklatur der SNAME**

	<i>Position und Winkel</i>	<i>Geschwindigkeiten</i>	<i>Kräfte und Momente</i>
<i>Bewegung in x</i>	x	u	X
<i>Bewegung in y</i>	y	v	Y
<i>Bewegung in z</i>	z	w	Z
<i>Rotation um x</i>	$\phi$	p	K
<i>Rotation um y</i>	$\theta$	q	M
<i>Rotation um z</i>	$\psi$	r	N

Die Lage der Koordinatensysteme ist dabei wie in Abbildung 6 angegeben.

##### 3.4.1.1 Bezugssysteme der Fahrzeugbewegung

Grundlage für die Beschreibung der Schiffsbewegung ist die Einführung geeigneter erdfester und körperfester Koordinatensysteme wie in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6 links: erdfestes Koordinatensystem, rechts: körperfestes Koordinatensystem**

Das körperfeste Koordinatensystem, in Abbildung 6 rechts zu sehen, wird durch die Koordinaten  $\{b\} = (x_b, y_b, z_b)$  beschrieben und ist mit dem sich bewegenden Fahrzeug fest verbunden. Die  $x_b$ -Achse fällt mit der Längsachse des Fahrzeuges zusammen und zeigt in dessen Vorausrichtung, die  $y_b$ -Achse fällt mit der Querachse des Fahrzeuges zusammen und ist nach Steuerbord orientiert und die  $z_b$ -Achse ist nach unten positiv definiert. Der Ursprung  $o_b$  des Koordinatensystems befindet sich zweckmäßigerweise in dem gemeinsamen Schwerpunkt der Fahrzeugmasse und der hydrodynamischen Masse (mitbewegte Wassermasse bei beschleunigter Schiffsbewegung) auf dem bewegten Fahrzeug.

Die Darstellung der Kräfte und Momente mit ihren Angriffspunkten der Geschwindigkeiten sowie Beschleunigungen erfolgt im körperfesten Koordinatensystem.

Der translatorische Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeuges lautet  $\mathbf{v}_1 = [u \ v \ w]^T$  mit den folgenden Geschwindigkeitskomponenten,

- Längsgeschwindigkeit  $u$  mit der Bewegungsart Schnellen (engl. *surge*),
- Quergeschwindigkeit  $v$  mit der Bewegungsart Versetzen (engl. *sway*),
- Vertikalgeschwindigkeit  $w$  mit der Bewegungsart Tauchen (engl. *heave*).

Der Winkelgeschwindigkeitsvektor lautet  $\mathbf{v}_2 = [p \ q \ r]^T$  mit den Winkelgeschwindigkeitskomponenten

- Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse  $p$  mit der Bewegungsart Rollen (engl. *roll*),
- Winkelgeschwindigkeit um die Querachse  $q$  mit der Bewegungsart Stampfen/Nicken (engl. *pitch*) (Die Überlagerung von Stampfen und Rollen wird als Schlingern bezeichnet.),
- Winkelgeschwindigkeit um die (negative) Hochachse  $r$  mit der Bewegungsart Gieren (engl. *yaw*).

Der Gesamtgeschwindigkeitsvektor bestehend aus den translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeitskomponenten lautet  $\mathbf{v}^T = [\mathbf{v}_1^T \ \mathbf{v}_2^T]$ . Damit werden insgesamt 6 Freiheitsgrade der Bewegung des Schiffes im körperfesten Koordinatensystem beschrieben.

Das erdfeste Koordinatensystem, in Abbildung 6 links zu sehen (North-East-Down (NED)), wird durch die Koordinaten  $\{n\} = (x_n, y_n, z_n)$  beschrieben und ist mit der Erde fest verbunden. Die  $x_n$ -Achse ist nach Norden, die  $y_n$ -Achse nach Osten und die  $z_n$ -Achse zum Erdmittelpunkt positiv definiert. Der Ursprung  $o_n$  des Koordinatensystems befindet sich an einer beliebigen Stelle auf der Wasseroberfläche. Es wird zur Darstellung der kinematischen Bewegungsbahn des Schiffes auf der Erde verwendet.

Die Beschreibung der kinematischen Bewegungsbahn eines Wasserfahrzeuges erfolgt im erdfesten Koordinatensystem anhand der Vektoren Position  $\boldsymbol{\eta}_1 = [x \ y \ z]^T$  und Richtung des Fahrzeuges  $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  mit den folgenden Winkelkomponenten, den sogenannten Eulerwinkeln,

- Roll- oder Krängungswinkel  $\phi$  (engl. *roll angle*),
- Stampf-, Nick- oder Trimmwinkel  $\theta$  (engl. *pitch angle*) und
- Kurs- oder Azimutwinkel  $\psi$  (engl. *heading*).

Der Positions- und Richtungsvektor ergibt den Vektor der Gesamtkoordinaten (*generalized coordinates*) für die Schiffsbewegung mit 6 Freiheitsgraden im erdfesten Koordinatensystem  $\boldsymbol{\eta}^T = [\boldsymbol{\eta}_1^T \ \boldsymbol{\eta}_2^T]$ .

Die translatorische Geschwindigkeit des Schiffes, dargestellt in den Komponenten des erdfesten Koordinatensystems lautet  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ . Zusammengefasst ergibt der translatorische Geschwindigkeitsvektor und der Winkelgeschwindigkeitsvektor den Vektor der Gesamtgeschwindigkeit (*generalized velocity*) im erdfesten Koordinatensystem  $\dot{\boldsymbol{\eta}}^T = [\dot{\boldsymbol{\eta}}_1^T \ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2^T]$ . Damit werden die 6 Freiheitsgrade des Schiffes durch die Geschwindigkeitskomponenten im erdfesten Koordinatensystem beschrieben.

Die Beschreibung der Position und Orientierung eines Wasserfahrzeuges erfolgt im erdfesten Koordinatensystem  $\{n\}$ . Die Geschwindigkeiten des Wasserfahrzeuges sind im körperfesten Koordinatensystem  $\{b\}$  definiert. Die Relativwinkel zwischen dem körperfesten und dem erdfesten Koordinatensystem sind die drei Eulerwinkel in diese Reihenfolge

- Kurswinkel  $\psi$ ,
- Stampfwinkel  $\theta$  und
- Rollwinkel  $\phi$ .

Die Transformation der physikalischen Bewegungsgrößen zwischen dem körperfesten und dem erdfesten Koordinatensystem erfolgt nach [21] auf der Grundlage der Rotationsmatrix  $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}_2)$ .

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \boldsymbol{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_1 \\ \boldsymbol{v}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}_2) \boldsymbol{v} \quad (4)$$

Die Vektoren definieren die erdfeste Schiffposition und Orientierung sowie die körperfesten translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_1 &= [x \ y \ z]^T, & \boldsymbol{\eta}_2 &= [\phi \ \theta \ \psi]^T, \\ \boldsymbol{v}_1 &= [u \ v \ w]^T, & \boldsymbol{v}_2 &= [p \ q \ r]^T, \end{aligned} \quad (5)$$

Für eine Betrachtung von Binnenwasserfahrzeugen im Niedergeschwindigkeitsbereich, d.h.  $\sqrt{u^2 + v^2} \leq 2 \frac{m}{s}$ , ist es in Übereinstimmung mit der Literatur [3] zulässig, ausgehend von einer 6 Freiheitsgradbetrachtung die Zahl der Freiheitsgrade von 6 auf 3 zu reduzieren. Die Reduzierung der Zahl der Freiheitsgrade von 6 auf 3 beinhaltet die

- Tauchgeschwindigkeit  $w = 0$ , das Wasserfahrzeug bewegt sich nur in der Ebene der freien Wasseroberfläche
- Rollen  $p = 0$  und
- Stampfen  $q = 0$ , es wird nur die Drehbewegung um die Hochachse  $r$  berücksichtigt.

Es verbleiben im körperfesten Koordinatensystem 3 Freiheitsgrade der Bewegung:

- Längsbewegung  $u$ , Schnellen (engl. surge),
- Querbewegung  $v$ , Versetzen (engl. sway) und
- Rotation um die Hochachse  $r$ , Gieren (engl. yaw).

Damit reduziert sich bei der Betrachtung von 3 Freiheitsgraden der Vektor für die erdfeste Schiffposition und Orientierung zu  $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$  und der Vektor für die körperfeste translatorische und rotatorische Geschwindigkeit zu  $\boldsymbol{v} = [u \ v \ r]^T$ , sodass sich die kinematische Transformation ergibt zu

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{v} \quad (6)$$

Mit

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

### 3.4.1.2 Modellierung der Schiffsbewegung für den Manöverbetrieb

Ausgangspunkt der folgenden Betrachtung ist die Bewegungsgleichung eines vereinfachten 6-DOF-Modells, welches ohne Berücksichtigung hydrodynamischer und hydrostatischer Effekte als

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{M}_{RB}\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} &= \boldsymbol{\tau}_{RB} \end{aligned} \quad (8)$$

modelliert wird. Hierbei ist  $\boldsymbol{M}_{RB}$  die Massenmatrix des starren Körpers,  $\boldsymbol{C}_{RB}$  bezeichnet die Matrix der Coriolis- und Zentripetalkräfte des starren Körpers und  $\boldsymbol{\tau}_{RB}$  ist der Vektor der generalisierten Kräfte und Momente. Der detaillierte Aufbau diese Matrizen ist [3, 9] zu entnehmen. Durch die Theorie des Manövrierens wird  $\boldsymbol{\tau}_{RB}$  definiert als

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau}_{hs} + \boldsymbol{\tau}_{hyd} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} + \boldsymbol{\tau}_{prop} \quad (9)$$

wobei die hydrostatischen Kräfte modelliert werden können als

$$\boldsymbol{\tau}_{hs} = -\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) - \boldsymbol{g}_0 \quad (10)$$

und für

$$\boldsymbol{\tau}_{hyd} = -\boldsymbol{M}_A\dot{\boldsymbol{v}} - \boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} \quad (11)$$

gilt. Die vollständige Bewegungsgleichung stellt sich dann dar als

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [\boldsymbol{M}_{RB} + \boldsymbol{M}_A]\dot{\boldsymbol{v}} + [\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})]\boldsymbol{v} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{g}_0 \\ = \boldsymbol{\tau}_{prop} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} \end{aligned} \quad (13)$$

Durch die Reduzierung auf 3 Freiheitsgrade vereinfacht sich  $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})$  zu  $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\psi})$ , die Coriolis- und Zentripetalkräfte können aufgrund der geringen Geschwindigkeiten im Manöver-Fall ( $\sqrt{u^2 + v^2} \leq 2 \frac{m}{s}$  und  $\dot{\psi} \sim 0 \frac{rad}{s}$ ) vernachlässigt werden, d.h.  $\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v}) = \mathbf{0}$ , und  $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$  wird durch die Linearisierung im Arbeitspunkt  $\boldsymbol{v} = \mathbf{0}$  konstant. Weiterhin entfallen die Rückstellkraft  $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})$  und die Auftriebskraft  $\boldsymbol{g}_0$  für die Annahme, dass  $w = p = q = 0$ . Daraus ergibt sich das vereinfachte 3-DOF-Modell zu

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v} \quad (14)$$

$$\underbrace{[\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A]}_{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (15)$$

Der Vektor  $\boldsymbol{\tau}_{prop}$  beschreibt dabei, die auf das Schiff wirkenden Kräfte und Momente und kann im 3-dimensionalen Fall geschrieben werden als  $\boldsymbol{\tau}_{prop} = [X \ Y \ N]^T$ , wobei  $X$  die Kraft in Längsrichtung, die  $Y$  Kraft in Querrichtung und  $N$  das Giermoment ist. Die Einheiten der Masse- und Dämpfungsmatrix sind

$$[\mathbf{M}_{trans}] = \text{kg} \quad [\mathbf{D}_{trans}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (16)$$

für die translatorischen Komponenten und

$$[\mathbf{M}_{rot}] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad [\mathbf{D}_{rot}] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \quad (17)$$

für die rotatorische Komponente. Die Einheiten der Querkopplungsterme ergeben sich entsprechend.

Zur Anwendung regelungstechnischer Methoden für den Regler- und Filterentwurf ist die Linearisierung des Prozesses notwendig. Daher wird (13) üblicherweise in einem *körperparallelen Koordinatensystem* (*vessel parallel coordinates*)  $\{\mathbf{v}\}$  ausgedrückt [3]. Hierbei wird ein Koordinatensystem definiert, das fix zum Fahrzeugkoordinatensystem  $\{\mathbf{b}\}$  ist, aber parallele Achsen zum erdfesten Koordinatensystem  $\{\mathbf{n}\}$  hat. Der Positions-/Lagevektor  $\boldsymbol{\eta}_p$  in  $\{\mathbf{v}\}$  wird definiert als

$$\boldsymbol{\eta}_p := \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\eta} \quad (18)$$

Diese Vereinfachung ist gültig für die Annahme eines festen Kurses (*constant heading*) [3]. In diesem Fall ist die Drehrate gleich oder nahezu Null  $r \approx 0$ . Daher ergibt sich, dass  $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \text{const}$  und  $\dot{\mathbf{R}}(\boldsymbol{\psi}) \approx \mathbf{0}$  und aufgrund der Orthogonalität  $\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \mathbf{R}^{-1}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi}) = \mathbf{I}$ . Die Beziehung von  $\boldsymbol{\eta}_p$  zu  $\mathbf{v}$  ergibt daher zu

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}}_p &= \frac{d}{dt}(\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\eta}) \\ &= \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{\mathbf{R}}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\eta} \\ &= \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\psi})\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\dot{\mathbf{v}} + \dot{\mathbf{R}}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\eta} \\ &= \dot{\mathbf{v}} + \dot{\mathbf{R}}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\eta} \\ &\approx \dot{\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (19)$$

wobei sich die im Nachfolgenden betrachtete Position und Orientierung auf das körperparallele Koordinatensystem beziehen.

Das ermittelte Modell gilt allerdings nur in dem spezifizierten Arbeitsbereich. Für größere Geschwindigkeiten beispielsweise ergeben sich die Coriolis-Terme zu  $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}) \neq \mathbf{0}$ , sodass Modellanpassungen notwendig wären. Ebenso stellen sich andere Werte für die Dämpfungsmatrix ein, sodass diese ebenfalls arbeitspunktabhängig betrachtet werden muss.

Die Anteile der hydrodynamischen Massen  $\mathbf{M}_A$  und Dämpfung  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  sind zudem auch Funktionen der Wellenfrequenz und des Angriffswinkels der Wellen und müssten dementsprechend modelliert bzw. angepasst werden. Für den Regler- und Filterentwurf sind jedoch lineare Modelle notwendig, um die Methoden der linearen Regelungstheorie anzuwenden. Für einen definierten Arbeitspunkt, in diesem Fall  $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ , ist eine Linearisierung jedoch zulässig und kann zum Zweck des Regelungsentwurfes durchgeführt werden. Weiterhin ist im Bereich

der Binnenschifffahrt vor allem in Kanälen keine signifikante Wellenbildung zu erwarten. Bei zu starker Änderung der Betriebsbedingungen muss jedoch eine Modellanpassung in Betracht gezogen werden.

### 3.4.1.3 Modellierung der Rollbewegung

Während im vorherigen Kapitel die Schiffsbewegung in den drei planaren Freiheitsgraden betrachtet wurde, soll dieses Modell nun um den Freiheitsgrad Rollen erweitert werden. Obwohl die Rollbewegung stark mit der Quer- und Gierbewegung gekoppelt ist [22], soll in einem ersten Schritt das Rollmodell unabhängig von den restlichen Freiheitsgraden betrachtet werden. Dieser Schritt ist zur Ermittlung eines Modells notwendig, das für den Reglerentwurf der Rolldämpfung genutzt werden kann.

Im Gegensatz zu den bisherigen Bewegungsmodellen ist das Rollen neben der Trägheit und Dämpfung auch von den hydrostatischen Rückstellkräften  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  und der Auftriebskraft  $\mathbf{g}_0$  in nicht-linearer Weise abhängig. Das komplette, nicht-lineare Modell, das den Rollwinkel  $\phi$  bzw. die Rollrate  $r = \dot{\phi}$  mit dem wirkenden Rollmoment  $K_{ext}$  in Beziehung setzt, kann laut [22] wie folgt formuliert werden:

$$K_{ext} = (K_{\dot{p}} - J_x)\dot{p} + (K_p + K_{p|p}|p| + K_{|u|p}|U|)p + (K_{\phi uu}U^2 + K_{\phi\phi\phi}\phi^2 + \Delta g\rho\overline{GM}_T)\sin(\phi) \quad (20)$$

Die Koeffizienten  $K_{\dot{p}}, K_p, K_{p|p}|p|, K_{|u|p}|U|, K_{\phi uu}$  und  $K_{\phi\phi\phi}$  bezeichnen dabei die hydrodynamischen Anteile,  $J_x$  das Trägheitsmoment in der Rollachse,  $U$  die Längsgeschwindigkeit des Schiffes,  $\Delta g\rho$  den Auftrieb ( $\Delta$  Tiefgang,  $g$  Gravitationskonstante,  $\rho$  Dichte des Wassers) und  $\overline{GM}_T$  die transversale, metazentrische Höhe. Mehr Informationen, insbesondere zu den hydrodynamischen Koeffizienten kann [22] entnommen werden.

Dieses Modell ist hochgradig nicht-linear, kann aber für eine konstante Längsgeschwindigkeit bzw. im Manöverfall bei einer Geschwindigkeit nahe 0, und der Annahme kleiner Rollwinkel  $\phi < 10^\circ$  (daraus folgt  $\sin\phi \approx \phi$ ) und kleinen Rollraten  $r \approx 0$  linearisiert werden. Für den Fall eines stabilisierten Schiffes mit Rolldämpfung sind diese Annahmen zulässig. Das Rollmodell vereinfacht sich somit zu

$$K_{ext} = (K_{\dot{p}} - J_x)\dot{p} + K_p p + \Delta g\rho\overline{GM}_T\phi \quad (21)$$

Die Koeffizienten des Modells lassen sich in der allgemeinen, dynamischen Beschreibung aus (13) wiederfinden:  $(K_{\dot{p}} - J_x)$  beschreibt die Massenträgheit ( $K_{\dot{p}}$  hydrodynamischer Anteil,  $J_x$  Massenträgheit des starren Körpers),  $K_p$  die linearisierte Dämpfung und  $\Delta g\rho\overline{GM}_T$  das aufrichtende Moment, beschrieben in  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{g}_0$ .

Für den regelungstechnischen Kontext ist das Aufstellen der Übertragungsfunktion im Bildbereich hilfreich. Zudem lassen sich an diesen einfach Aussagen über das dynamische Verhalten des Systems treffen. Die Anwendung der Laplace-Transformation und das Zusammenfassen der Koeffizienten ergibt

$$\mathbf{G}_\phi(s) = \frac{\phi(s)}{K_{ext}(s)} = \frac{\mathbf{b}}{s^2 + \mathbf{a}_1 s + \mathbf{a}_2} \quad (22)$$

mit  $\mathbf{b} = \frac{1}{(K_{\dot{p}} - J_x)}$   $\mathbf{a}_1 = \frac{K_p}{(K_{\dot{p}} - J_x)}$   $\mathbf{a}_2 = \frac{\Delta g\rho\overline{GM}_T}{(K_{\dot{p}} - J_x)}$

Das Symbol  $s$  kennzeichnet dabei die Laplace-Variable. Die zugehörige Dynamik der Rollrate  $p$  ergibt sich durch Differentiation bzw. Multiplikation mit der Laplace-Variable.

Bei diesem Modell handelt es sich um ein lineares Glied 2.Ordnung. Daher kann es auch in einer equivalenten Schreibweise dargestellt werden, die den Schwingungscharakter der Rollbewegung widerspiegelt

$$\mathbf{G}_\phi(s) = \frac{\boldsymbol{\phi}(s)}{\mathbf{K}_{ext}(s)} = \frac{\mathbf{b}}{s^2 + 2\lambda_p\omega_p s + \omega_p^2} \quad (23)$$

Hierbei ist  $\omega_p$  die Eigenkreisfrequenz des Systems und  $\lambda_p$  der Dämpfungskoeffizient. Für  $0 < \lambda < 1$  ergibt sich ein stabiler Schwingfall, d.h. nach einmaliger Erregung klingt das System asymptotisch ab. Dieser Fall ist auch für die Rollbewegung eines Schiffes zu erwarten. Der Faktor  $\mathbf{b}$  beschreibt die statische, linearisierte Skalierung zwischen Rollmoment und Rollwinkel.

Die komplexen Beziehungen mitsamt aller Kopplungen zwischen Freiheitsgraden ergibt sich analog aus dem kompletten, nicht-linearen Modell (13).

#### 3.4.1.4 Modellierung der Störungen

Während der Fahrt und in Manövern wirken unterschiedliche Störungen auf das Schiff ein. Zu diesen Störungen zählen im Binnenwasserbereich hauptsächlich Wind und Strömung. Diese zwei Störungen zeichnen sich durch unterschiedliche Eigenschaften aus, die es zu modellieren gilt.

Die Strömung ist im direkten Vergleich diejenige Störung mit der geringsten Dynamik. Aufgrund der Menge des sich bewegenden Wassers kann sie sich nur relativ langsam auf- und abbauen, hat aber den größten Effekt auf das Schiff. Die Dichte des Wassers und die Größe des Unterwasserschiffs bestimmen die aufgeprägten Kräfte und Momente. Diese können aufgrund der geringen Störungsdynamik für regelungstechnische Zwecke als quasistatisch angesehen werden [3].

Die Strömung mit einer Geschwindigkeit von  $u_c$  hat dabei auf Kräftebene die gleichen Auswirkungen wie die Fahrt des Schiffes mit identischer Geschwindigkeit durch strömungsfreies Wasser. Dementsprechend kann die Modellierung im Kontext der Eigenbewegung des Schiffes geschehen. Ein Schiff in Strömung nimmt asymptotisch die Geschwindigkeit der Strömung an. Je nach hydrodynamischer Dämpfung dauert dieser Vorgang unterschiedlich lang. Mathematisch modelliert werden kann dieser Aspekt durch die Substitution des Geschwindigkeitsvektors der Bewegung über Grund  $\mathbf{v}$  in Gleichung (13) durch den Vektor der relativen Geschwindigkeiten, d.h. der Geschwindigkeit durch das Wasser:  $\mathbf{v}_r$ .

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c \quad (24)$$

$\mathbf{v}_c$  ist dabei die Strömungsgeschwindigkeit und besitzt aufgrund der planaren Bewegung des Wassers nur Komponenten in x- und y-Richtung, d.h.  $\mathbf{v}_c = [u_{cx} \ u_{cy} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ .

Eine funktionell äquivalente, aber strukturell unterschiedliche Modellierung ergibt sich bei der Erweiterung des Modells auf Kräftebene. Hierbei wird die rechte Seite der Gleichung (13) um ein zusätzliches  $\boldsymbol{\tau}_{current} = [X_c \ Y_c \ N_c]^T$  ergänzt, das die strömungsbedingten Kräfte und Momente beschreibt. Die Berechnung dieses Vektors ergibt sich ebenfalls aus der Relativgeschwindigkeit des Schiffes zum Wasser und einem Satz von Parametern  $\mathbf{C}(x)$ , die abhängig vom Angriffswinkel der Strömung sind.



$$\begin{aligned}
X_c &= \frac{1}{2} \rho A_{Fc} C_X(\gamma_r) \|\mathbf{v}_r\|_2^2 \\
Y_c &= \frac{1}{2} \rho A_{Lc} C_Y(\gamma_r) \|\mathbf{v}_r\|_2^2 \\
N_c &= \frac{1}{2} \rho A_{Lc} L_{oa} C_N(\gamma_r) \|\mathbf{v}_r\|_2^2
\end{aligned} \tag{25}$$

Die Kräfte hängen von den Strömungskoeffizienten des Unterwasserschiffs  $C_X(\gamma_r)$ ,  $C_Y(\gamma_r)$  und  $C_N(\gamma_r)$  ab, welche wiederum vom Angriffswinkel  $\gamma_r$  der Anströmung abhängig sind. Die Geschwindigkeit der Anströmung wird mit  $v_r$  angegeben und die Dichte des Wassers ist  $\rho$ . Die frontal und lateral vom Wasser angeströmten Flächen sind jeweils  $A_{Fc}$  und  $A_{Lc}$ , die Länge des Schiffes von Bug zu Heck wird mit  $L_{oa}$  notiert.

Diese Gleichungen sind funktionell äquivalent, da  $C(x)$  eine diskrete Darstellung der allgemeineren Form  $D(\mathbf{v})$  aus Gleichung (13) ist. Jedoch können in dieser Form die strömungsbedingten Kräfte und Momente effizient berechnet werden, sofern ein passendes Modell bzw. der zugehörige Parametersatz  $C(x)$  vorhanden ist [3].

Im Gegensatz zur Strömung ist der Wind eine sehr hochfrequente Störung. Entsprechend sollte für die Simulation von Wind neben der quasistatischen Betrachtung der wirkenden Kräfte auch die Dynamik des Windes bzw. spektrale Verteilung simuliert werden.

Analog zur Modellierung der Strömung können die wirkenden Kräfte und Momente, die der Wind verursacht, über einen diskreten Parametersatz approximiert werden. Eine genaue Simulation bspw. über CFD-Methoden, die auch komplexe Effekte wie Sog, Abschattung, etc. mit einbezieht, ist situationsabhängig (Schiffstyp, Aufbauten, aber auch Lage des Schiffes, etc.) und langwierig und regelungstechnisch daher nicht sinnvoll. Die Berechnung der wirkenden Gesamtkraft  $\boldsymbol{\tau}_{wind} = [X_W \ Y_W \ N_W]^T$  ist dabei wiederum abhängig von einem satzschiffsspezifischer, einheitsloser Parameter  $C_W(x)$  sowie der Windgeschwindigkeit und Angriffsrichtung.

$$\boldsymbol{\tau}_{wind} = \frac{1}{2} \rho_A V_{rw}^2 \begin{bmatrix} A_{Fw} C_{Wx}(\gamma_{rw}) \\ A_{Lw} C_{Wy}(\gamma_{rw}) \\ A_{Lw} L_{oa} C_{Wn}(\gamma_{rw}) \end{bmatrix} \tag{26}$$

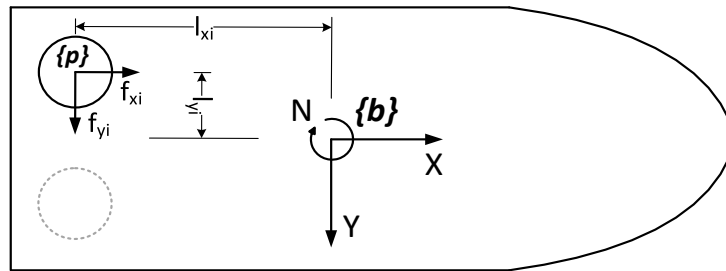
Ist dabei die Dichte der Luft,  $V_{rw}$  die relative Windgeschwindigkeit und  $\gamma_{rw}$  die relative Angriffsrichtung. Die frontale Angriffsfläche des Windes  $A_{Fw}$ , die laterale Angriffsfläche  $A_{Lw}$  sowie die Länge über Alles  $L_{oa}$  sind neben den Parametern  $C_W(s)$  schiffsspezifische Größen [2, 23].

Dieser Modellierungsansatz ist wiederum eine quasistatische Betrachtung. Das Spektrum des Windes kann über Variationen in der Angriffsrichtung und der Windstärke simuliert werden. Wie diese Verteilung aussieht ist revierabhängig und muss in Simulationen dementsprechend modelliert werden [24]. In einer realen Applikation stehen diese Messwerte zumeist direkt über ein Anemometer zur Verfügung und können ausgewertet und in der Regelung genutzt werden.

### 3.4.1.5 Modellierung der Antriebe

Um die auf das Fahrzeug wirkenden Störungen zu kompensieren, stehen dem Schiff bzw. dem Rgelsystem hauptsächlich die schiffseigenen Antriebe zur Verfügung (von Spezialfällen bspw. verankerten Strukturen, wird in diesem Fall abgesehen). Diese erzeugen abhängig von

ihrem Betriebspunkt einen Kraftvektor  $\mathbf{f}_i = [f_{xi} \ f_{yi}]^T$  im propellerfesten Koordinatensystem  $\{p\}$ , der abhängig vom Installationsort des Propellers  $(l_{xi}, l_{yi})$ , d.h. seines Abstands zum Masseschwerpunkt, eine Kraft und ggfs. zusätzlich ein Giermoment erzeugen.



**Abbildung 7 Zusammenhang zwischen propeller- und körperfestem Koordinatensystem**

Der Zusammenhang zwischen den propellerfesten Kräften und dem Vektor der erzeugten Gesamtkräfte und –momente  $\boldsymbol{\tau}$  kann über die geometrischen Beziehungen am Schiff hergestellt werden [29]. Dabei bewirkt jeder Antrieb einen Anteil auf den Gesamtkraftvektor, s. Formel (28).

$$\begin{aligned} X_i &= f_{xi} \\ Y_i &= f_{yi} \\ N_i &= l_{xi}f_{yi} - l_{yi}f_{xi} \end{aligned} \quad (27)$$

Dies kann ebenso in Matrixschreibweise wie folgt ausgedrückt werden

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_i &= \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -l_{yi} & l_{xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\tau} &= \sum \boldsymbol{\tau}_i \end{aligned} \quad (28)$$

Für mehrere Antriebe können die Vektorkomponenten der propellerfesten Kräfte in einen Vektor  $\mathbf{f} = [f_{x_1} \ f_{y_1} \ f_{x_2} \ f_{y_2} \ \dots \ f_{x_N} \ f_{y_N}]^T$  und die Übertragungsmatrizen der einzelnen Anteile zusammengefasst werden, sodass sich die Antriebskonfigurationsmatrix  $\mathbf{B}$  und der Gesamtkraftvektor  $\boldsymbol{\tau}$  ergibt.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{B}\mathbf{f} \\ \text{mit } \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -l_{y1} & l_{x1} & -l_{y2} & l_{x2} & \dots & -l_{yN} & l_{xN} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

Besteht die Notwendigkeit der zusätzlichen Betrachtung des erzeugten Rollmoments ist das Modell (28) um den Abstand des Wirkpunktes der Antriebe zum Rollzentrum auf der z-Achse mit zu beachten. Das Rollzentrum kann für die Simulation und Modellierung der Antriebe bspw. in der Allokation als fest betrachtet werden [30].

Die Erzeugung des propellerfesten Kraftvektors aus den Stellwerten des Antriebs ist propellerabhängig und muss dementsprechend modelliert werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden 360° Azimuthpropeller in den Fahrzeugen verwendet. Analoge Verfahren für andere Antriebsarten lassen sich der Literatur entnehmen, siehe [15].

Ein 360° Azimut-Propeller kann durch Drehung des Antriebes Schub in alle Richtungen erzeugen. Über die Variation der Propellerdrehzahl kann der Schub gestellt werden. Der

Zusammenhang zwischen Stellwert und erzeugtem Schub kann quasi-statisch über Gleichung (30) beschrieben werden [15].

$$f_{thr} = \text{sign}(n)K_T\rho D^4 n^2 \quad (30)$$

$K_T$  ist dabei der Schubbeiwert des Propellers,  $D$  dessen Durchmesser,  $\rho$  die Dichte des umgebenden Fluids und  $n$  die einstellbare Drehzahl. Im nominalen Betrieb ist  $K_T > 0$ . Die Leistungsaufnahme des Propellers kann über dessen Leistungsbeiwert  $K_Q$  berechnet werden.

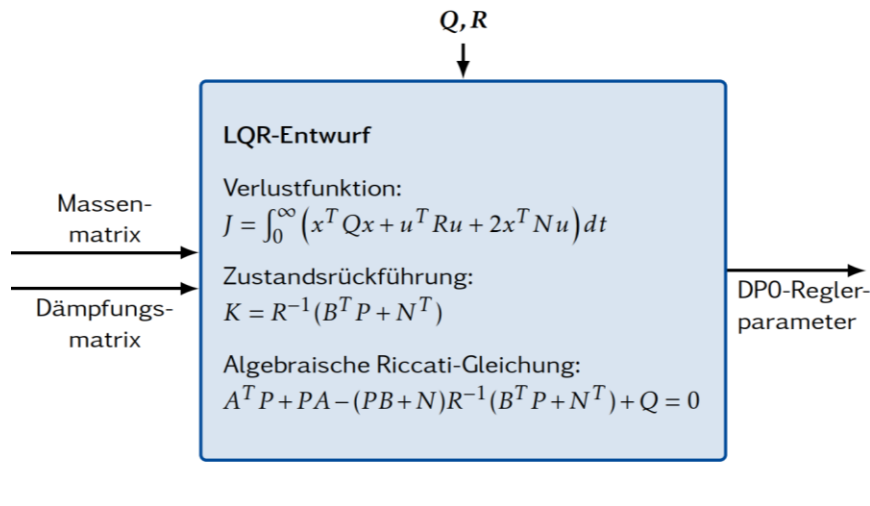
$$P_{thr} = 2\pi K_Q \rho D^5 n^3 \quad (31)$$

Diese Beiwerte modellieren das gesamte Verhalten des Propellers, wobei Effekte wie Strömungsabriss in dieser Stufe der Modellierung vernachlässigt werden können bzw. andere Effekte wie Interaktionen schon in den Koeffizienten enthalten sind. Auch Unsymmetrien in der Schubkennlinie bei positiven und negativen Drehzahlen z.B. durch Anströmung der Propeller gondel, werden in diesem einfachen Modellansatz nicht betrachtet. Bei dem Modell handelt es sich zudem um ein Freifahrmodell, sodass Anströmungseffekte nicht enthalten sind. Diese können bei Bedarf in komplexeren Modellen verarbeitet werden, z.B. Vier-Quadranten-Modell für Propeller. Daher ist dieses Modell nur für den Niedriggeschwindigkeitsbereich gültig [15, 3]. Die Dynamik des Propellers kann in erster Näherung über die Verstellzeit der Drehzahl angenähert werden, was eine Entkopplung des Modells in einen rein dynamischen und einen quasi-statischen Anteil erlaubt. Die Drehzahl hat mechanisch bedingt einen Minimal- und einen Maximalwert  $n_{min} < n_{thr} < n_{max}$ .

### 3.4.2 AP 5.b Entwurf einer Regelung zur Trajektorienverfolgung und Störungsabwegung

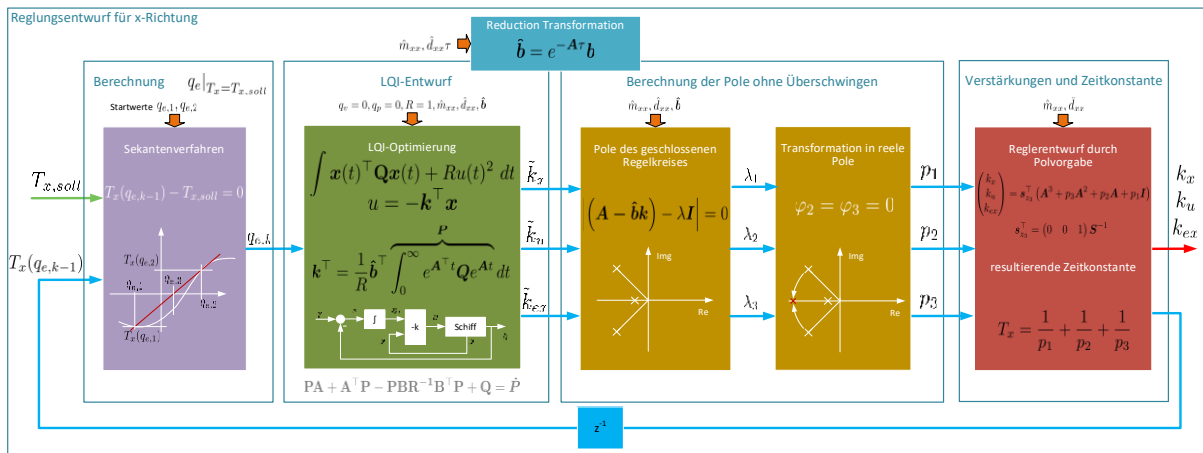
Zur Verfolgung der vom Guidance-System vorgegebenen Trajektorie muss eine Reglerstruktur entworfen werden, die eine schnelle Reaktion auf Änderungen der Solltrajektorie ermöglicht sowie eine geringe Abweichung von der aktuellen Sollposition in allen Manöverszenarien garantiert. Voraussetzung zur Umsetzung dieses Ziel ist eine frühzeitige Kompensation wind- und strömungsinduzierte Störungen sodass diese nur geringen Einfluss auf den Versatz des Schiffes haben. Als Bahnführungssystem sollen weitgehend erprobte Lösungen eingesetzt werden, welche um eine Störgrößenschätzung erweitert werden.

Als Reglerentwurfverfahren wurde ein linear-quadratischer Ansatz zur Online-Neuberechnung der Reglerparameter bei geändertem Prozessverhalten implementiert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Dieser platziert in einem iterativen Mehrschrittverfahren die Pole des geschlossenen Regelkreises so, dass eine vorgegebene Zeitkonstante der Führungsübertragungsfunktion erfüllt wird. Die Berechnung erfolgt on demand und kann im Betrieb angepasst werden. Die Umschaltung der Regelparameter wird derart durchgeführt, dass eine sprunghafte Änderung der Stellkräfte ausgeschlossen wird.



**Abbildung 8 LQR-Entwurf der Reglerparameter auf Grundlage der Masse- und Dämpfungsmatrix**

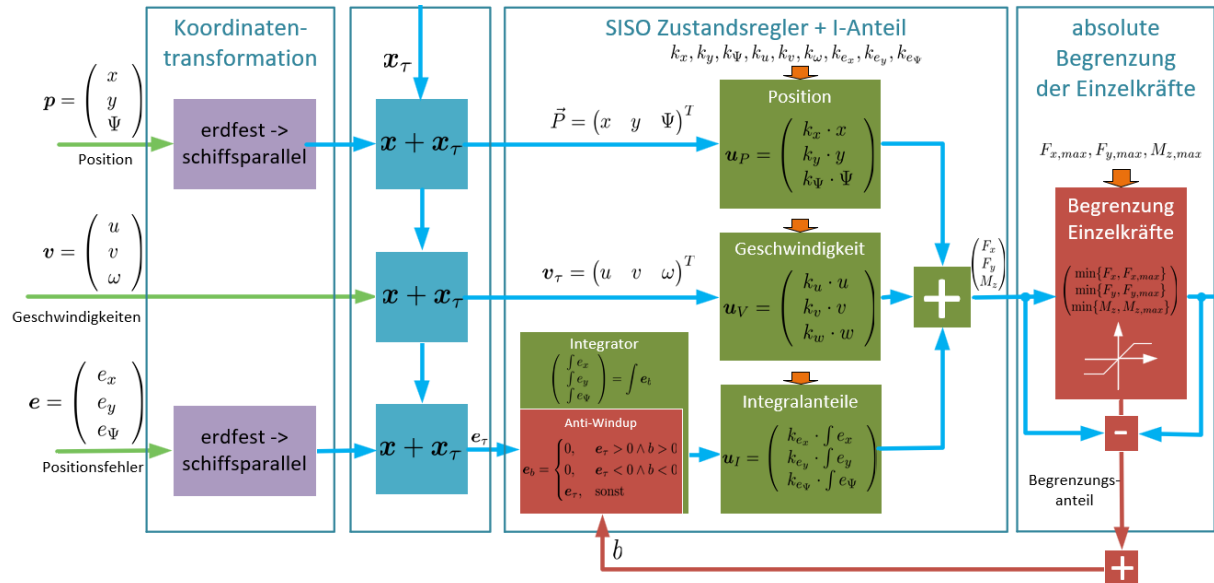
Neben dieser Nachführung der Regelungsparameter ist auch die Online-Nachverstellung der Koeffizienten der Masse- und Dämpfungsmatrix möglich. Die Reglerparameter werden auch in diesem Fall automatisch online neu berechnet und ohne Unstetigkeiten der der Stellgrößen übernommen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Struktur des Online-Regelungsentwurfs für die Längsrichtung. Dieser ist äquivalent auch für die Querrichtung und die Drehung um die Hochachse implementiert.



**Abbildung 9 Struktur des Online-Regelungsentwurfs**

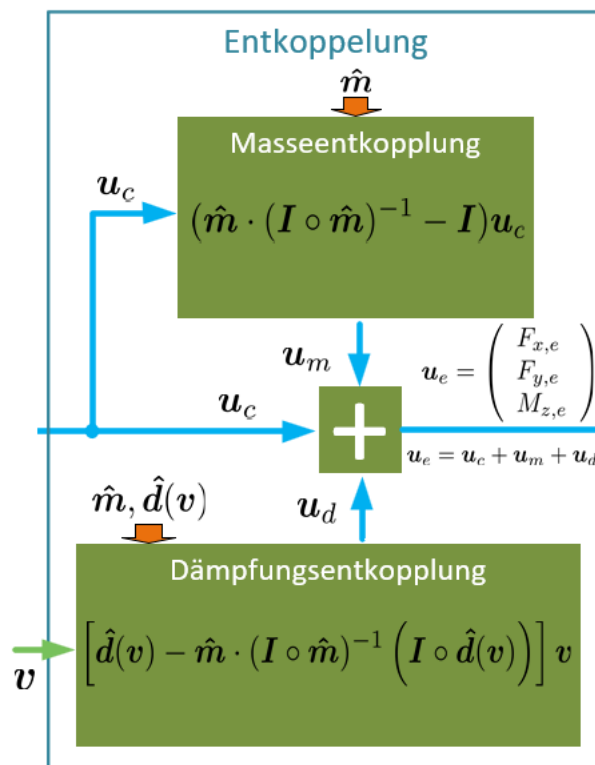
Als grundlegende Reglerstruktur wurde ein SISO-Zustandsregler in 3 Freiheitsgeraden mit Integrator ausgewählt. Absolute Begrenzungen der möglichen Kräfte werden über einen über ein Anti-Windup-Algorithmus berücksichtigt. Positionsdaten werden über eine Koordinatentransformation vom erdfesten Koordinatensystem ins schiffsparallele Koordinatensystem

überführt. Die Struktur des Reglers ist in Abbildung 10 dargestellt.



**Abbildung 10** Struktur des Zustandsreglers mit I-Anteil und Begrenzung der Einzelkräfte und des Moments

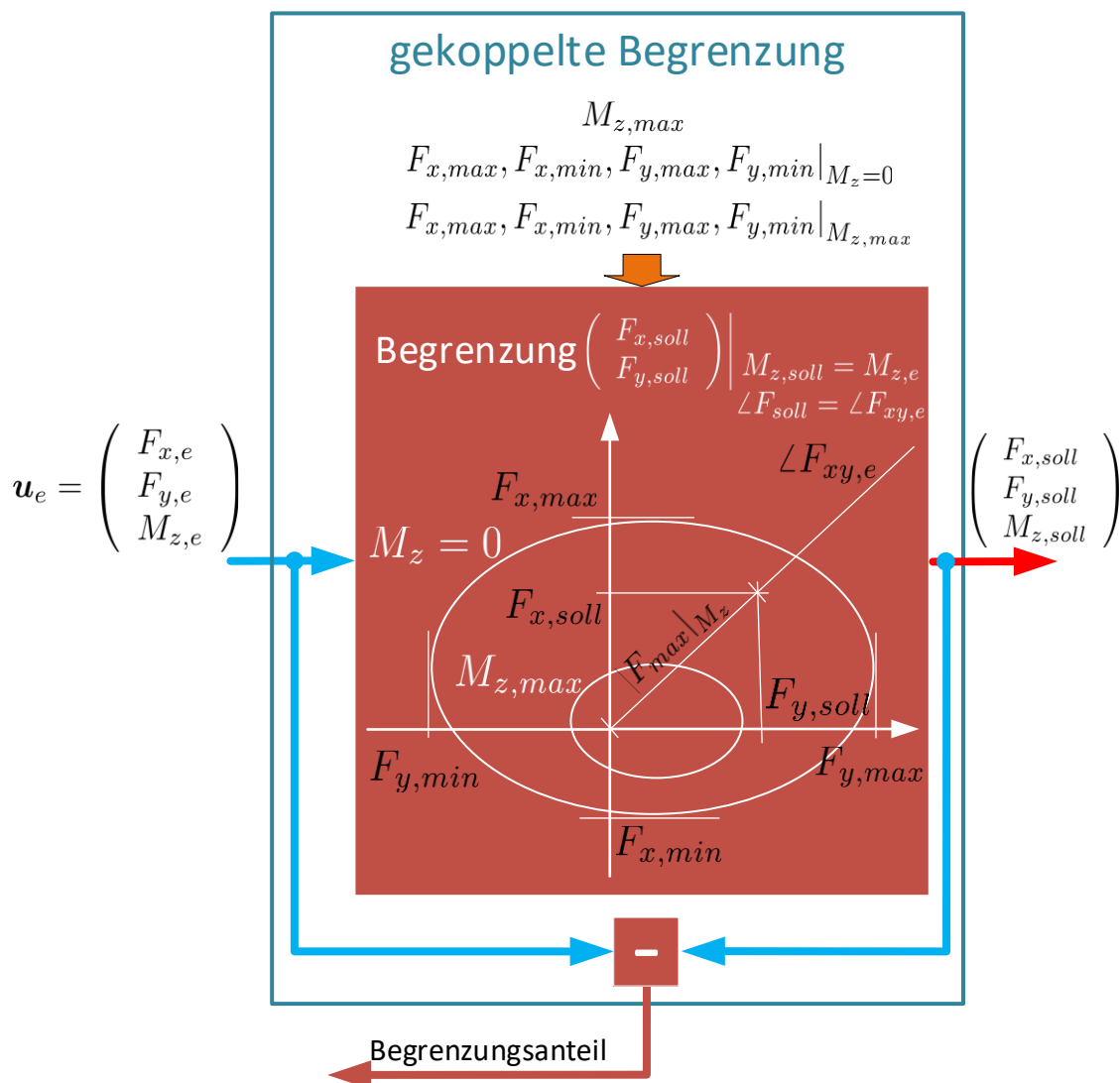
Um eine präzise Regelung zu realisieren wurde eine Entkoppelung der einzelnen Freiheitsgrade entworfen. Diese basiert auf den identifizierten Masse- und Dämpfungsmatrizen sowie den aktuellen Geschwindigkeiten. Die Struktur der Entkoppelung der Freiheitsgrade des Reglers ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11** Struktur der Entkoppelung

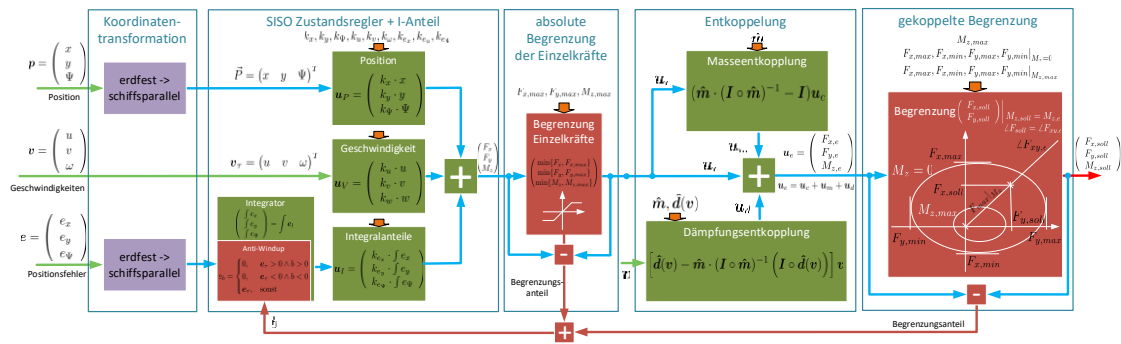
Zur optimalen Kraftvorgabe wurde die Struktur weiterhin um eine Berechnung der gekoppelten Begrenzungen der Kraftvorgaben erweitert, welche die maximalen Kraft- und

Momentevorgaben als Funktion des geforderten Moments auf Ellipsen innerhalb des Kräftekoordinatensystems eines Antriebs projiziert und interpoliert.



**Abbildung 12 Schematische Darstellung des Moduls zur gekoppelten Begrenzungsberechnung**

Das Modul wurde in der Reglerstruktur hinter der Entkoppelung der Freiheitsgerade angeordnet und arbeitet damit unabhängig von den Regelalgorithmen. Neben den eigentlichen Stellkräften wird auch der aktuelle Begrenzungsanteil vom Modul berechnet und an das Anti-Windup-Modul des Integrators des SISO Zustandsreglers zurückgekoppelt. Diese Rückwirkung garantiert die Berücksichtigung der aktiven Begrenzungen innerhalb des Regelalgorithmus. In Abbildung 13 ist die resultierende Reglerstruktur dargestellt.



**Abbildung 13 Struktur des Regelsystems mit gekoppelter Begrenzung der Stellkräfte**

In realen Szenarien kann es aufgrund der Systemkomplexität immer zu funktionalen Ausfällen kommen, die die Regelung mitunter stark beeinflussen können. Hierzu zählen Sensor- oder Aktorausfälle oder auch Einschränkungen wie die verringerte Leistungsfähigkeit eines Antriebs.

Im praktischen Einsatz hat sich gezeigt das neben den kompletten Ausfällen eines Antriebes, Abweichungen von der Antriebsleistung einzelner Antriebe sowie Ausfälle der Kommunikationsverbindungen häufige Fehlerszenarien darstellen. Latenzen der Sensorik und der Aktoransteuerung wirken sich hochgradig auf die Performance des Regelsystems aus, bis hin zum Erreichen von instabilen Zuständen während der aktivierten Positionsregelung. In erste Linie kommt es hier auf eine zuverlässige Erkennung und Lokalisierung der Fehler an, bevor geeignete Maßnahmen zur Kompensation ergriffen werden können.

Fehler in den Antrieben äußern sich oft durch eine Diskrepanz zwischen Soll- und Istwerten. Eine simple Beobachtung der Differenz ist dabei nicht zielführend, da diese die Dynamik des Antriebes nicht berücksichtigt. Sprunghafte Vorgaben von Sollwertänderungen zeigen so immer Abweichungen von bis zu 100% bis der Antrieb diesen Vorgaben folgt. In dynamischen Phasen der Regelung treten ständige Sollwertänderungen auf, sodass auch eine simple zeitliche Überwachung nicht möglich ist.

Im Rahmen dieses Projekts wurde der Kumulative-Summen-Algorithmus als statistisch basiertes Verfahren der Fehlererkennung zur Diagnose vom Soll- / Istwertabweichungen eingesetzt.

Der Kumulative-Summe-Algorithmus ist eine Variante des summierten logarithmierten Likelihood-Verhältnisses. Mit diesem Algorithmus werden die Residuen  $r$  analysiert, um auf aufgetretene Fehler zu schließen. Im fehlerfreien Fall hat das Residuum etwa die Gestalt eines normalverteilten Rauschens mit dem Mittelwert null und der Varianz des enthaltenen Messsignals.

Bei einer Signaländerung im Fehlerfall kann mit dem Algorithmus speziell eine Änderung des Mittelwertes und/oder der Varianz festgestellt werden. Um zu bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Signal-Wert  $r$  als Fehler oder als normaler Wert einzuordnen ist, wird ein Hypothesentest durchgeführt. Die Nullhypothese  $H_0$  des fehlerfreien Falls wird definiert, indem Mittelwert  $\mu$  und Varianz  $\sigma$  des fehlerfreien Signals festgelegt werden. Auf gleiche Weise muss für den Fehlerfall  $H_1$  der Mittelwert und die Varianz definiert werden.

Es ergeben sich so für  $H_0$  und  $H_1$  je eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p\{\theta_0(z)\}$  und  $p\{\theta_1(z)\}$ . Hier wird die Normalverteilung

$$p\{\theta(r)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(r-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad (32)$$

jeweils mit den Parametern

$$\theta_0 = [\mu_0 \quad \sigma_0]; \quad \theta_1 = [\mu_1 \quad \sigma_1] \quad (33)$$

verwendet. Im Algorithmus wird nun für jeden neuen Messwert überprüft, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Wert der Hypothese  $H_0$  bzw.  $H_1$  zugeordnet werden kann. Ist die  $H_1$ -Hypothese wahrscheinlicher, so wird ein entsprechend großer positiver Wert in einen Fehlerspeicher addiert, ist die  $H_0$ -Hypothese wahrscheinlicher, wird ein entsprechend negativer Wert in den Fehlerspeicher addiert. Diese Prozedur wird mit

$$S(k) = \sum_{i=1}^k \ln \frac{p\{\theta_1(r(i))\}}{p\{\theta_0(r(i))\}} \quad (34)$$

realisiert, der Summierung des sogenannten logarithmierten Likelihood-Verhältnisses. Werden nun nacheinander mehrere, eher fehlerhafte Werte verarbeitet, so steigt der Summenwert  $S(k)$  über die Zeit an.

Damit der Ergebniswert im fehlerfreien Fall nicht ins Negative anwächst, wird mit

$$g(k) = S(k) - \min_{1 < j < k} S(j) \quad (35)$$

bei null eine Begrenzung vorgenommen. Wenn aus einer fehlerfreien Zeitspanne heraus Werte auftreten, welche eher der Hypothese  $H_1$  entsprechen, so beginnt der Wert der Entscheidungsfunktion  $g(k)$  von null an zu steigen, bis schließlich eine vorgegebene Schwelle überschritten ist. Erst jetzt wird die Erkennung eines Fehlerkandidaten ausgegeben.

Um den Auftrittszeitpunkt eines erkannten Fehlers zu schätzen, wird angenommen, dass er etwa zu dem Zeitpunkt aufgetreten ist, als die Entscheidungsfunktion zu steigen begann. Genau dieser Zeitpunkt  $k_0$  kann mit

$$\hat{k}_0 = \arg \min_{1 < j < k} S(j) \quad (36)$$

bestimmt werden [33].

Bedingt durch die kleineren Systemzeiten treten innerhalb von Versuchsdurchführungen oft Probleme durch Latenzzeiten innerhalb von Signalkonvertern oder Messrechnern auf. Allgemein können diese Latenzzeiten regelungstechnisch als Totzeitglied aufgefasst werden. Je kleiner das Verhältnis zwischen den dominierenden Zeitkonstanten des Schiffs und der Zeitkonstante des Totzeitglieds ist, umso stärker wird das dynamische Verhalten beeinflusst und das Regelergebnis verfälscht.

Um bei verschiedenen Totzeiten eine Vergleichbarkeit der Regelungen zu erreichen und den prinzipiellen Entwurf des Reglers beibehalten zu können wurde die Reglerstruktur um eine Identifikation der Totzeit sowie eine Totzeitkorrektur erweitert, welche auf dem Verfahren der Reduction Transformation für Zustandsregler [34], [35] beruht. Bei diesem erfolgt eine



Korrektur der Systemzustände über die Summe der vergangenen Stellgrößen, welche in Abhängigkeit von der Totzeit abklingend gewichtet werden, siehe Abbildung 14. Die notwendige Identifikation der aktuellen Totzeit erfolgt über die Messung der Signallaufzeiten.

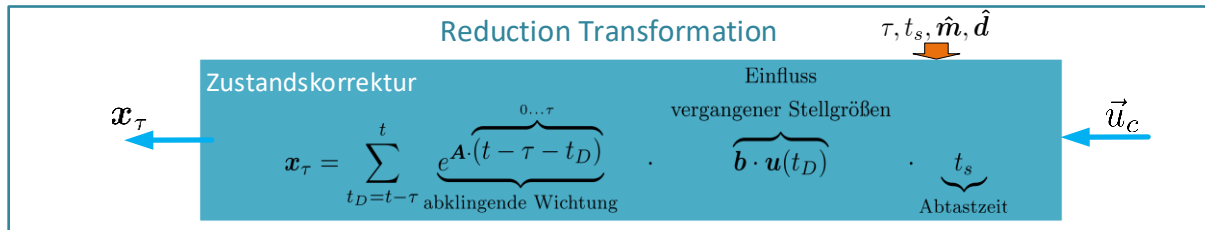


Abbildung 14 Zustandskorrektur per Reduction Transformation Methode

Neben den beiden oben genannten Verfahren wurde für jede Übertragungsstrecke eine Laufzeitmessung integriert, welche schwellwertüberwacht werden. Weiterhin wurden diverse statistische Verfahren zur Sensorüberwachung implementiert. Sämtliche Überwachungsfunktionen wurden im Regelsystem integriert und mit geeigneten visuellen und akustischen Signalisierungen hinterlegt. Kann es in Folge von Fehlern zu Gefährdungen von Menschen und Material kommen, wurden entsprechende Notabschaltungen integriert.

Im Ergebnis dieses Arbeitspaketes wurde Ausfallszenarien und zu Kompensationsmöglichkeiten des Regelsystems untersucht und entsprechende Verfahren und Überwachungen implementiert, um eine frühe Erkennung von Fehlern zu gewährleisten und falls möglich zu kompensieren. Weiterhin wurde eine umfangreiche Überwachungs- und Notfallabschaltung integriert.

Die resultierende Reglerstruktur ist in Abbildung 15 dargestellt.

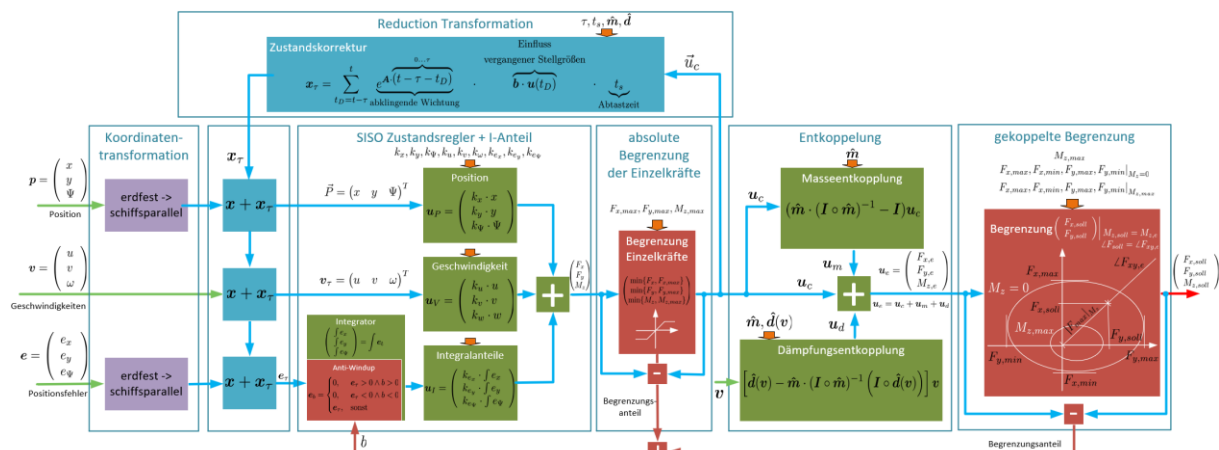
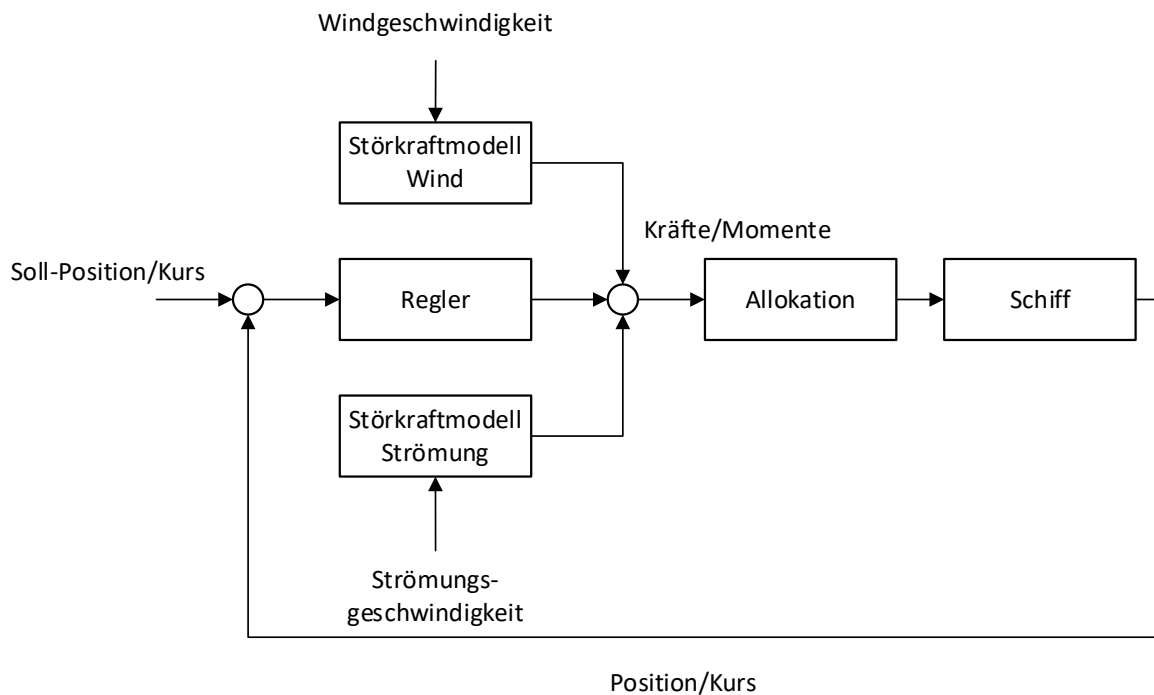


Abbildung 15 Struktur des Manöverreglers

Um die Störungen zu kompensieren bevor sie Auswirkungen haben, d.h. einen Versatz des Fahrzeuges von der Sollposition entsteht, wurde die Struktur um eine Vorsteuerung für Wind- und Strömungsstörungen erweitert. Grundlage sind die Störkraftmodelle aus AP4. Die Erweiterung ist in Abbildung 16 dargestellt.

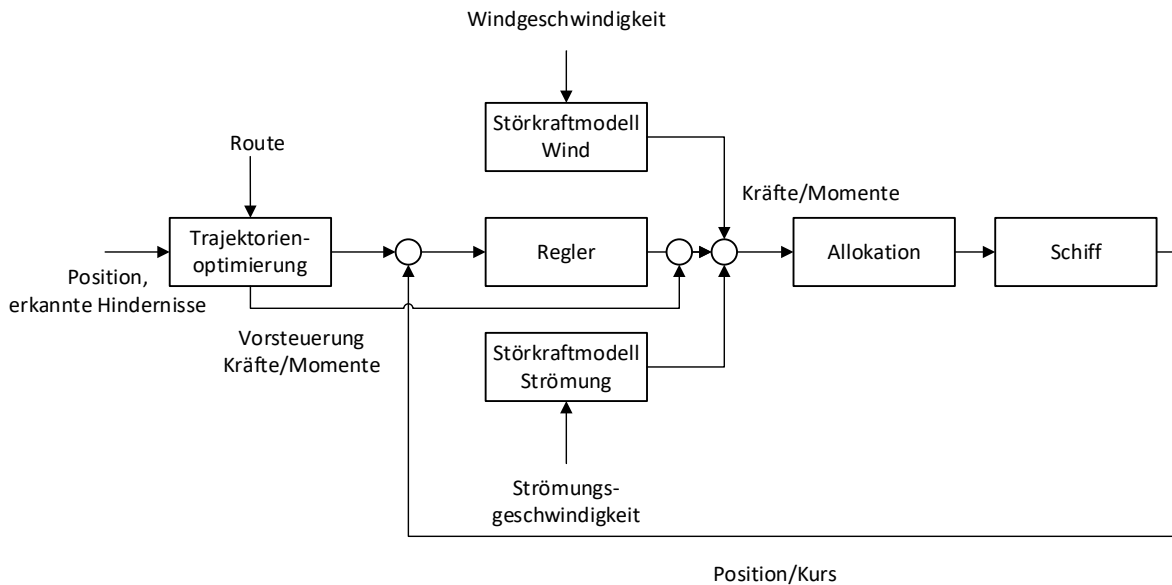


**Abbildung 16 Erweiterung der Regelungstruktur um eine Störkraftvorsteuerung**

### 3.4.3 Erweiterung des Regelsystems um eine Trajektorienfolgeregelung

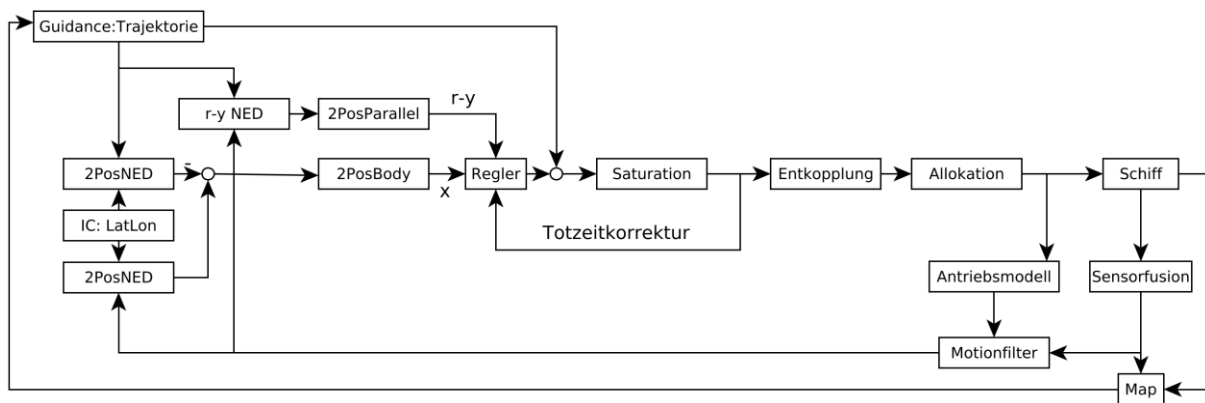
Das wesentliche Ziel der Regelung ist das präzise Halten einer Sollposition beim Wirken von Störungen verschiedenster Art und Intensität. Langsame Positionsänderungen werden von solchen Regelstrukturen problemlos bewältigt. Für die Transitfahrt ist jedoch das Folgen einer vorgegebenen Trajektorie und damit eine schnelle Positions- oder Kursänderung notwendig. Der Verlauf der Trajektorie ist dabei im Allgemeinen bekannt und kann aus regelungstechnischer Sicht zur Vorsteuerung des Reglers genutzt werden.

In diesem Arbeitspaket wurde eine Trajektorienfolgeregelung entwickelt und in die Struktur des Regelsystems implementiert. Wesentliches Ziel war hierbei die modulare, unabhängige Integration mit zu den vorhandenen Strukturen unabhängigen Parametrierung. Umgesetzt wurde die Trajektorienfolgeregelung als kaskadierte Struktur über dem vorhandenen Regler. Das Trajektorienmodul generiert aus der aktuellen Position, dem Kurs sowie der geplanten Route und den erkannten Hindernissen eine zeitliche Abfolge von Bahnpunkten. Dabei werden die notwendigen Stellkräfte berechnet und können direkt für die Regelung genutzt werden.



**Abbildung 17 Struktur des Reglersystems mit Trajektorienmodul**

Um einen Positionsverlauf, d.h. eine Trajektorie vorgeben zu können wurde die Zustandsregelung um entsprechende Mechanismen erweitert. Hierfür mussten spezielle Koordinatentransformationen eingeführt werden, welche die erdfesten Positionsvorgaben in das Bezugssystem des Fahrzeugs umrechnen. Diese Transformationen unterscheiden sich für den integralen, linear-quadratische Entwurf nach [32] von den schiffsparellen Koordinaten in [3].



**Abbildung 18 Struktur der Koordinatentransformationen und Zustandsübergabe**

Für die stoßfreie Aktivierung der Trajektorienfolgeregulung müssen zum Start der Regelung die aktuell anliegenden Stellgrößen des Schiffes übernommen und davon ausgehend der vom Regler berechnete Stellvorgang begonnen werden. Die detaillierte Struktur der Koordinatentransformationen und Zustandsübergabe an den Regler ist in Abbildung 18 dargestellt. Zu den Details der Trajektorienoptimierung siehe AP 7.

### 3.4.4 AP 5.c Sensordatenfusion und Störgrößenfilterung

Die Prozesszustände des Schiffes sind für die Regelung und Steuerung von essentieller Bedeutung. Hierzu zählen neben der Bewegung des Schiffes im Wasser auch Informationen über die Störungen, die auf das Schiff wirken. Die Filter werden genutzt, um nicht messbare Zustände zu schätzen, Störeinflüsse zu reduzieren und Messaussetzer zu überbrücken. Aktuelle Ansätze behandeln jedoch nur die horizontale Bewegung und beachten externe Störungen nur bedingt.

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Erweiterung vorhandene Filterstrukturen auf Basis von Kalman-Filtern. Dies umfasst zum einen die zusätzliche Behandlung der Freiheitsgrade Rollen und Stampfen zur Messwertkorrektur sowie zum anderen die Einbeziehung von Messungen, die eine Schätzung der Störgrößen (Wind, Wellen und Strömung) erlauben.

#### 3.4.4.1 Square root spherical simplex unscented kalman filter

Alle Kalman-Filtervarianten des in diesem Projekt entwickelten Reglersystems sind als Wurzelimplementierung des Unscented-Kalman-Filters (UKF) mit der Propagation von Sigma-Punkten über einem sphärischen Simplex implementiert. Diese Variante des modellbasierten Kalman-Filters bietet zwei wichtige Vorteile. Zu einen können hier nichtlineare Modelle des zu beobachtenden Prozesses verwendet werden, wodurch der Detailgrad und damit einhergehend die Genauigkeit der Prozessmodellierung den Anforderungen angepasst werden kann. Zum anderen stellt diese Variante eine ableitungsfreie Alternative zum Extendet-Kalman-Filter (EKF) dar. Dies ermöglicht eine Modellierung der Zustandsgleichungen ohne die sonst notwendigen Beschränkungen, welche sich aus der Anforderung der analytischen Lösbarkeit ergeben.

Im Folgenden sind die Struktur des Unscented-Kalman-Filters und die grundlegenden Berechnungsschritte erklärt:

#### Prozessmodell

Grundlage des Prozessmodells ist die Modellierung der Schiffsbewegung in 3 Freiheitsgraden, wie sie in Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. hergeleitet wurde. Eingangsgrößen sind die externen auf das Schiff ausgeübten Stellkräfte  $F_{St}$ . Die Zustandsgleichung und Ausgangsgleichung ergeben sich dann wie folgt

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{s,k} &= f(\mathbf{x}_{s,k-1}, \mathbf{F}_{k,ext}) + \nu_s \\ \mathbf{y}_{s,k} &= h(\mathbf{x}_{s,k}) + v_s\end{aligned}\tag{37}$$

mit den Vektoren der Zuständen  $\mathbf{x}_s$ , der externen Kräften  $\mathbf{F}_{ext}$ , der Ausgangsgrößen  $\mathbf{y}_s$ , sowie den Rauschtermen  $\nu_s$  und  $v_s$ .

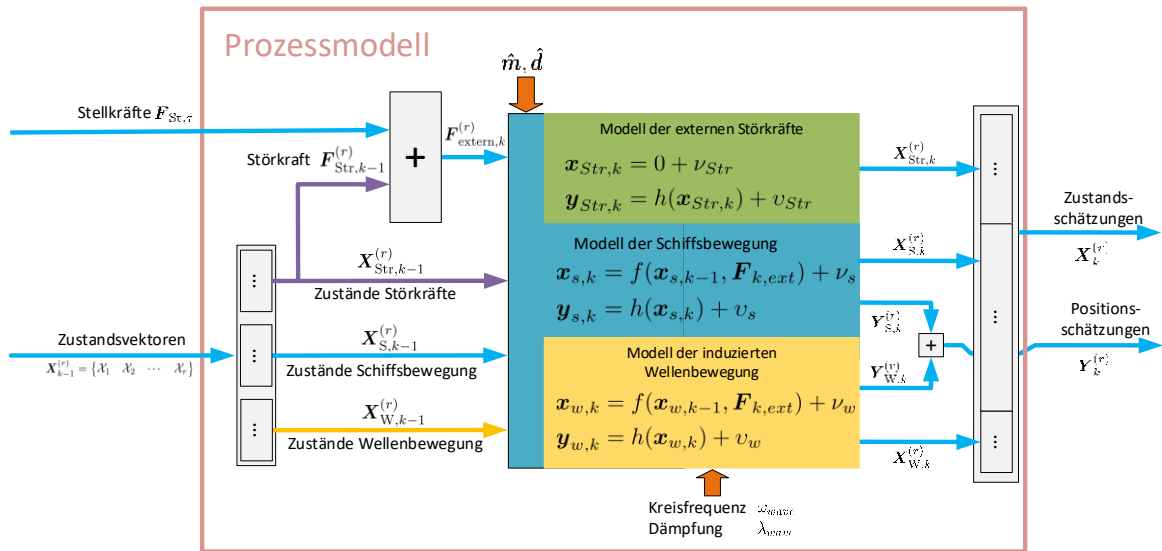


Abbildung 19 Struktur des Prozessmodells des Filtermoduls

Neben dem Modell der Schiffsbewegungen wird ein Modell der externen Störgrößen zur Schätzung von Drift- und Windkräften eingeführt.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{Str,k} &= 0 + \nu_{Str} \\ \mathbf{y}_{Str,k} &= h(\mathbf{x}_{Str,k}) + \nu_{Str} \end{aligned} \quad (38)$$

Für einen energie- und verschleißoptimierten Betrieb ist es notwendig, welleninduzierte Schiffsbewegungen, welche auf Grund der begrenzten Dynamik der Antriebe nicht korrigiert werden können, nicht in die Regelung mit einfließen zu lassen. Für eine effektive Filterung dieser Bewegungen wird ein Modell der induzierten Wellenbewegung in das Prozessmodell integriert.

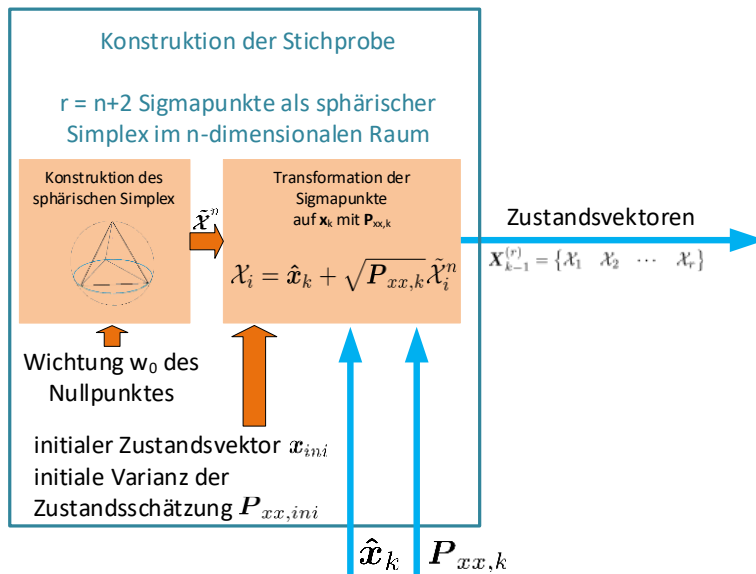
$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{w,k} &= f(\mathbf{x}_{w,k-1}, \mathbf{F}_{k,ext}) + \nu_w \\ \mathbf{y}_{w,k} &= h(\mathbf{x}_{w,k}) + \nu_w \end{aligned} \quad (39)$$

$k$  gibt in allen Gleichungen den jeweiligen Rechenschritt der iterativen Zustandsschätzung an.

Die drei Modellierungen bilden zusammen das Prozessmodell des Schiffes, das für den UKF-Filterentwurf verwendet wurde.

Die Zustandsschätzung erfolgt beim UKF über statistische Methoden, wobei die Mittelwerte und Varianzen der Zustände über eine Stichprobe ermittelt werden. Die Konstruktion der Stichprobe erfolgt als sphärisches Simplex über dem  $n$ -dimensionalen Zustandsraum. Die so konstruierten Punkte werden als Sigma-Punkte bezeichnet und über die Varianz auf die Mittelwerte der Zustände transformiert.

$$\mathcal{X}_i = \hat{\mathbf{x}}_k + \sqrt{\mathbf{P}_{xx,k}} \tilde{\mathcal{X}}_i^n \quad (40)$$



**Abbildung 20 Konstruktion der Stichprobe**

Damit können aus den aktuellen Zuständen die Mittelwerte und Varianz der Zustände und Ausgangsgrößen des nächsten Abtastschrittes berechnet werden.

$$\bar{x}_k = \sum_{i=1}^r w_i X_k^{(i)} \quad (41)$$

$$\bar{P}_{xx} = \sum_{i=1}^r w_i (X_k^{(i)} - \hat{x}_k)(X_k^{(i)} - \hat{x}_k)^T + Q \quad (42)$$

$$\bar{y}_k = \sum_{i=1}^r w_i Y_k^{(i)} \quad (43)$$

$$\bar{P}_{yy} = \sum_{i=1}^r w_i (Y_k^{(i)} - \hat{y}_k)(Y_k^{(i)} - \hat{y}_k)^T + R \quad (44)$$

Die Vorhersagen der prädierten Modellwerte werden dann über die gewichteten Differenzen zu den gemessene Positionswerte korrigiert.

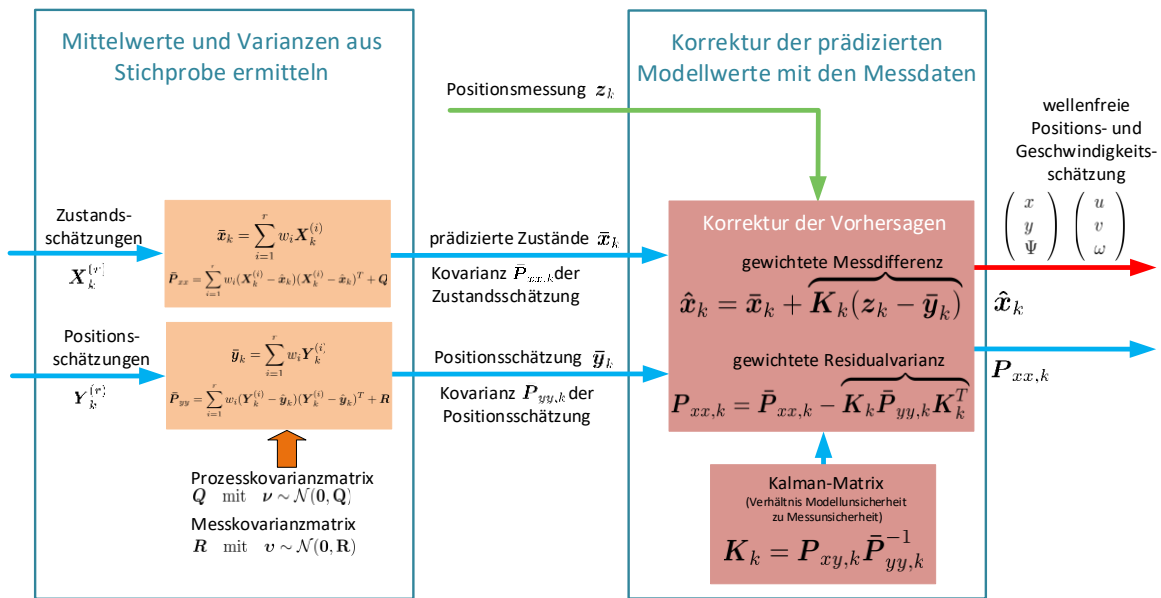


Abbildung 21 Berechnung der Mittelwerte und Varianzen

Zur Berücksichtigung der Übertragungszeiten der Stellbefehle zu den Antrieben wurde noch eine Totzeitkorrektur für die Stellkräfte integriert. Die Gesamtstruktur des UKF-Filtermoduls ist in Abbildung 22 dargestellt.

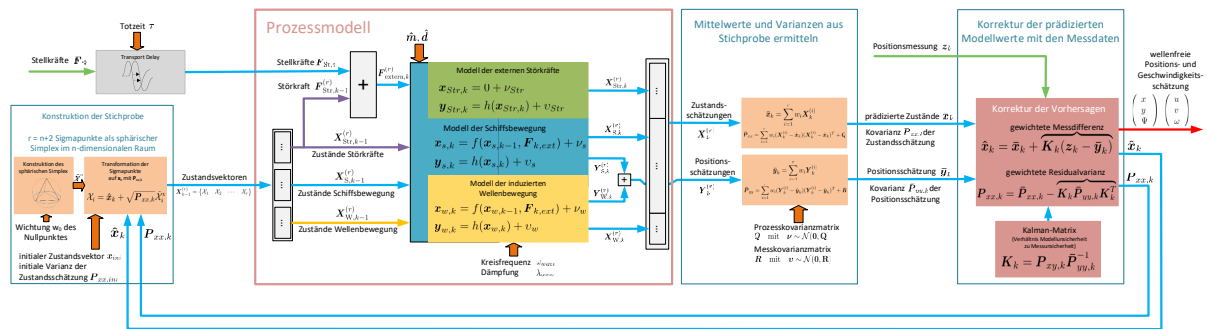


Abbildung 22 Struktur des UKF

Die Schätzung der Zustände und Ausgangsgrößen per UKF ist ein iterativer Algorithmus. Nachfolgend werden die notwendigen Berechnungsschritte aufgeführt:

1. Initialisierung des Zustandsvektors:

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad x \in \mathbb{R}^{n \times 1} \quad (45)$$

2. Initialisierung der Prozess-Standardabweichung:

$$S_0 = \text{chol} \left( E \left[ (x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T \right] \right) \quad (46)$$

dabei ist

$$\text{chol}(\cdot)$$

die Cholesky Faktorisierung. Sie kann als Wurzel einer Matrix interpretiert werden.

3. Initialisierung der Sigmapunkte durch Erstellung eines  $n$ -mehrdimensionalen Simplex

$$\boldsymbol{x}_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -x_{in1} & +x_{in1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -x_{in2} & -x_{in2} & jx_{in2} & 0 & 0 \\ 0 & -x_{in2} & -x_{in2} & -x_{in2} & jx_{in2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (47)$$

mit

$$x_{in1} = \frac{1}{\sqrt{2W_s}} \quad (48)$$

und

$$x_{in2} = \frac{1}{\sqrt{j(j+1)W_s}} \quad (49)$$

Dabei ist  $j = 1 \dots n$  die Zeile in  $\boldsymbol{x}_{in}$

Die Gewichtung der einzelnen Sigma-Punkte wird gewählt mit

$$W_s = \frac{1 - W_0}{n + 1} \quad (50)$$

wobei  $0 < W_0 < 1$  entsprechend der Nichtlinearität des Systems gewählt wird.

4. Der Prädiktionsschritt des Filters für

$$k \in \{1, \dots, \infty\}$$

ist gegeben mit

$$\boldsymbol{x}_{k-1} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} + (\boldsymbol{S}_{k-1})^T \boldsymbol{x}_{in} \quad (51)$$

$$\boldsymbol{x}_{k|k-1}^* = f(\boldsymbol{x}_{k-1}, \vec{u}) \quad (52)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k^- = \sum_{i=0}^{n+1} W_s \boldsymbol{x}_{i,k|k-1}^* \quad (53)$$

$$\boldsymbol{S}_k^- = \text{qr} \left( \left[ \sqrt{W_s} \left( \boldsymbol{x}_{1:n+1,k|k-1}^* - \hat{\boldsymbol{x}}_k^- \right) \quad \sqrt{\boldsymbol{Q}} \right] \right) \quad (54)$$

$$\boldsymbol{S}_k^- = \text{cholupdate} \left( \boldsymbol{S}_k^-, \boldsymbol{x}_{0,k}^* - \hat{\boldsymbol{x}}_k^-, +1 \right) \quad (55)$$

Darin steht

$$\text{cholupdate}(\boldsymbol{A}, \vec{x}, +1)$$

für das numerisch effiziente Rank-Eins-Update der bereits berechneten Cholesky-Dekomposition

$\boldsymbol{A}$  mit  $\vec{x}$ .

Es entspricht

$$\text{chol}(\boldsymbol{A} + \vec{x}\vec{x}^T) = \text{cholupdate}(\text{chol}(\boldsymbol{A}), \vec{x}, +1) \quad (56)$$

5. Der Update-Schritt des Filters ist gegeben mit:



$$\boldsymbol{x}_{k-1} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} + (\boldsymbol{S}_k^-)^T \boldsymbol{x}_{in} \quad (57)$$

$$\boldsymbol{z}_{k|k-1} = h(\boldsymbol{x}_{k-1}, \vec{u}) \quad (58)$$

$$\boldsymbol{z}_k^- = \sum_{i=0}^{n+1} W_s \boldsymbol{z}_{i,k|k-1} \quad (59)$$

$$\boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k} = \text{qr}([\sqrt{W_s}(\boldsymbol{z}_{1:n+1,k} - \hat{\boldsymbol{z}}_k) \quad \sqrt{\boldsymbol{R}}]) \quad (60)$$

Darin bezeichnet

$$\text{qr}(\cdot)$$

eine QR-Faktorisierung mit  $\boldsymbol{R}$  als Rückgabewert.

$$\boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k} = \text{cholupdate}(\boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k}^-, \boldsymbol{z}_{0,k} - \hat{\boldsymbol{z}}_k, +1) \quad (61)$$

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{z}_k} = \sum_{i=0}^{n+1} W_s (\boldsymbol{x}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{x}}_k^-) (\boldsymbol{z}_{i,k|k-1} - \hat{\boldsymbol{z}}_k^-)^T \quad (62)$$

6. Der Korrekturschritt des Filters ist gegeben mit:

$$\boldsymbol{K}_k = \left( \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{z}_k} / \boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k}^T \right) / \boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k} \quad (63)$$

dabei nutzt der Operator / Matrix-Faktorisierungen zur Vermeidung der Matrixinvertierung entsprechend

$$(\cdot) / (\cdot) = (\cdot) (\cdot)^{-1} \quad (64)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k = \hat{\boldsymbol{x}}_k^- + \boldsymbol{K}_k (\boldsymbol{z}_k - \hat{\boldsymbol{z}}_k^-) \quad (65)$$

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{S}_{\tilde{\boldsymbol{z}}_k} \quad (66)$$

$$\boldsymbol{S}_k = \text{cholupdate}(\boldsymbol{S}_k^-, \boldsymbol{U}, -1) \quad (67)$$

darin meint -1 ein Cholesky-Downdate entsprechend

$$\text{chol}(\boldsymbol{A} - \vec{x}\vec{x}^T)$$

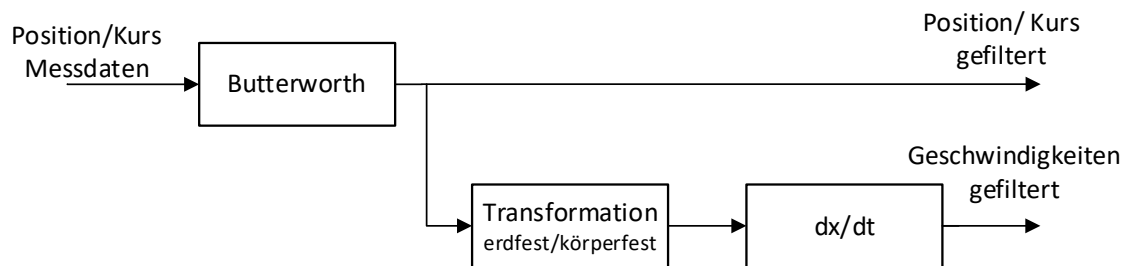
Die Variable  $\boldsymbol{Q}$  steht für die Prozesskovarianz und  $\boldsymbol{R}$  ist die Kovarianz der Messung.  $\vec{u}$  ist das Eingangssignal.

### 3.4.4.2 Weitere Filtermodule und praktische Implementierung

Der guten Performance des oben beschriebenen Unscented-Kalman-Filter stehen die hohe Komplexität und aufwändige Parametrierung entgegen. Weiterhin bedarf es beim UKF eine

Initialisierungs- und Konvergenzphase, für die entsprechende Werte zur Verfügung stehen müssen. Es wurde daher in diesem Projekt ein Tiefpassfilter entworfen und implementiert, der zur Initialisierung, zum Gütevergleich und als Rückfallebene des UKFs dient.

Der Filter soll aus den gemessenen Positionen und Kurswinkeln sowohl Positionsdaten als auch Geschwindigkeitswerte liefern. Dies erfordert neben der Differentiation eine Koordinatentransformation der erdfesten Positionen in das körperfeste Koordinatensystem der Geschwindigkeiten. Abbildung 24 zeigt die Struktur des Filters.



**Abbildung 23 Struktur der Tiefpassfilterung**

Der Tiefpassfilter wurde als Butterworth-Filter ausgelegt. Die mit der steigenden Ordnung zunehmende Phasenverschiebung des Filteralgorithmus ist für die nachfolgende Regelung sehr nachteilig, weshalb ein Kompromiss bezüglich einer, mit der Ordnung des Filters steigenden, scharfen Grenzfrequenz sowie einer schnell abfallenden Amplitudendämpfung eingegangen wurde. Bedingt durch die notwendige Differentiation innerhalb des Filtermoduls, war jedoch eine minimale Filterordnung von 2 notwendig, die auch als aktuelle Filterordnung festgelegt wurde.

Das Modul liefert mit nur einem zu konfigurierenden Parameter eine einfache und unter allen Betriebsbedingungen zuverlässige Filterung der Position und der Geschwindigkeiten, welche ohne Initialisierung und Konvergenz einsatzbereit ist. Diese Eigenschaften machen sie zu einer zuverlässigen Rückfallebene des UKFs. Weiterhin können die gefilterten Werte zur Initialisierung der Zustandsvektoren des Kalman-Filters verwendet werden.

#### **3.4.4.3 Störungsschätzung**

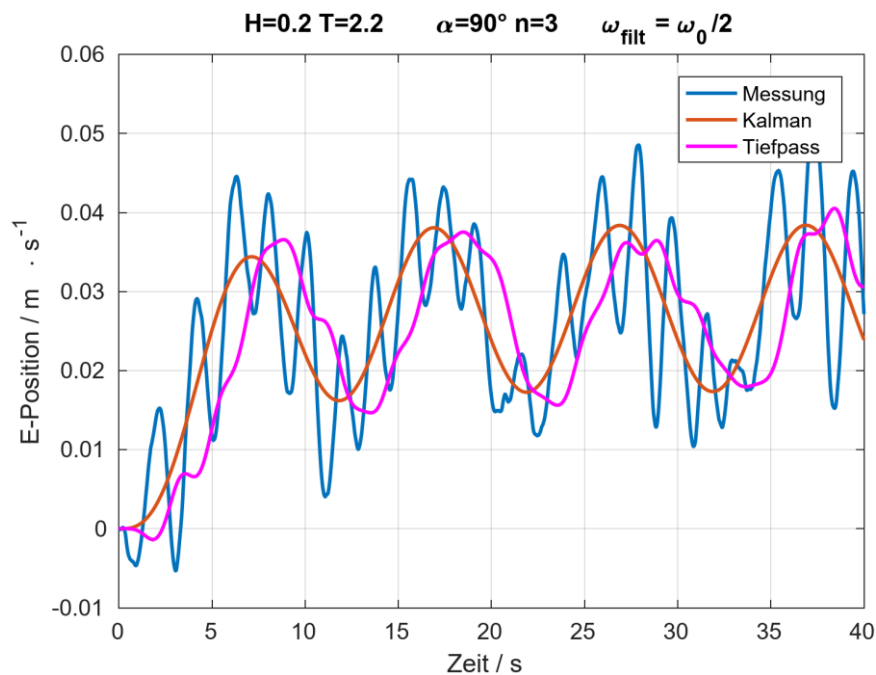
Wie in Abschnitt 3.4.4.1 beschrieben wurde im UKF ein Modell der Störkräfte die auf das Schiff wirken integriert. Als zu schätzende Zustände dieses Modells werden die Längs- und Querkräfte sowie das Drehmoment um die Hochachse geschätzt, welche nicht ursächlich aus den Antrieben des Schiffes resultieren. In Abgrenzung zu den Kräften der induzierten Wellenbewegung, werden in diesem Modell nur kontinuierlich wirkende Kräfte im Frequenzbereich nahe Null erfasst. Die Adaptionrate ist dabei parametrierbar.

Das Modell kann nicht die Ursache der Kräfte erfassen, das heißt strömungsinduzierte Driftkräfte und windinduzierte Kräfte werden hier als Summe erfasst.

#### **3.4.4.4 Ergebnisse**

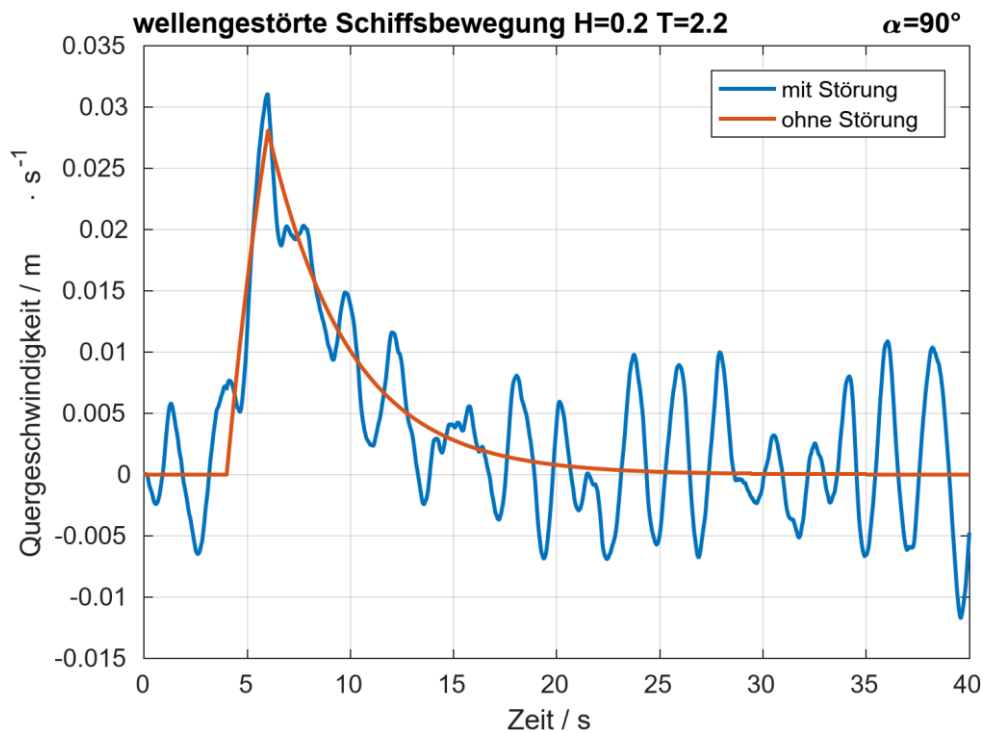
Die Implementierungen verschiedener Ausbaustufen des UKF-Filtermoduls sowie des Tiefpassfilters wurden in den Modellversuchen verwendet. Dabei zeigte sich nach der Initialisierung und dem Ende der Konvergenzphase ein deutlicher Performancegewinn im Vergleich

zum Tiefpassfilter (Abbildung 24). Insbesondere verringert sich die bei der Tiefpassfilterung systemimmanente Phasenverschiebung auf die Verzögerungszeit eines Prädiktionsschrittes des Kalman-Filters. Die Phasenreserve des geschlossenen Regelkreises und damit die mögliche Reglerperformance erhöht sich so erheblich.



**Abbildung 24 Vergleich Messung, Tiefpassfilterung und UKF-Filterung**

Weiterhin werden Regelvorgänge auf Grund hochfrequenter Störungen, welche durch die begrenzte Leistung der Stellorgane und auf Grund der Trägheit des Schiffes nicht ausgeregelt werden können, weitgehend vermieden. In Abbildung 25 ist der Zeitverlauf eines Ausregelvorgangs einer Querkraftstörung innerhalb einer wellengestörten Schiffsbewegung zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass eine schnelle und effektive Reaktion auf die Störung erfolgt, ohne dass die hochfrequente Wellenstörung einen Einfluss auf die Regelung hat.

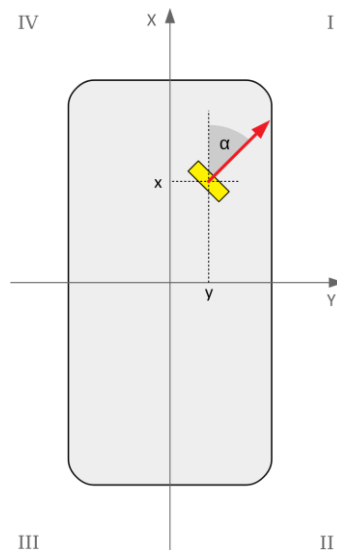


**Abbildung 25 Ausregelvorgang einer Querkraftstörung bei wellengestörter Schiffsbewegung**

### 3.4.5 AP 5.d Allokation und Stellgrößengenerierung

Die Allokation dient der Generierung der Stellgrößen aus den vom Regler geforderten Kräften und Momenten, die auf das Fahrzeug wirken sollen. Je nach Art und Anordnung der Antrieben eines Fahrzeuges unterscheidet sich die Umsetzung der Allokation erheblich. Weiterhin sind die Präzision, die Dynamik und der Wirkungsgrad wichtige Nebenbedingungen bei der Realisierung.

Das Fahrzeug besitzt zwei 360° Azimut-Propeller. Der  $i$ -te Antrieb hat dabei eine Position  $(x_i, y_i)$  in körperfesten Koordinaten (in Metern) sowie eine Krafrichtung  $\alpha_i$  bei positiver Kraft (in Radiant). Der Winkel gibt hierbei die Richtung an, in der eine Kraft auf das System ausgeübt wird. Eine positive Kraft in Richtung  $\alpha_i = 0$  trägt also zur Vorkraft X bei, siehe Abbildung 26.



**Abbildung 26 Definition Aktorposition und Krafrichtung**

Die Schubkräfte  $\tau_1, \tau_2$  [N] beider Antriebe werden zusammen mit den Winkeln  $\alpha_1, \alpha_2$  zu einer gemeinsamen Vorkraft  $X$  [N], Seitwärtskraft  $Y$  [N] und einem gemeinsamen Drehmoment  $N$  [Nm] zusammengefasst

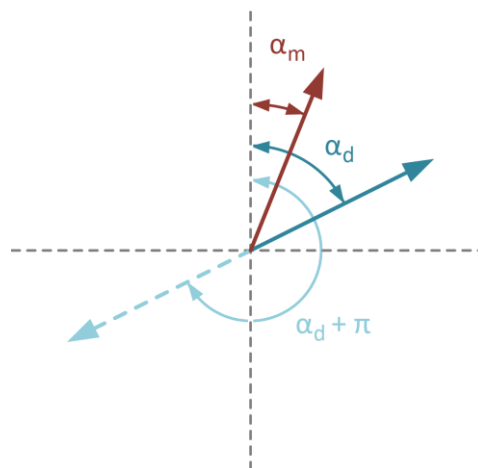
$$\begin{aligned} X &= \tau_1 \cos \alpha_1 + \tau_2 \cos \alpha_2 \\ Y &= \tau_1 \sin \alpha_1 + \tau_2 \sin \alpha_2 \\ N &= \tau_1 (x_1 \sin \alpha_1 - y_1 \cos \alpha_1) + \tau_2 (x_2 \sin \alpha_2 - y_2 \cos \alpha_2) \end{aligned}$$

Die Summer der Antriebskräfte kann dann nach folgenden Gleichungen definiert werden:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -y_1 & x_1 & -y_2 & x_2 \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \\ \tau_2 &= \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \\ \alpha_1 &= \text{atan2}(Y_1, X_1) \\ \alpha_2 &= \text{atan2}(Y_2, X_2) \end{aligned}$$

$(\cdot)^+$  bezeichnet hierbei die Moore-Penrose-Inverse. Die Schubkraft, die in diesem Fall erzeugt wird, ist immer positiv. Da ein Antrieb eine Schubkraft in zwei Richtungen erzeugen kann, erfolgt anschließend eine Betrachtung der Winkeldifferenz aus dem gewünschten Winkel  $\alpha_d$  und dem aktuell gemessenen Winkel  $\alpha_m$ . Mit  $\tau_i$  und  $\alpha_i$  ist eine Schubkraft und eine Richtung gegeben. Eine äquivalente Kraft ergibt sich mit  $-\tau_i$  und  $\alpha_i \pm \pi$ . In Abbildung 27 ist dieser Zusammenhang illustriert.



**Abbildung 27 Definition der Schubkraft**

Aus beiden Möglichkeiten wird diejenige ausgewählt, welche die geringste Winkeldifferenz zu  $\alpha_m$  erzeugt.

$$\tau = \begin{cases} \tau_d, & \text{if } |sa(\alpha_d - \alpha_m)| \leq \pi/2 \\ -\tau_d, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_d, & \text{if } |sa(\alpha_d - \alpha_m)| \leq \pi/2 \\ sa(\alpha_d + \pi), & \text{otherwise} \end{cases}$$

Die Funktion  $sa(\cdot)$  berechnet den symmetrischen Winkel ihres Arguments und gibt einen Winkel im Bereich  $[-\pi, \pi)$  zurück.

Die Gesamtstruktur des Regelsystem inklusive der Allokation, der Parametrierung, der Identifikationsmodule sowie des Online-Filter- und Reglerentwurfs ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Übernahme der identifizierten und geschätzten Parameter erfolgt on Demand über den Entwicklungsleitstand.

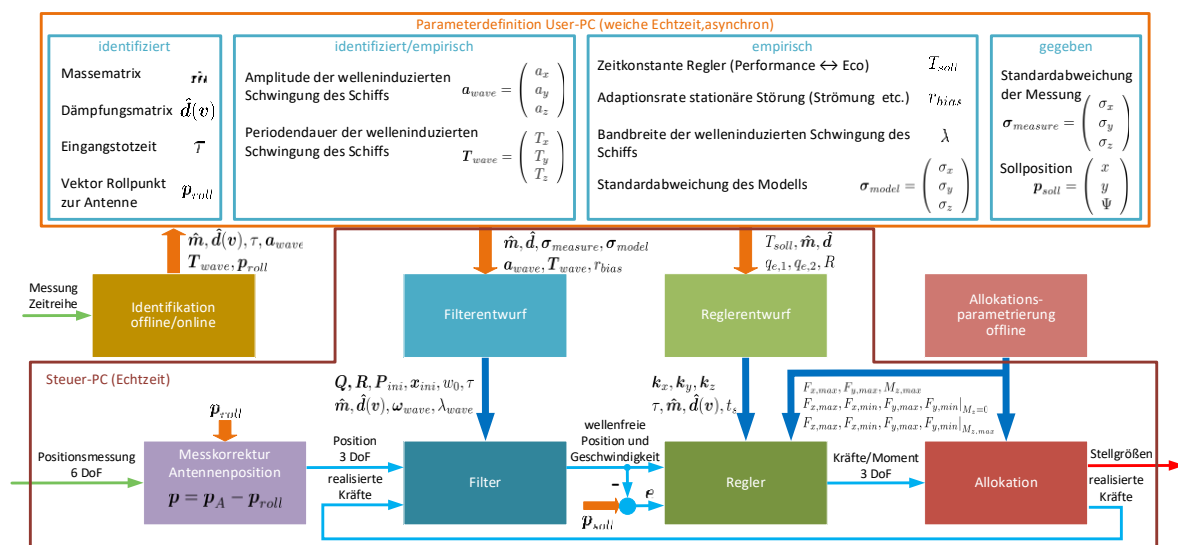


Abbildung 28 Gesamtstruktur des Regelsystems

### 3.4.6 AP 5.e Schnittstelledefinition Antriebe

Die Azimutpropeller der Fahrzeuge lassen sich in Drehzahl und Winkel verstellen. Die als RIM-Drives konzipierten Propeller sind als synchrone Gleichstrommaschinen ausgeführt, dessen Drehfelder über einen Motorcontroller gesteuert werden. Die physikalische Ansteuerung erfolgt über CAN-Bus mit einem an das CANopen-Protokoll angelehnten vereinfachten Übertragungsprotokoll.

Die Winkel der Azimutpropeller werden über Nanotec-Servomotoren verstellt, welche über das CANopen-Protokoll, Geräteprofil CiA 402 (elektrische Antriebe) angesteuert werden. Da die Kommunikation in der genutzten Matlab/Simulink-Toolkette ausschließlich über Ethernet/UDP erfolgt, wurden zur Umsetzung CAN/UDP-Gateways genutzt. Die CANopen-Frames der OSI-Anwendungsschicht 7 werden hierfür in die UDP-Frames gekapselt. Die CANopen-Zustandsmaschine nach CiA402 wurde in der genutzten Matlab/Simulink-Toolkette umgesetzt.

Es wurde eine Notsteuerung über eine 868MHz-Sicherheitsfernbedienung realisiert. Diese kann die CAN/UDP-Gateways des Regelsystems auf dem Fahrzeug abschalten und damit die Ansteuerung der Antriebe durch das Regelsystem im Fehlerfall komplett unterbinden.

Gleichzeitig können CANopen-Commandos von der Fernsteuerung über eine zweites CAN-Gateway übertragen werden. Weiterhin sind zur Abschaltung der Antriebe 4 Notausschalter an den Ecken des Fahrzeuges vorgesehen. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 29 dargestellt.

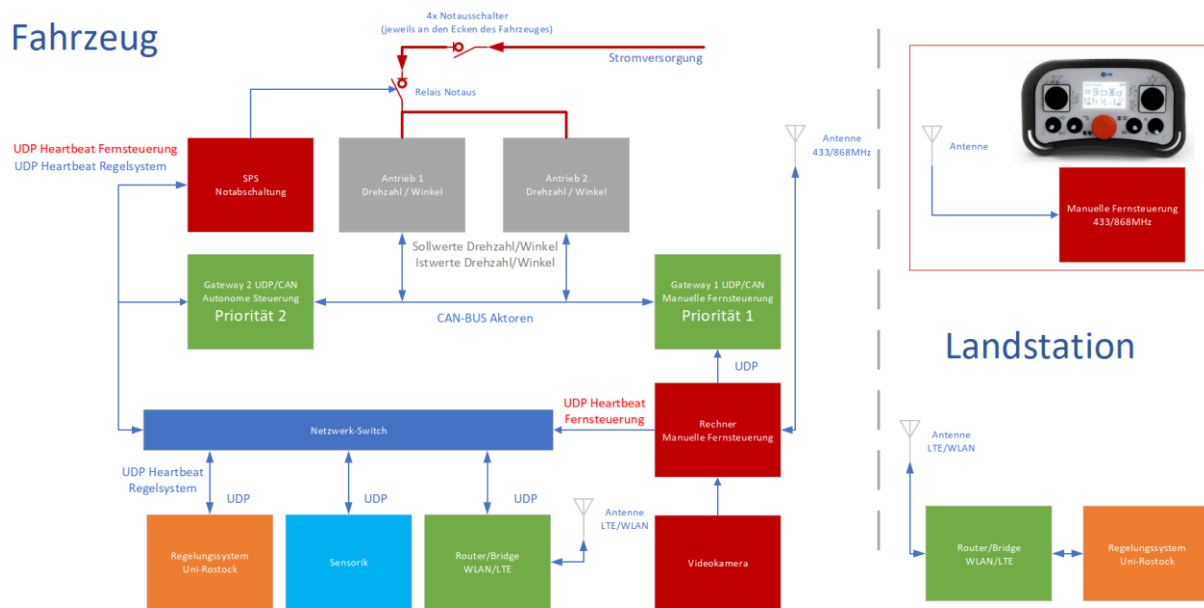


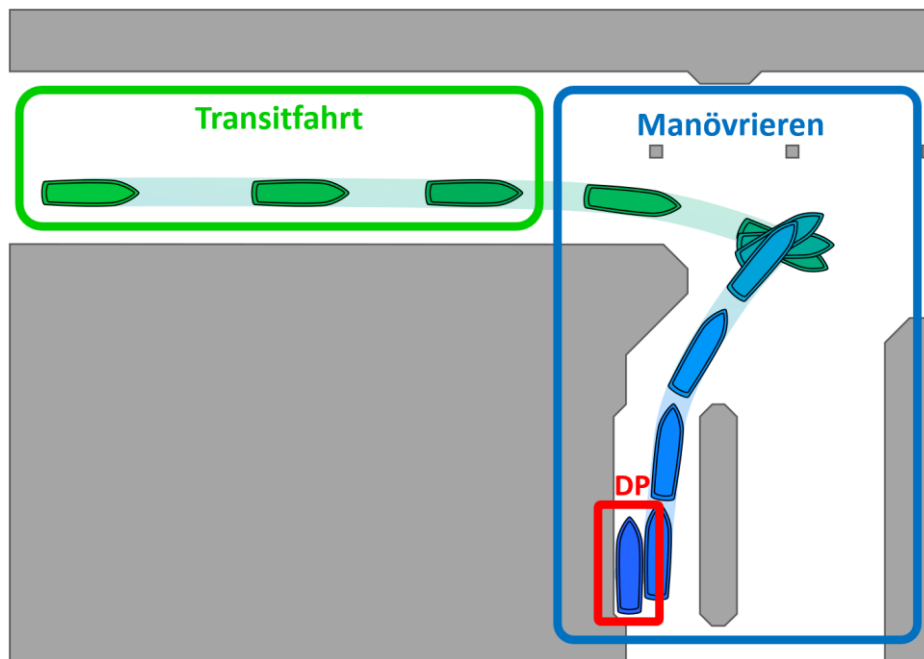
Abbildung 29 Aufbau der Antriebsansteuerung

### 3.5 AP 7 Entwicklung eines Trajektorienkorrektursystems

#### 3.5.1 AP 7.a Analyse und Konzepterstellung

Für die Umsetzung hochautomatisierter bis autonomer Steuerungen von Schiffen ist es notwendig, die oft nur logistisch geplante Route an die reale Situation auf dem Wasser anzupassen. Insbesondere sollen erkannte Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer umfahren werden bzw. es gilt Kollisionen zu verhindern. Reale Fahrten auf Binnengewässern können dabei in drei Szenarien unterteilt werden, siehe auch Abbildung 30:

- Transittfahrt, z.B. Fahrten entlang eines Kanals oder einer begrenzten Wasserstraße
- Manövrieren, also das Agieren in der Nähe von festen Strukturen wie Kaikanten, Bühnen etc.
- Docking bzw. Dynamisches Positionieren, z.B. das Anlegen oder die Einfahrt und das Festmachen in Schleusen



**Abbildung 30 Szenarien der Fahrt eines Binnenschiffes**

Mit einer vorgegebenen logistischen Route und einer Erkennung der Hindernisse auf dem Wasser stellt sich die Aufgabenstellung folgendermaßen dar:

Gegeben sind:

- Startposition und –geschwindigkeit
- Zielposition
- Unbewegte Hindernisse (Polygone)
- Form des Fahrzeuges (Polygone)

Gesucht ist eine Trajektorie, die Start- und Zielposition verbindet und Kollisionen vermeidet. Die Trajektorie soll dabei den zeitlichen Verlauf der Stellgrößen sowie Zustandsgrößen und Ausgangsgrößen enthalten und die Bewegungsdynamik des Fahrzeuges sowie deren Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigen.

Als mögliche Lösungsansätze können zwei prinzipielle Vorgehensweisen unterscheiden werden. Zum einen die Formulierung als nichtlineares Optimierungsproblem. Wie jedes nichtlineare Optimierungsproblem kann hier keine Garantie gegeben werden, dass das globale Optimum gefunden wird. Der Erfolg der Optimierung hängt vielmehr von guten Anfangswerten ab. Weiterhin sind nichtkonvexe Hindernisse schwer zu integrieren und die Rechenzeiten auf aktuellen mobilen Rechner beträgt üblicherweise mehrere Minuten.

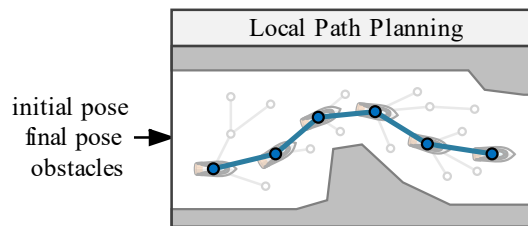
Zum anderen werden Sampling-basierte Ansätze für die Lösung des Problems eingesetzt. In diesen erfolgt die Trajektorienoptimierung über Zwischenschritte (Samples), welche nach gewählten Kriterien optimiert bzw. verworfen werden können. Die Verbindung zwischen den Samples kann wiederum über nichtlineare Optimierungsverfahren oder über Polynome generiert werden. Der Zustandsraum solcher Verfahren hat mindestens 6 Dimensionen (3 Posen sowie 3 Geschwindigkeiten). Das Erkunden des gesamten Zustandsraumes bis zu einer akzeptablen Auflösung ist damit sehr rechenintensiv.

Es wurde in diesem Vorhaben ein zweistufiger Ansatz gewählt:

### **Stufe 1: Lokale Pfadplanung**

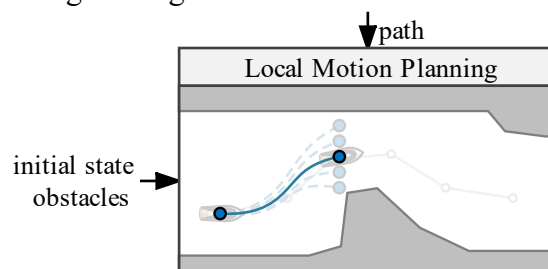


- Finden eines Pfades zur Zielpose (Position und Heading)
- kollisionsfreie Planung des Pfades



## Stufe 2: Lokale Bewegungsplanung

- Finden einer Trajektorie basierend auf dem gefundenen Pfad
- Berücksichtigung des dynamischen Bewegungsverhaltens und von Stellgrößenbegrenzungen

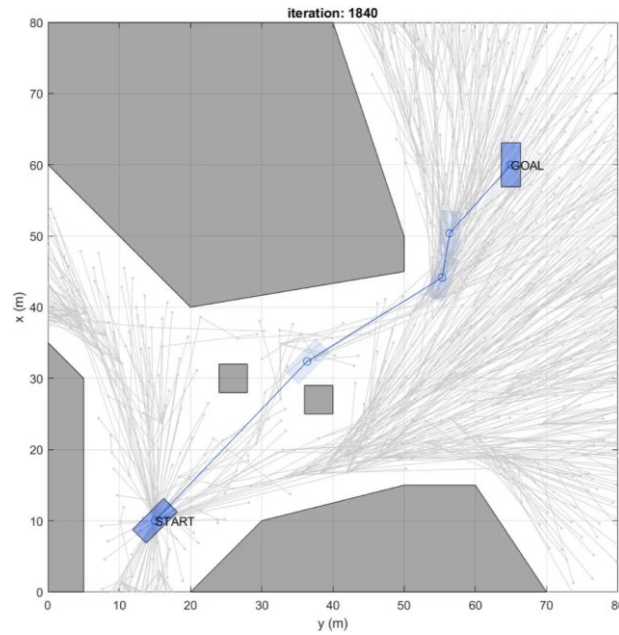


Als lokales Pfadplanungsverfahren wurde das Rapidly-Exploring Random Tree (RRT\*) als Sampling-basiertes Verfahren ausgewählt. Bei diesem Verfahren müssen folgende Werte gegeben sein:

- Initiale Pose  $\mathbf{q}_I = (x_I, y_I, \psi_I)^T$
- Zielpose  $\mathbf{q}_G = (x_G, y_G, \psi_G)^T$
- Statische Hindernisse  $\mathcal{O}$  als konvexe Polygone
- Fahrzeugumriss als konvexes Polygon

Gesucht ist ein kollisionsfreier Pfad von  $\mathbf{q}_I$  nach  $\mathbf{q}_G$ .

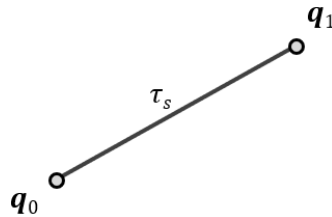
Das RRT\*-Verfahren wählt für die Lösung des Suchproblems zufällige Posen und fügt diese einem Pfadbaum hinzu, wenn die Verbindungskanten kollisionsfrei sind, siehe Abbildung 31. Für eine optimale Lösung können vorhandene Knoten neu verknüpft werden.



**Abbildung 31 Prinzip des RRT\*-Verfahrens zur kollisionsfreien Pfadfindung**

Beim RRT\*-Verfahren kann das Problem auftreten, dass der Pfad zu nahe an einem Hindernis vorbeiführt. Das Verfahren wurde daher um eine Kostenfunktion zur Wichtung der Distanz des Pfades zu den Hindernissen erweitert.

Es seien  $\mathbf{q}_0 = (x_0, y_0, \psi_0)^T$ ,  $\mathbf{q}_1 = (x_1, y_1, \psi_1)^T$  zwei Knoten eines Pfades  $\tau_s$ .



Als gewichtete euklidische Distanz mit Berücksichtigung der Winkeldistanz des Headingwinkels zwischen Start- und Zielpose kann dann definiert werden:

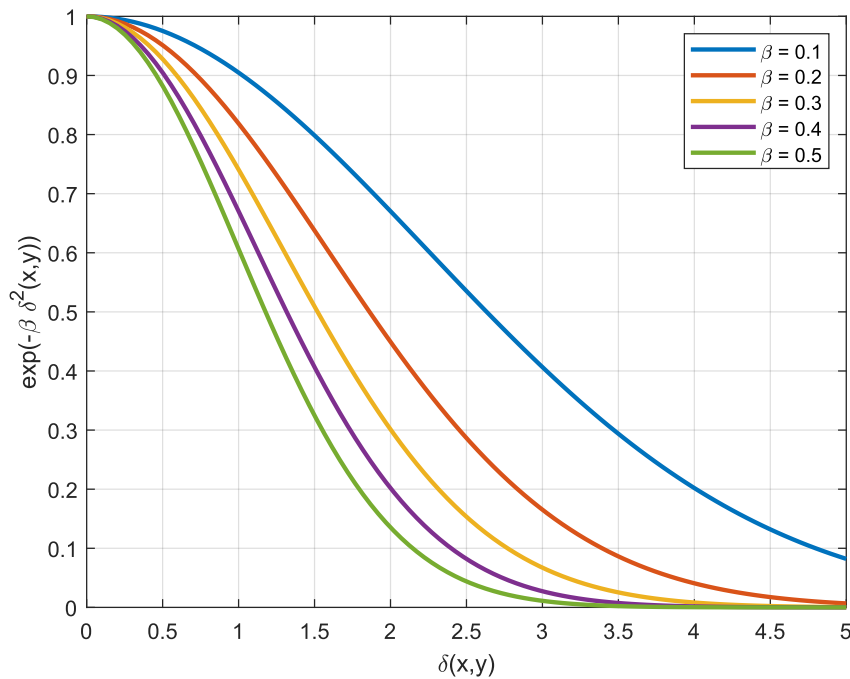
$$\rho(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + \left(w_\psi \sigma(\psi_1 - \psi_0)\right)^2}$$

mit dem Wichtungsfaktor  $w_\psi$  der Heading-Winkeldistanz und  $\sigma(\cdot)$  der Heading-Winkeldistanzfunktion im Bereich  $[-\pi; +\pi)$ .

Für die Bewertung des Abstandes des Pfades  $\tau_s$  zu den Hindernissen (Polygone) wird ein Kostenterm als ein Skalarfeld  $f_{\tau_s}$  entlang der Verbindungsline  $\tau_s$  zwischen den Posen  $\mathbf{q}_0$  und  $\mathbf{q}_1$  folgendermaßen definiert:

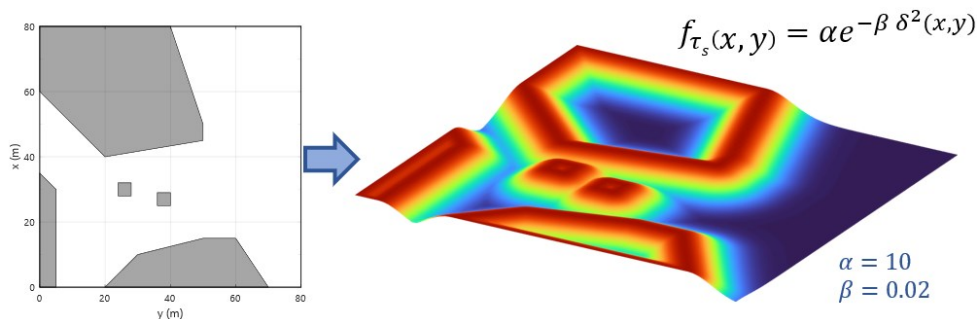
$$f_{\tau_s}(x, y) = \alpha e^{-\beta \delta^2(x, y)}$$

mit der kleinsten Distanz  $\delta(x, y)$  zu allen Kanten aller Polygone und dem Tuning-Parametern  $\alpha \geq 0$  zur Skalierung dieses Kostenterms und  $\beta > 0$  für die Wichtung des exponentiellen Abfalls der quadratischen Distanz, siehe Abbildung 32.



**Abbildung 32 Verlauf der Exponentialfunktion der quadratischen Distanz in Abhängigkeit von  $\beta$**

Eine grafische Darstellung des Skalarfeldes  $f_{\tau_s}$  ist in Abbildung 33 für  $\alpha = 10$  und  $\beta = 0,02$  illustriert.



**Abbildung 33 Skalarfeld der Distanz zu den Hindernispolygonen**

Aus beiden Kostentermen kann dann eine Kostenfunktion zur Bewertung eines Pfades definiert werden:

$$C(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (w_\psi \sigma(\psi_1 - \psi_0))^2} + \int_{\tau_s} \alpha e^{-\beta \delta^2(x,y)} ds$$

Schiffsrümpfe sind im Allgemeinen zur effizienten Bewegung in Vorwärtsrichtung optimiert. Der entworfene Pfadplanungsalgorithmus berücksichtigt dies jedoch nicht. Es werden daher auch Pfade ausgewählt, die einen hohen Anteil an Querbewegungen enthalten und damit energetisch relativ ineffizient sind. Um die Effizienz der resultierenden Schiffsbewegung zu

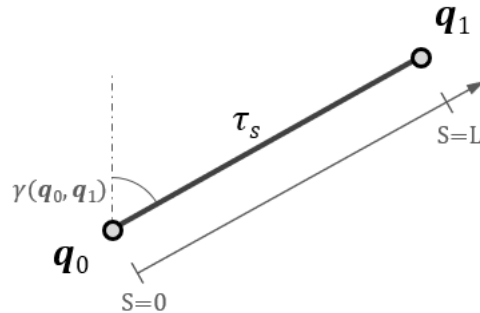
erhöhen, wurde die Kostenfunktion um einen Term zur Bewertung des Headingwinkels relativ zur Pfadrichtung erweitert. Es sei

$$L = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$$

die geometrische Länge der Verbindungspfades  $\tau_s$  und

$$\gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) = \tan^{-1}((y_1 - y_0)/(x_1 - x_0))$$

der Winkel dieses Pfades in der x-y-Ebene.



Dann kann folgender Kostenterm definiert werden:

$$w_\gamma \int_{s=0}^L \sin^2 \left( \psi_0 + \frac{s}{L}(\psi_1 - \psi_0) - \gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) \right) ds$$

mit  $w_\gamma$  als Wichtungsfaktor gegenüber der Kostenfunktion und  $s$  der geometrischen Distanz von Pose  $\mathbf{q}_0$ . Die Kosten der Querbewegung des Schiffes werden über die  $\sin^2(\cdot)$  Funktion zwischen 0 und 1 normiert, siehe Abbildung 34.

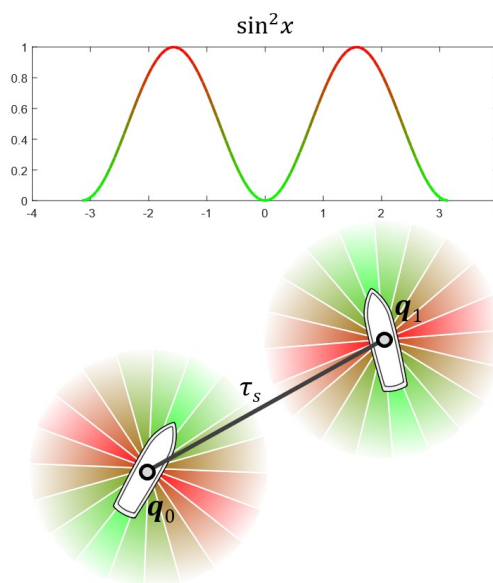


Abbildung 34 Visualisierung der Kosten der Querbewegung

Die resultierende Kostenfunktion mit allen drei Kostentermen lautet dann

$$C(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (w_\psi \sigma(\psi_1 - \psi_0))^2} + \int_{\tau_s} \alpha e^{-\beta \delta^2(x,y)} ds + w_\gamma \int_{s=0}^L \sin^2 \left( \psi_0 + \frac{s}{L} (\psi_1 - \psi_0) - \gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) \right) ds$$

### Praktische Realisierung

Zur numerischen Realisierung der Kostenfunktion wurde das Skalarfeld  $f_{\tau_s}$  quantisiert und über

$$\int_{\tau_s} f_{\tau_s} ds \approx \sum_{\{i,j\} \in \mathbb{T}line} cell(i,j) \cdot ds(i,j)$$

angenähert, siehe auch Abbildung 35.

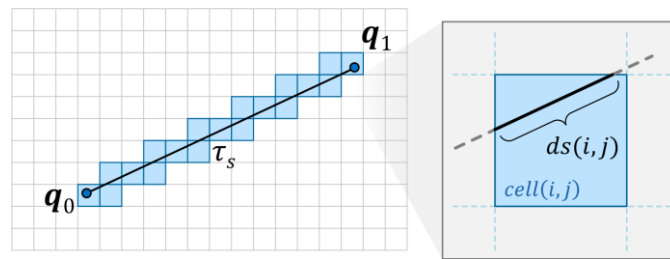


Abbildung 35 Quantisierung der Skalarfunktion  $f_{\tau_s}$

Die Quantisierung hat den Vorteil, dass die Kosten für jede Zelle  $cell(i,j)$  im Voraus berechnet werden können. Um den Rechenaufwand zu verringern, kann  $f_{\tau_s}$  nur für einige wenige Kontrollzellen berechnet und die übrigen Zellen durch bilineare Interpolation bestimmt werden.

Für die Berechnung des Kostenterms der Querbewegung wird die explizite Berechnungsformel

$$w_\gamma \frac{L}{4d} (2d + \sin(2(\gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) - \psi_0)) - \sin(2(\gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) - \psi_L)))$$

mit

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \\ \gamma(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) &= \tan^{-1}((y_1 - y_0)/(x_1 - x_0)) \\ d &= \psi_0 - \psi_L \\ \psi_L &= \psi_0 + \sigma(\psi_1 - \psi_0) \end{aligned}$$

verwendet.

Ein Beispiel der Quantisierung und Speicherung als Lookup-Table für 3 Polygone ist in Abbildung dargestellt.

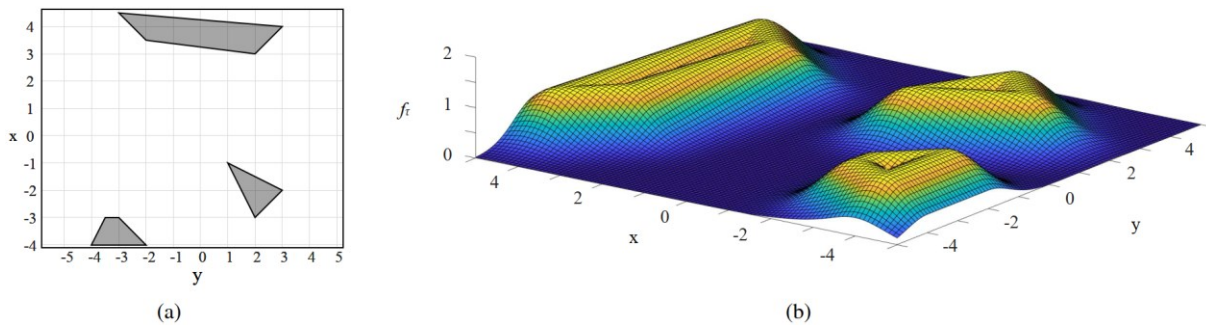


Abbildung 36 Quantisierung und Speicherung der Kostenfunktion als 100x100 Lookup-Table

Abschließend ist in Abbildung 37 ein Vergleich der Kostenfunktionen mit Distanzterm und der erweiterten Kostenfunktion mit zusätzlicher Bewertung der Abstände zu den Hindernissen und der Querbewegung dargestellt.

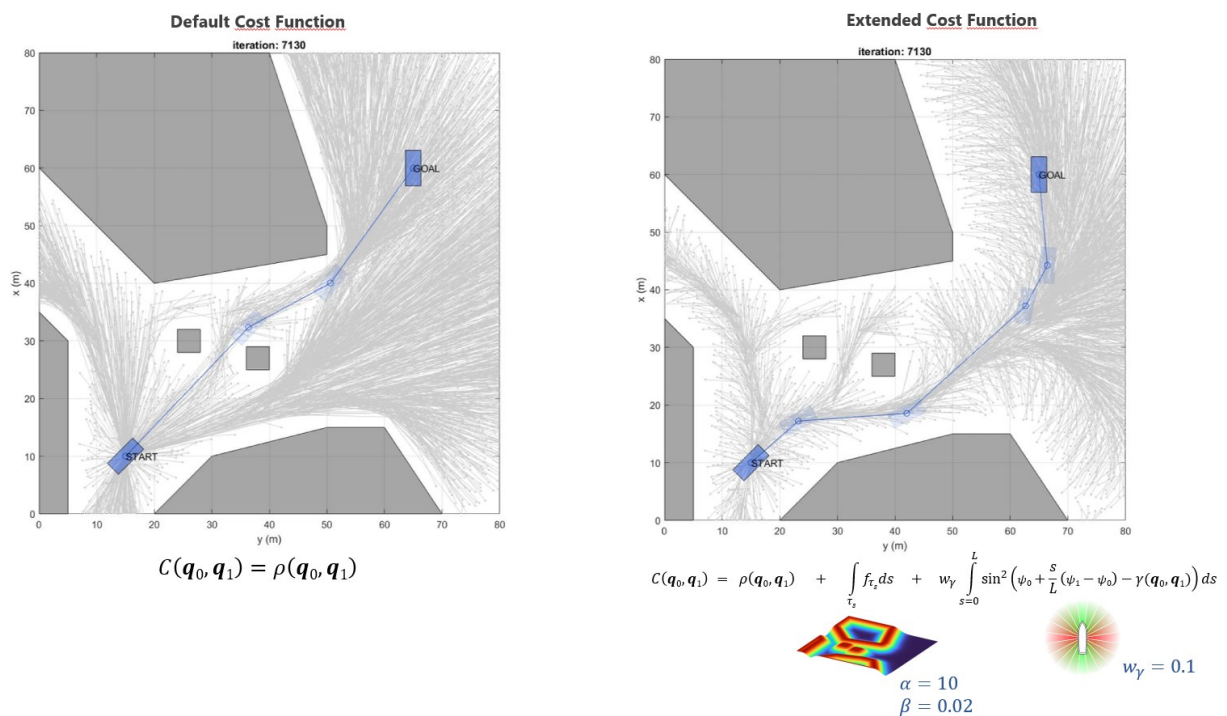


Abbildung 37 Vergleich der Standardkostenfunktion mit der erweiterten Kostenfunktion

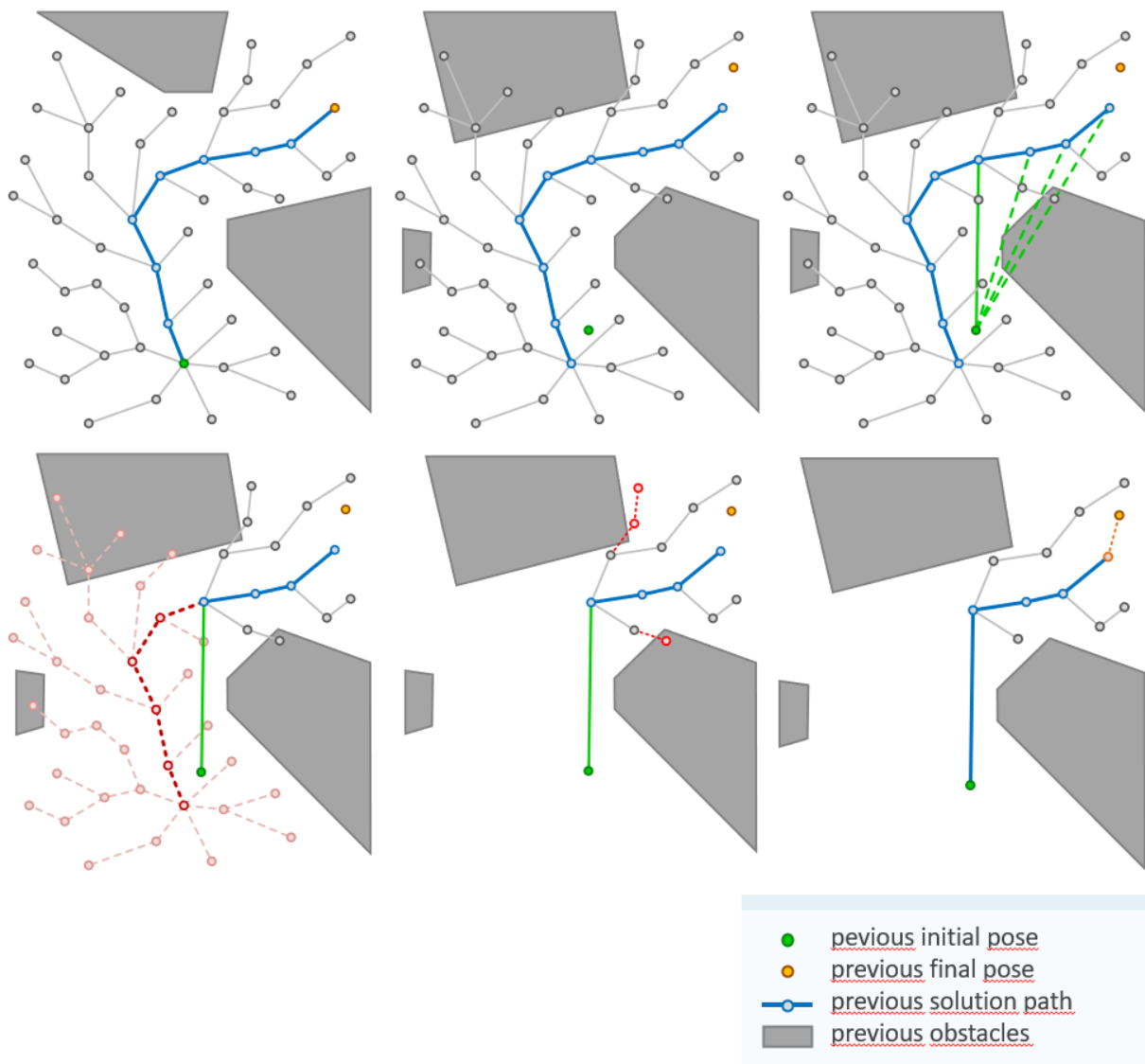
### Warmstart des Pfadfindungsalgorithmus

Ändern sich einige der Eingangswerte des RRT\*-Algorithmus, die Inertielle Pose  $q_I$ , die Zielpose  $q_G$  oder die Position und Anzahl der Hindernisse  $\mathcal{O}$ , ist eine Neuplanung erforderlich, die einen vollständigen Neuaufbau des Pfadbaumes durchführt. Dieser ist mit einer erheblichen Rechenzeit verbunden und verhindert bei einer realistischen Rechenleistung eine Berechnung in Echtzeit.

Für das Ziel der Echtzeitberechnung wurde daher die Idee untersucht, den im letzten Durchlauf berechneten Pfadbaum als initialen Pfadbaum für die Lösung des neuen Optimierungsproblems zu nutzen. Ausgangspunkt des Warmstartalgorithmus ist die vorhergehende Lösung mit dem Pfadbaum, dem Lösungspfad und den Hindernissen. Der Algorithmus gliedert sich in 5 Schritte:

1. Es wird die neue Initial- und Zielpose  $q_I$ ,  $q_G$  und die aktuellen Hindernisse  $\mathcal{O}$  definiert. Das Koordinatensystem des Baumes wird in das Koordinatensystem mit  $q_I$  als Ursprung transformiert.
2. Verbinden der neuen Initialpose  $q_I$  mit dem vorhandenen Pfadbaum durch Rückwärtsuche der besten, kollisionsfreien Verbindung in Abhängigkeit von der Kostenfunktion  $C(q_I, q_G)$
3. Löschen aller Zweige vor dem neuen Verbindungsknoten
4. Prüfen auf Kollisionen des verbleibenden Baums mit den neuen Hindernissen  $\mathcal{O}$ . Entfernen aller Zweige, die Kollisionen aufweisen
5. Setzen eines neuen Zielknotens, der der neuen Zielpose am nächsten liegt

Der Ablauf der Warmstartprozedur ist vereinfacht in Abbildung 38 dargestellt.

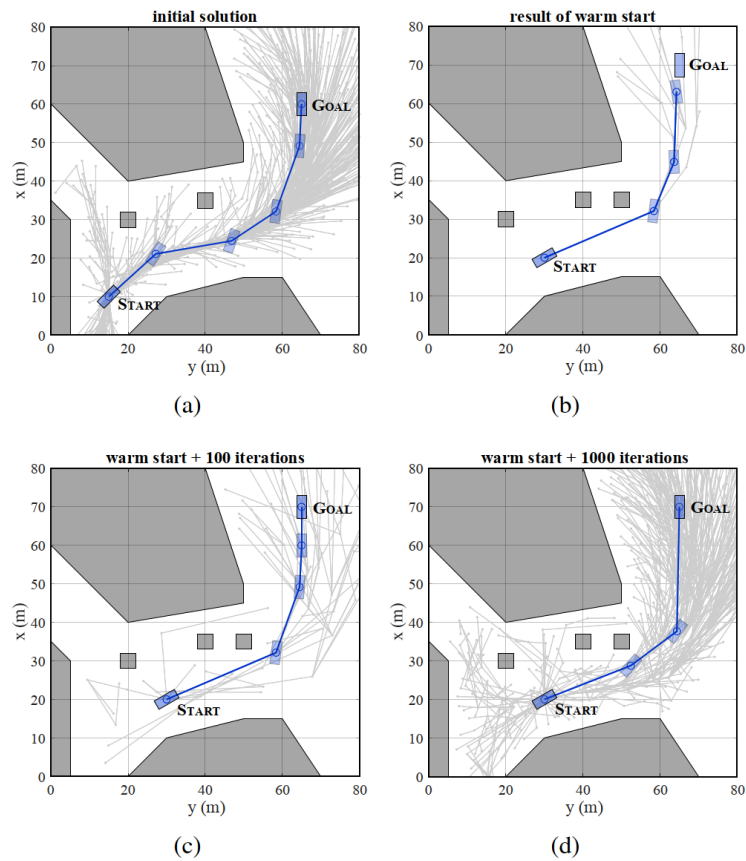


**Abbildung 38** Ablauf der Warmstartprozedur des RRT\* Algorithmus

Im Ergebnis zeigt die Warmstartprozedur eine erhebliche Reduktion der benötigten Rechenleistung und liefert schon mit wenigen Iterationen eine gute Lösung der Pfadeuche, sowohl bei neu hinzukommenden Hindernissen, siehe Abbildung 39, als auch bei großen Änderungen

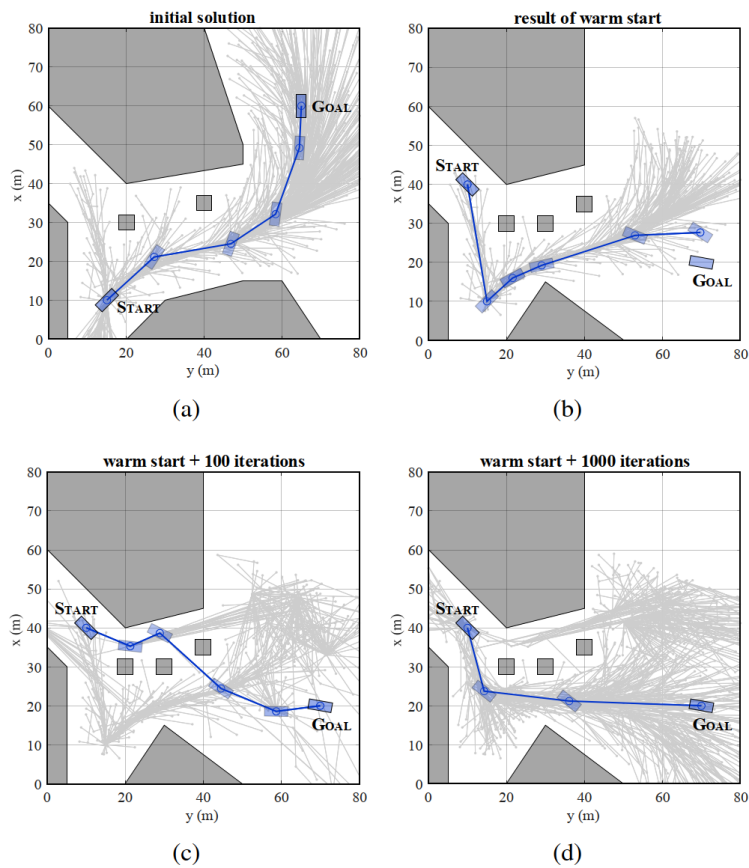
der initialen Pose, siehe Abbildung 40.

Weiterhin wird eine deutlich schnellere Konvergenz der Kosten der Lösung erreicht, siehe Abbildung 41.

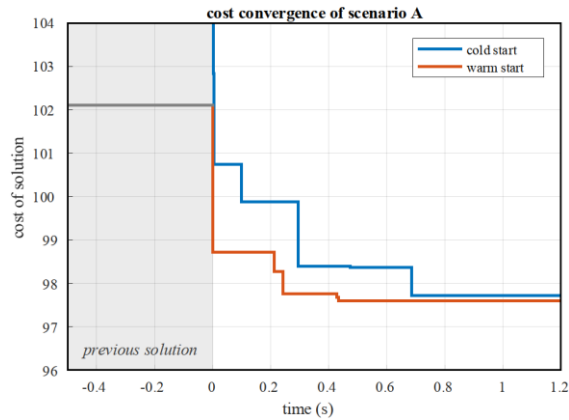


**Abbildung 39 Verlauf der Pfadsuche mit Warmstartprozedur bei zusätzlich erkannten Hindernissen**





**Abbildung 40** Verlauf der Pfadsuche mit Warmstartprozedur bei Änderung der initialen Pose und zusätzlichen Hindernissen

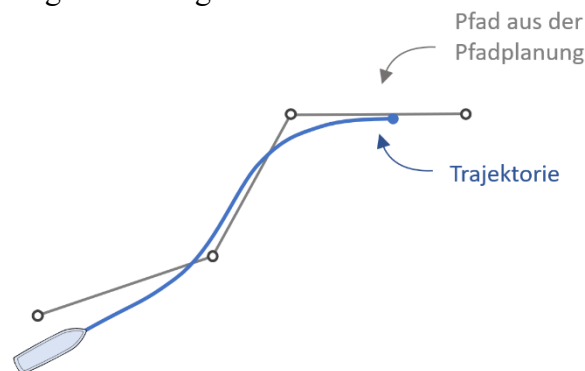


**Abbildung 41** Vergleich der Konvergenz der Kosten der gefundenen Pfadlösung mit Kaltstart und mit Warmstart

### Bewegungsplanung

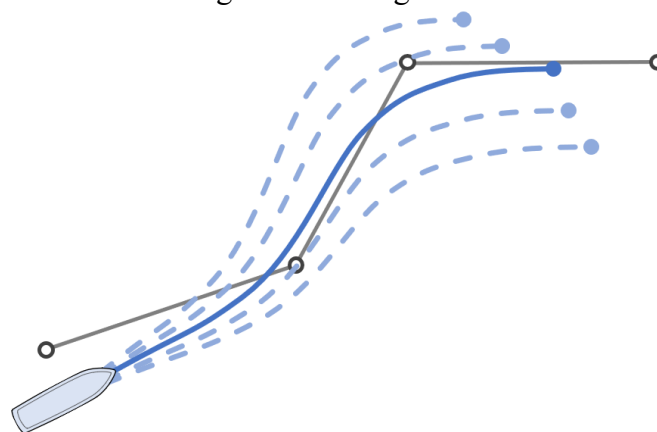
Die oben skizzierte Pfadoptimierung stellt sicher, dass für die jeweilige Fahrzeuggeometrie ein kollisionsfreier Pfad vom Startpunkt zum Zielpunkt gefunden wird. Sie trifft keine Aussagen darüber, mit welchen Geschwindigkeiten der Pfad abgefahren werden kann und wie die Aktoren des Schiffes dazu angesteuert werden müssen. Es wurde daher in diesem Vorhaben ein Bewegungsplaner konzipiert und umgesetzt, der die Aufgabe hat, aus dem gefundenen Pfad eine Trajektorie zu generieren, die den zeitlichen Verlauf der Eingangs- und Zustandsgrößen des Schiffes wiedergibt.

Die Bewegungsplanung baut dabei auf den gefundenen Pfad auf, kann jedoch auch davon abweichen, siehe Abbildung 42. Dabei soll jedoch weiterhin eine kollisionsfreie Fahrt garantiert werden. Weiterhin muss garantiert werden, dass die Trajektorie dynamisch durch das Schiff realisierbar ist und die Stellgrößen stetig sind.



**Abbildung 42 Prinzip der Trajektoriengenerierung aus der Pfadplanung**

Die grundlegende Idee der Bahnplanung ist eine Simulation der Bahnregelung mit einem dynamischen, nichtlinearen Bewegungsmodell des Schiffes unter Berücksichtigung der realen Stellgrößenbeschränkungen und mit um den Zielpfad variierenden Sollposen, siehe Abbildung 43. Hierfür wird ein Bewegungsmodell des Schiffes und der Aktuatorik benötigt, ein Regelungsalgorithmus sowie ein übergeordneter Algorithmus zur Generierung der Sollposen.



**Abbildung 43 Variierende Sollposen um den Zielpfad**

Als nichtlineares Simulationsmodell wurde ein Zustandsraummodell

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}\end{aligned}$$

definiert, mit der Pose  $\boldsymbol{\eta} = (x, y, \psi)^T$ , dem Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v} = (u, v, r)^T$  und dem Kraft/Moment-Vektor  $\boldsymbol{\tau} = (X, Y, N)^T$  sowie der Transformationsmatrix

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

und dem Geschwindigkeitsmodell

$$\mathbf{f}(\mathbf{v}) = \mathbf{A} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \mathbf{F} \begin{bmatrix} vr \\ ur \\ uv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{|u|u}|u|u + a_{uuu}u^3 + a_{u,rr}r^2 \\ a_{|v|v}|v|v + a_{vvv}v^3 + a_{v,rr}r^2 \\ a_{|r|r}|r|r + a_{rrr}r^3 \end{bmatrix}$$

Zur Berücksichtigung der Stellgrößendynamik wird  $\boldsymbol{\tau}$  als Zustand definiert

$$\dot{\boldsymbol{\tau}} = \begin{bmatrix} -1/T_X & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_Y & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_N \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} + \begin{bmatrix} 1/T_X & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_N \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_c$$

mit dem neuen Eingang  $\boldsymbol{\tau}_c$  als Stellgröße und einem Verzögerungsglied 1. Ordnung als Allokationsmodell. Zur Vermeidung von Sprüngen in der Stellgröße  $\boldsymbol{\tau}_c$  wird ein virtueller Eingang  $\mathbf{u}_\tau$  definiert, welcher über ein zusätzliches Verzögerungsglied 1. Ordnung auf die Stellgröße wirkt. Das resultierende Modell lautet dann:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \\ \dot{\boldsymbol{\tau}} &= \mathbf{A}_\tau\boldsymbol{\tau} + \mathbf{B}_\tau\boldsymbol{\tau}_c \\ \dot{\boldsymbol{\tau}}_c &= \mathbf{A}_c\boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{B}_c\mathbf{u}_\tau \end{aligned}$$

mit

$$\dot{\boldsymbol{\tau}}_c = \begin{bmatrix} -1/T_{f1} & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{f3} \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_c + \begin{bmatrix} 1/T_{f1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_{f3} \end{bmatrix} \mathbf{u}_\tau$$

Die A-SWARM-Fahrzeuge sind mit zwei 360° Azimutpropellern ausgestattet, siehe Abbildung 44.

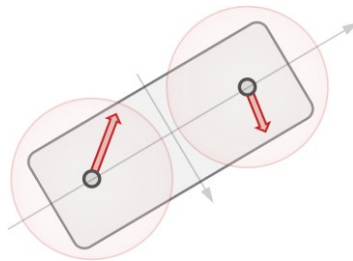


Abbildung 44 Antriebsausstattung eines A-SWARM-Fahrzeuges

Aus allen Kombinationen der Stellwinkel und Schubkräften ergibt sich der mögliche Arbeitsraum des Kraft/Moment-Vektors  $\boldsymbol{\tau} = (X, Y, N)^T$ . Die Beschränkung auf Kraftbasis wurde als Ellipsoid umgesetzt, siehe Abbildung 45.

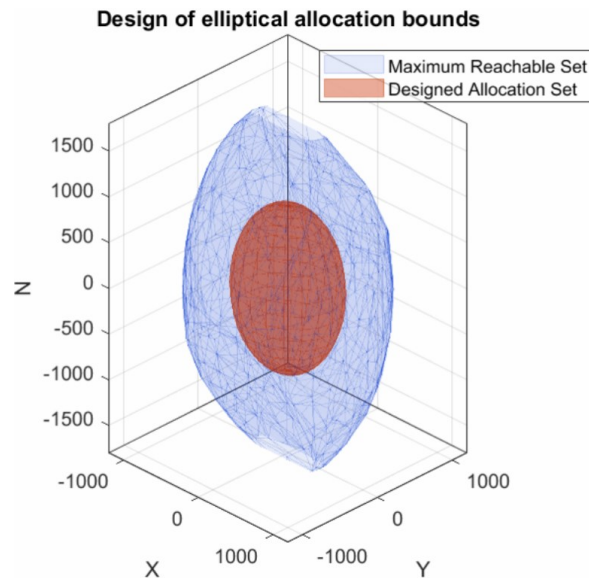


Abbildung 45 Beschränkung des Arbeitsraums als Ellipsoid

Über das Geschwindigkeitsmodell mit dem Eingang  $\tau$  ergibt sich der maximal erreichbare Bereich der stationären Geschwindigkeiten, siehe Abbildung 46.

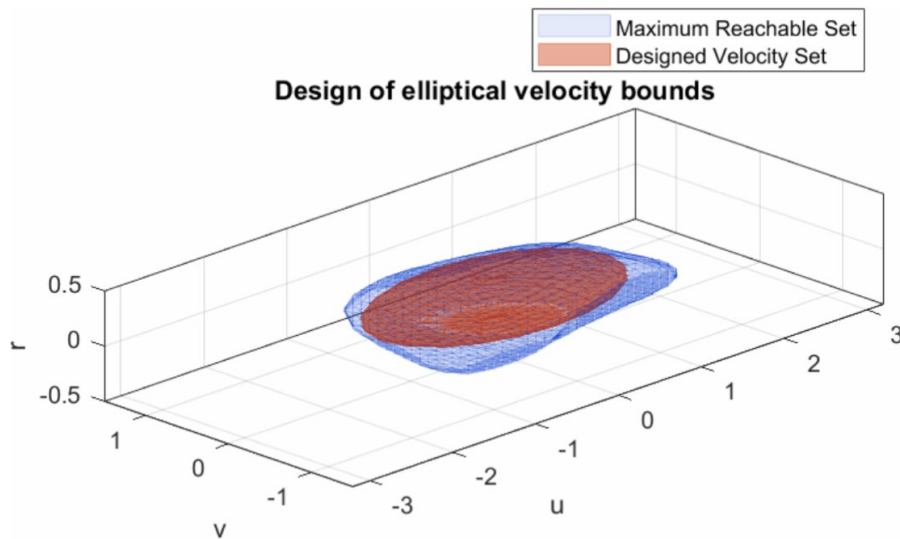


Abbildung 46 Bereich der erreichbaren stationären Geschwindigkeiten

### Reglerstruktur der Bewegungsplanung

Für die simulative Bahnregelung der Bewegungsplanung wurde eine kaskadierte Reglerstruktur aus Pose-Regler und Geschwindigkeitsregler entwickelt. Der Geschwindigkeitsregler wurde per Exakter Linearisierung entworfen, wodurch die Nichtlinearitäten in  $f(\mathbf{v})$  kompensiert werden und sich das resultierende System nach außen als linear mit einer gewünschten Dynamik darstellt. Die gewünschte Dynamik kann mit größeren Zeitkonstanten und damit träger als die reale Dynamik des Fahrzeuges gewählt werden. Dies garantiert, dass das reale Fahrzeug der ermittelten Trajektorie folgen kann.

Als übergeordneter Posenregler wurde ein klassischer Zustandsregler gewählt. Die Begrenzungen auf Kraft- und Geschwindigkeitsebene  $\mathbf{u}_\tau$  und  $\mathbf{v}_c$  wurden wie oben beschrieben als

Ellipsoid modelliert. Die Struktur aus Modell, Beschränkung und Reglerkaskade ist in Abbildung 47 dargestellt.

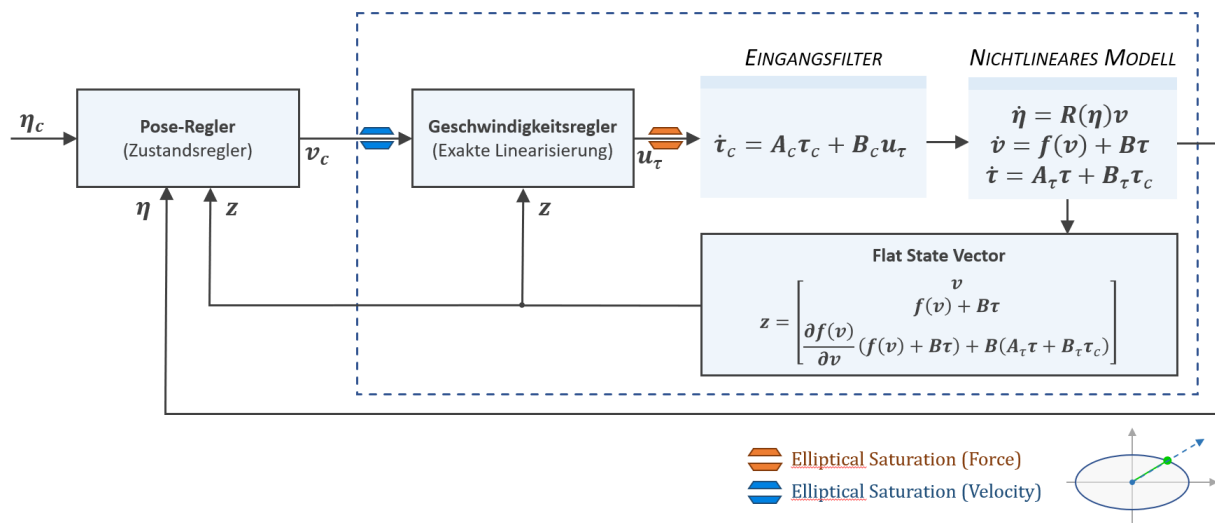
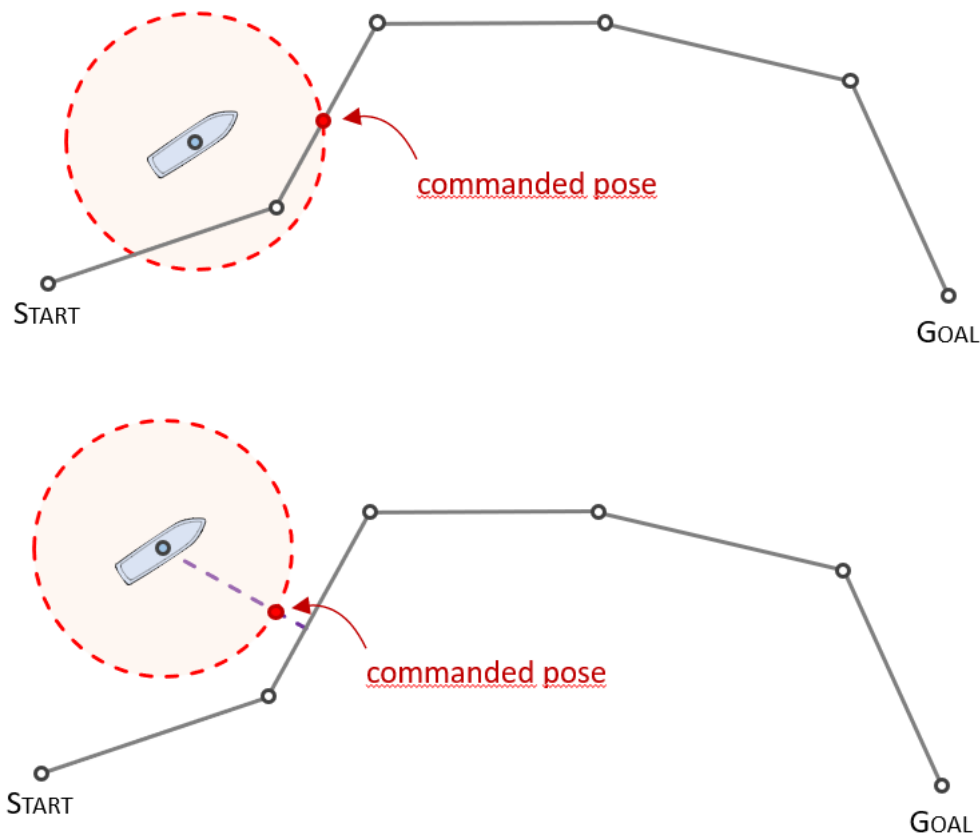


Abbildung 47 Struktur der Bewegungsplanung aus Modell, Beschränkung und Reglerkaskade

Der zeitliche Verlauf von Eingangs- und Ausgangsgrößen des nichtlinearen Modells in dieser Struktur ergibt die gesuchte Trajektorie.

### Generierung der Sollposenvariation

Zur Ermittlung der optimalen Trajektorie, soll die Pose, die als Sollwert der obigen Reglerstruktur übergeben wird, um den in der Pfadplanung ermittelten Pfad variiert werden. Gesucht ist eine Menge an Sollposen  $\eta_c$  die dem Posenregler übergeben werden soll. Befindet sich das Schiff nicht exakt auf dem vorgegebenen Pfad, so soll vom Regler als Zielpose eine Pose in Vorausrichtung auf dem Pfad angefahren werden. Im dreidimensionalen Raum des Pfades  $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{S}^1$  entspricht dies dem Schnittpunkt einer Kugel mit einem vorgegebenen Radius mit dem Pfad. Existiert kein Schnittpunkt der Kugel mit dem Pfad, wird die dichteste Pose ermittelt. Abbildung 48 veranschaulicht dies äquivalent im zweidimensionalen Positionsraum  $\mathbb{R}^2$ .

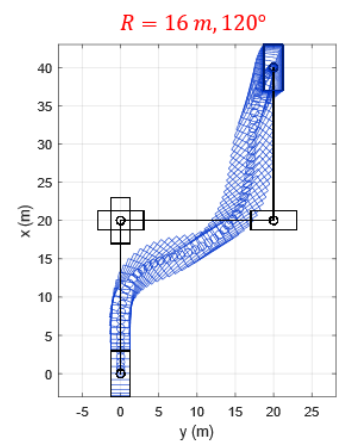
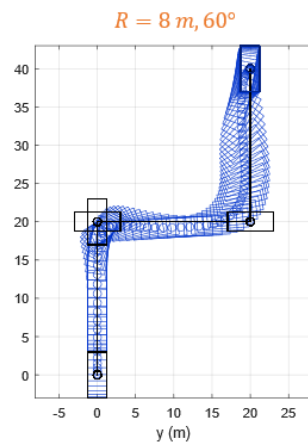
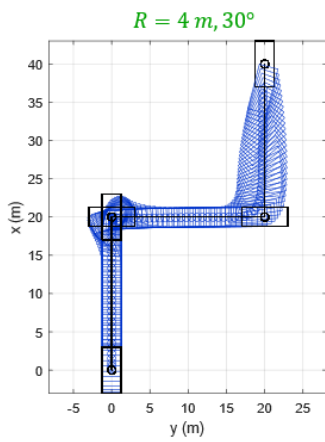
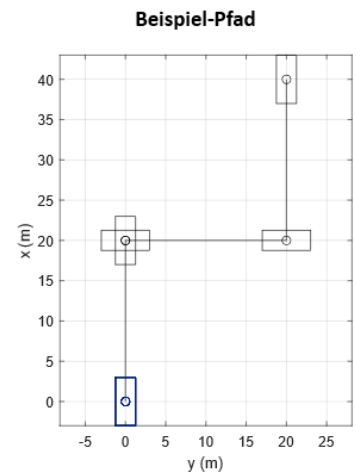
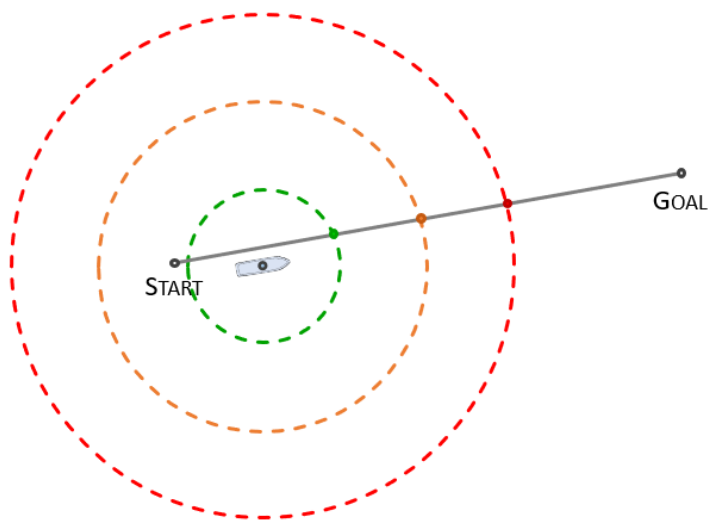


**Abbildung 48** Ermittlung der Sollpose zu einem gewählten Radius

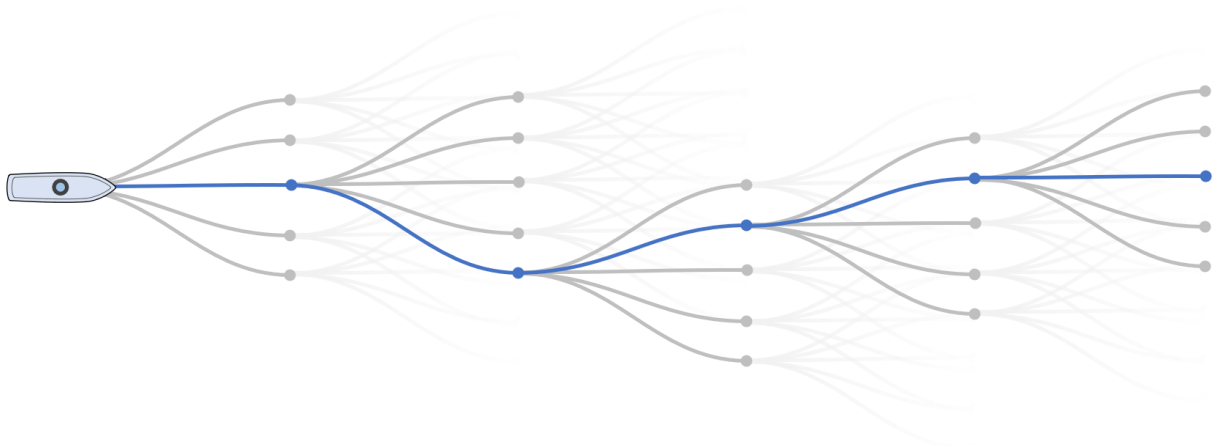
Je größer man den Radius wählt, umso größer wird die Abweichung vom Pfad und damit steigt der Regelfehler. In Abbildung 49 wird dieser Zusammenhang für ein Beispielpfad und drei verschiedene Radien grafisch dargestellt.

Für die Ermittlung einer zeitoptimalen Trajektorie ist es vorteilhaft, eine Abweichung vom Pfad zuzulassen, solange dies kollisionsfrei bleibt. Variiert man die Sollpose der Bewegungsplanung entlang der Kugeloberfläche entstehen mit  $N$  der Anzahl unterschiedlicher Radien und  $M$  der Anzahl an Punkten pro Radius  $N \times M$  mögliche Sollposen. Definiert man mit  $T_h$  einen festen Zeithorizont erhält man mit dem definierten Regler und dem Bewegungsmodell  $N \times M$  Sollposen pro Zeithorizont. Startet man ab den Endpunkten der Trajektorien zum Zeithorizont  $T_h$  eine neue Bewegungsplanung, ergeben sich nach jeden Zeithorizont wiederum  $N \times M$  Trajektorien. Abbildung 50 verdeutlicht dies.

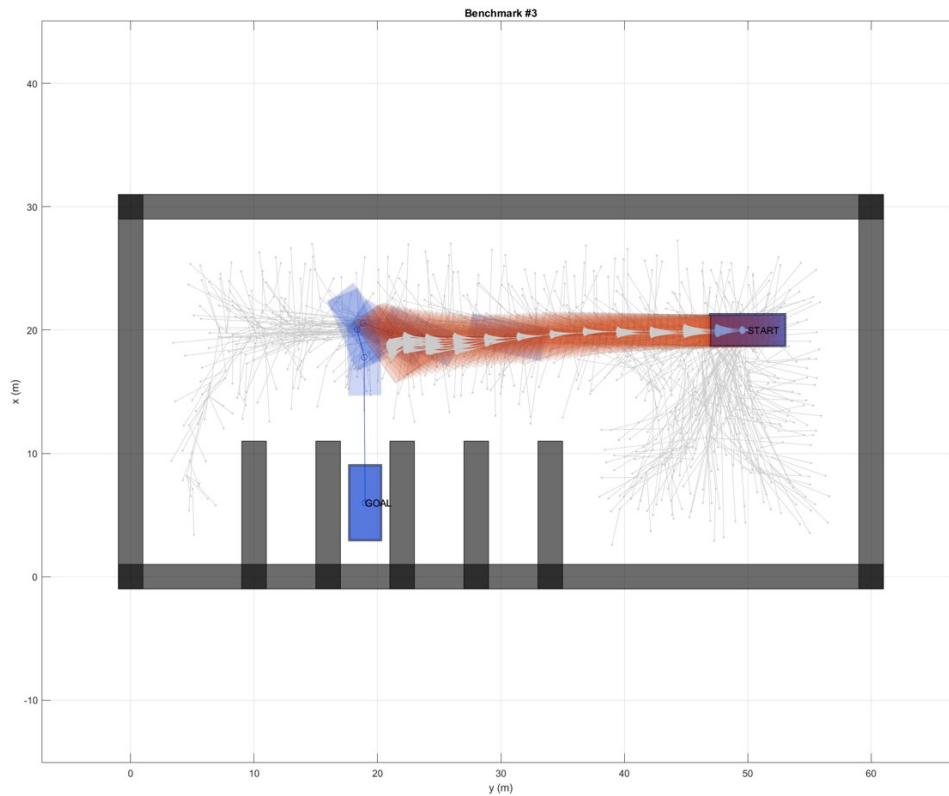
Jede Trajektorie wird dabei auf eine Kollision mit einem Hindernis getestet. Trajektorien die zu einer Kollision führen, werden verworfen. Für jede verbleibende Trajektorie wird ein Kostenbetrag über ein Kostenfunktional generiert, über das die benötigte Zeit und der Abstand zu den Hindernissen bewertet wird. Aus dem so generierten Trajektorienbaum werden über den A\*-Algorithmus, auf Grundlage der ermittelten Kosten jedes Zweiges, der optimale Pfad zum Zielpunkt gesucht. In Abbildung 51 und Abbildung 52 ist der berechnete Trajektorienbaum für zwei Beispielszenarien dargestellt.



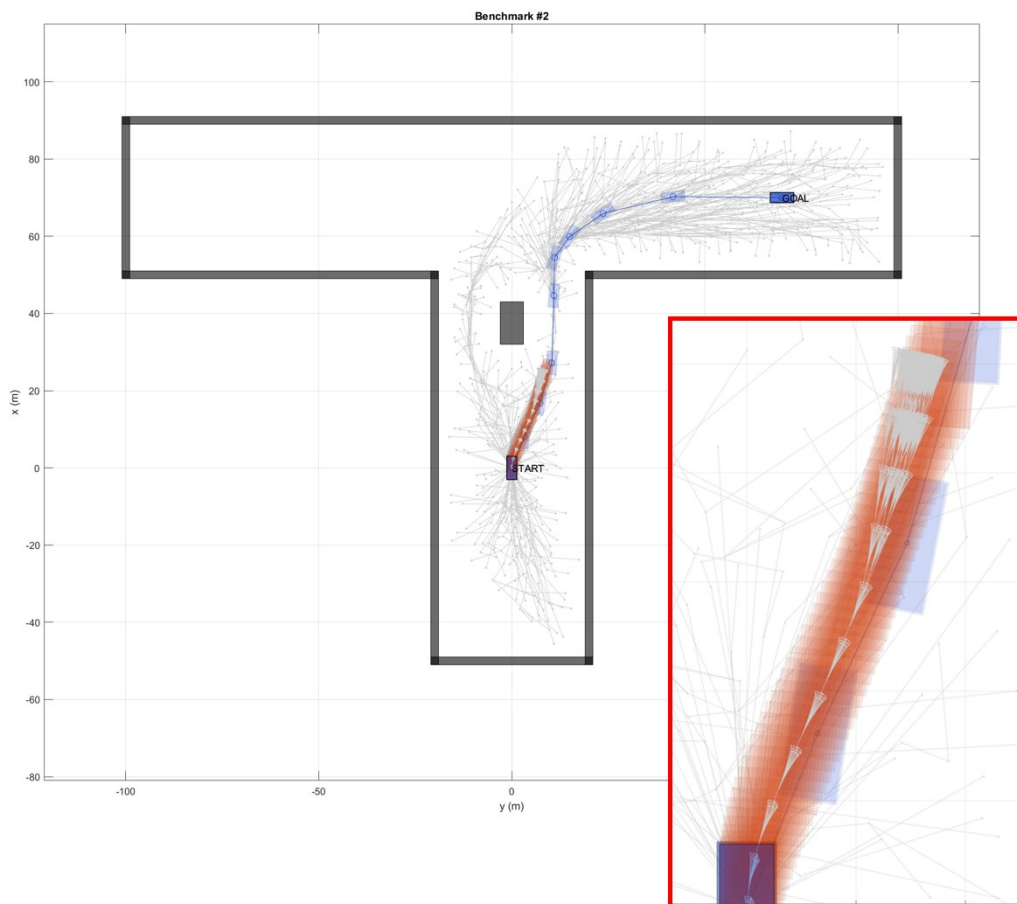
**Abbildung 49 Regelabweichung bei unterschiedlich gewählten Radien in der Sollposengenerierung**



**Abbildung 50 Trajektorienbaum mit um den Pfad variierenden Sollposen und der Planung mit aufeinanderfolgenden Zeithorizonten**



**Abbildung 51** Generierung des Trajektorienbaums (grau) aus dem Pfad (blau) und dem resultierenden Fahrweg des Fahrzeuges (rot) für ein Beispielszenario



**Abbildung 52** Generierung des Trajektorienbaums (grau) aus dem Pfad (blau) und dem resultierenden Fahrweg des Fahrzeuges (rot) für ein Beispielszenario



In der praktischen Realisierung innerhalb dieses Vorhabens wurde der Trajektorienbaum einmal pro Sekunde generiert. Mit einem Zeithorizont von 5s konnten ca. 4000 Trajektorienzweige pro Sekunde berechnet werden.

### 3.5.2 AP 7.b Erstellung einer Simulations- und Testumgebung für Bewegungsplanung

Um verschiedene Algorithmen effektiv testen zu können, wurde eine Testumgebung erstellt in der das Systemverhalten unter idealen Bedingungen simuliert werden kann. Gleichzeitig können verschiedene Szenarien mit virtuellen Hindernissen erstellt werden und die Planungsalgorithmen auf ihre Robustheit hin untersucht werden.

#### HiL-Simulator

Grundlage der Testumgebung ist eine Simulation des Bewegungsverhaltens eines A-SWARM-Fahrzeugs basierend auf einem Matlab/Simulink-Modell. Das Bewegungsmodell ist in 6 Freiheitsgraden ausgeführt und beinhaltet auch die Modellierung von Umweltgrößen wie Wind- und Strömungskräfte, siehe Ausführungen in AP 5.a, Kapitel 3.4.1. Weiterhin wurden vereinfachte Aktormodelle integriert.

Für den Einsatz als HiL-Simulator wird die Echtzeitsimulation auf einem x86-Rechner unter einem Linux-RT-Betriebssystem ausgeführt.

Zur Datenübertragung zwischen dem Simulator und dem A-SWARM Steuer- und Regelsystem wurde ein generisches Intermodulprotokoll (IMP) entwickelt, siehe auch Abschnitt 3.2.

Es werden folgende Nachrichtentypen unterstützt:

**Tabelle 4 Vom HiL-Simulator und GCS unterstützte IMP-Nachrichten**

IMP-Version	20200919
<b>Supported Messages</b>	(0x00) Info Request Message (0x01) Info Response Message (0x47) Guidance Message (0x4C) Log Message (0x4E) Navigation Message (0x50) Convex Polygon Message (0x54) Guidance Trajectory Message

#### SRX-Versuchsfahrzeug

Für den praxisnahen Test der Trajektorienoptimierung inklusive der Lidar-Sensorik im Labor wurde weiterhin ein Versuchsfahrzeug auf Basis von Mecanum-Rädern entwickelt, welches



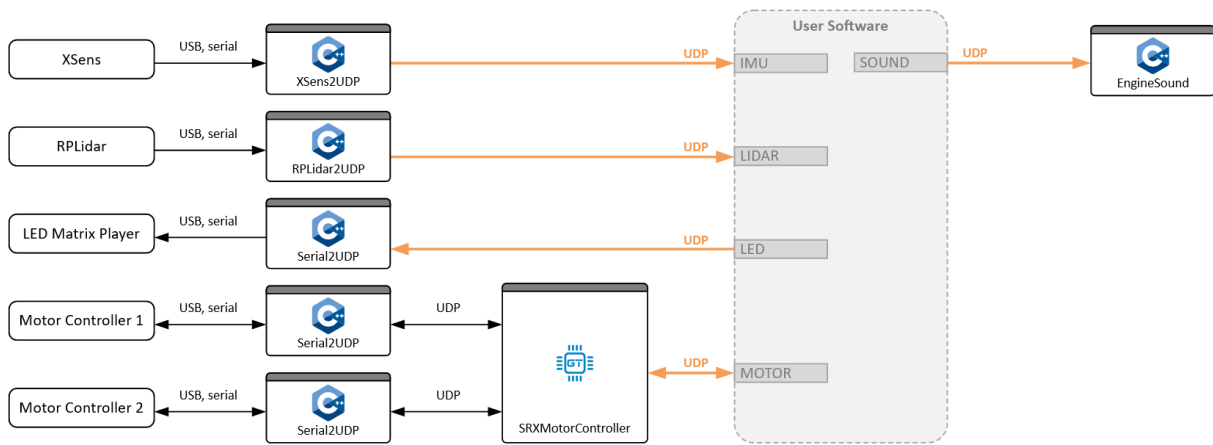


Abbildung 55 Struktur der Sensorik und Aktorik des Versuchsfahrzeugs

## Ground Control Station (GCS)

Zur Visualisierung des Verhaltens des Planungsalgorithmus und für eine schnelle, intuitive Bewertung bei Versuchen in realen Umgebungen wurde eine Ground Control Station (GCS) entwickelt und aufgebaut, die die Bewegungszustände der Fahrzeuge und deren Kommandos anzeigt, siehe Abbildung 56.

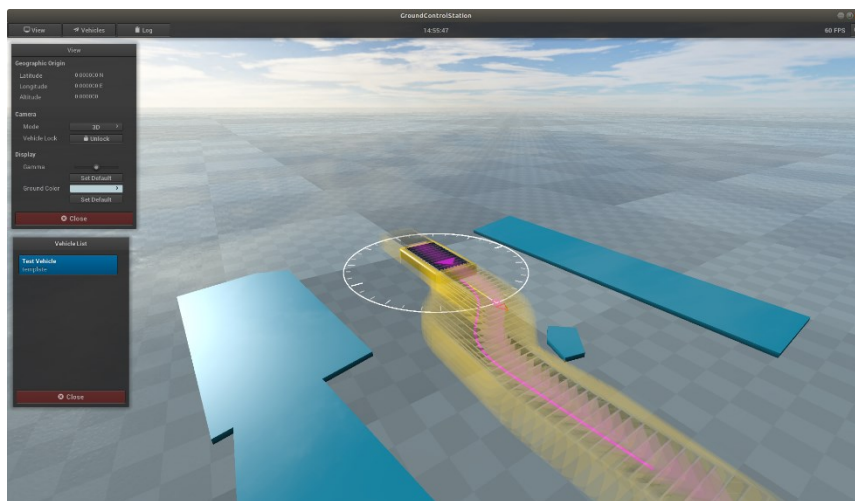


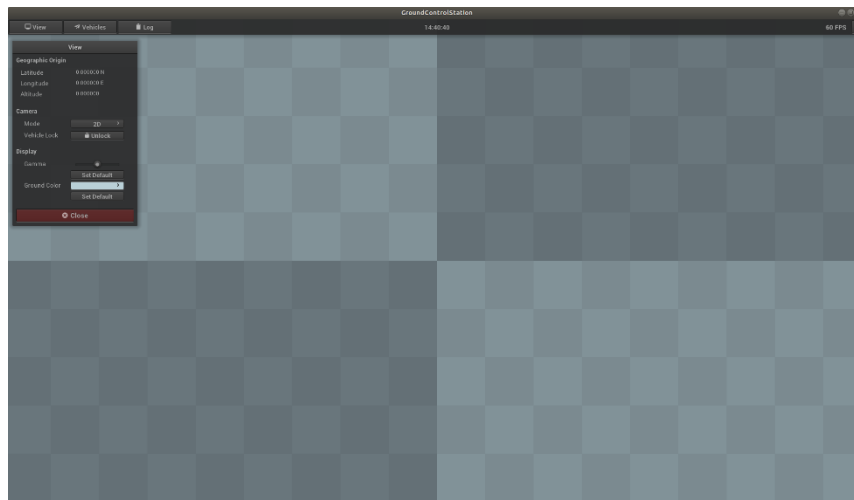
Abbildung 56 GUI der Ground Control Station

Die GCS wurde unter C++ entwickelt und läuft auf einem Linux-RT-Betriebssystem. Zur Datenübertragung wird das Intermodulprotokoll des Steuer- und Regelsystems genutzt, welches generische, vom Fahrzeugtyp unabhängige Nachrichten versendet. Es werden alle in Tabelle 4 aufgelisteten Nachrichtentypen ausgewertet, die ausschließlich als UDP-Nachrichten übertragen werden. Im Folgenden sollen die einzelnen Module der GCS erläutert werden:

### Grafisches Benutzerinterface (GUI)

In Abbildung 57 ist die Ansicht beim Start der GCS mit geöffnetem View-Menü dargestellt. In der oberen Leiste (Symbolleiste) befinden sich Schaltflächen zum Öffnen weiterer Fenster. In der Mitte der Symbolleiste wird die aktuelle Ortszeit angezeigt. Auf der rechten Seite wird

die Anzahl der Bilder pro Sekunde (FPS) angezeigt. Dieser Wert sollte 60 betragen. Die grafische Darstellung zeigt ein Schachbrettmuster bei  $z=0$ . Das kleinste Quadrat hat eine Größe von 1 m x 1 m. Die nächsten Größen 10 m x 10 m und 100 m x 100 m sind durch entsprechend größere überlagerte Schachbrettmuster gekennzeichnet.



**Abbildung 57 Konfiguration der GCS-Ansicht über das View-Menü**

Karteireiter *View*

Menü *Geographic Origin*

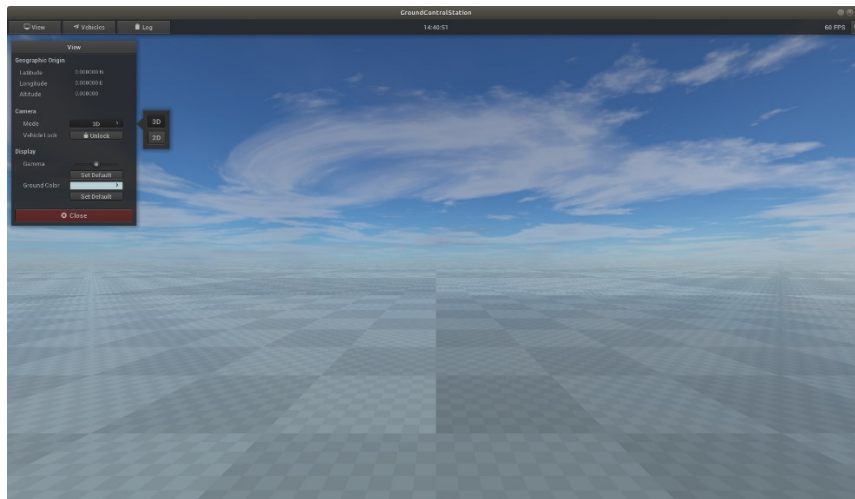
Positionen werden im euklidischen Raum dargestellt. Um geografische Koordinaten (Längen- und Breitengrad) in euklidische Koordinaten umzuwandeln, wird ein geografischer Ursprung benötigt. In diesem Abschnitt wird der aktuelle geografische Ursprung angezeigt. Dieser Ursprung kann nur einmal festgelegt werden. Entweder wird der Ursprung durch die Konfiguration vorgegeben oder es wird die Position der ersten empfangenen Navigationsmeldung als Ursprung gewählt.

Menü *Camera*

*Mode*

Über die Mode-Option wird die Kameraperspektive eingestellt. Es stehen 2 Modes zur Auswahl:

Mode	Beschreibung
3D	Perspektivische Projektion, die Kamera kann frei im Raum bewegt werden
2D	Orthographische Projektion von oben



**Abbildung 58 Konfiguration der Kameraperspektive**

### *Vehicle Lock*

Wenn die Kamera für ein bestimmtes Fahrzeug gesperrt ist, kann sie mit dem Button Unlock wieder entsperrt werden.

### *Menü Display*

#### *Gamma*

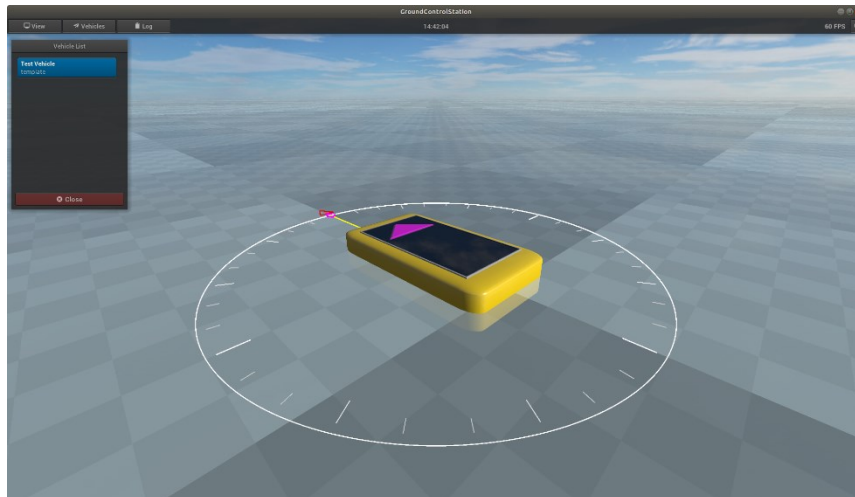
Mit dem Schieberegler kann eine Gamma-Korrektur vorgenommen werden. Gamma kann in einem Bereich von [1, 3] verändert werden. Die Gammakorrektur hat keinen Einfluss auf die Bedien- und Steuerelemente des GCS. Mit der Schaltfläche "Set Default" kann der Standardwert 2.0 eingestellt werden.

#### *Ground Color*

Gibt die Farbe der Ebene bei  $z=0$  an. Mit der Schaltfläche "Set Default" kann der Standardwert wiederhergestellt werden.

### *Karteireiter Vehicles*

Die obere Symbolleiste enthält die Schaltfläche zum Öffnen des Menüs "Fahrzeuge". Das Menü "Fahrzeuge" enthält eine Liste der Fahrzeuge, die seit dem Start des GCS gefunden wurden. Das GCS baut intern zur Laufzeit eine Fahrzeugdatenbank auf. Sobald sich Fahrzeuge in der Datenbank befinden, erscheinen diese Fahrzeuge in der Liste als blaue Schaltflächen. Die folgende Abbildung zeigt, dass ein Fahrzeug mit dem Namen "Testfahrzeug" und der optionalen Fahrzeugbeschreibung "Vorlage". Mit einem Klick auf diese Schaltfläche öffnet sich ein Fenster mit fahrzeugspezifischen Daten und Einstellungen. Die optionale Fahrzeugbeschreibung entspricht dem Beschreibungsfeld der Info Response Message (Inter-Module Protocol). Wird ein Fahrzeug hinzugefügt, wird im Unterordner "vehicle" nach einer Ply-Datei mit dem Namen der Fahrzeugbeschreibung gesucht, im in Abbildung 59 dargestellten Fall "template.ply".



**Abbildung 59** Fahrzeugauswahl in der GCS

### **Fahrzeugdatenbank**

Die GCS ist für die Anzeige mehrere Fahrzeuge entworfen worden. In der Praxis muss das GCS nicht konfiguriert werden, um weitere Fahrzeuge hinzuzufügen. In der Netzwerkkonfiguration der GCS wird festgelegt, auf welchen UDP-Ports die GCS lauschen oder welchen UDP-Multicast-Gruppen sie beitreten soll. Die GCS baut dann automatisch eine interne Fahrzeugdatenbank auf, um die Quellnetzadressen der empfangenen IMP-Nachrichten bestimmten Fahrzeugen zuzuordnen. Zu diesem Zweck verwendet das GCS die "Info Request Message" und "Info Response Message" der IMP. Folgendes Beispiel veranschaulicht diesen Prozess:

#### *Beispiel:*

Die GCS empfängt eine Navigationsmeldung von der Adresse  $IP:PORT$ . Da die Adresse noch keinem Fahrzeug zugeordnet ist, sendet die GCS eine Anfrage (Info Request Message) zurück an die Adresse  $IP:PORT$ . Info Request Messages werden nur mit einer maximalen Frequenz von 1 Hz gesendet. Das Modul, das die Navigationsmeldung gesendet hat, erhält nun eine Info Request Message von der GCS und muss mit einer Info Response Message antworten. Sobald die GCS eine Info Response Message empfängt, wird die Adresse  $IP:PORT$  zusammen mit dem Fahrzeugnamen in die Datenbank aufgenommen. Der Fahrzeugname ist in der Info Response Message zusammen mit der Größe des Fahrzeugs enthalten. Sobald ein Fahrzeug in die interne Datenbank aufgenommen wurde, erscheint es auf der grafischen Anzeige der GCS. Ein Fahrzeug wird als Quader dargestellt, dessen Größe in der Info Response Message übertragen wurde.

Bereits hinzugefügte Fahrzeuge können nicht aus der Datenbank entfernt werden, aber die Sichtbarkeit des Fahrzeugs kann angepasst werden. Um die Datenbank zu löschen, muss die Anwendung neu gestartet werden. Mit Hilfe der Datenbankkonfigurationsdatei ist es auch möglich, Fahrzeuge beim Start des GCS in die Datenbank einzufügen, ohne dass diese eine Info Response Message senden müssen.

Für jedes Fahrzeug, das sich in der internen Datenbank des GCS befindet, können Daten angezeigt und Einstellungen vorgenommen werden. Der Zugriff auf dieses Menü erfolgt über die Fahrzeugliste. Das Menü trägt den Fahrzeugnamen als Titel und hat zwei Registerkarten.

### Daten

Diese Registerkarte enthält die meisten Navigations- und Guidance-Daten, die über IMP-Meldungen empfangen werden, siehe Abbildung 60. Alle blauen Werte stellen Guidance-Daten dar. Im Abschnitt "Zeit bis zur letzten Meldung" werden die Zeiten (in Sekunden) der zuletzt empfangenen IMP-Meldungen angezeigt. Werte, die mit einer geringen Transparenz angezeigt werden, sind nicht empfangen worden. Wenn möglich, werden diese Werte jedoch vom GCS berechnet.

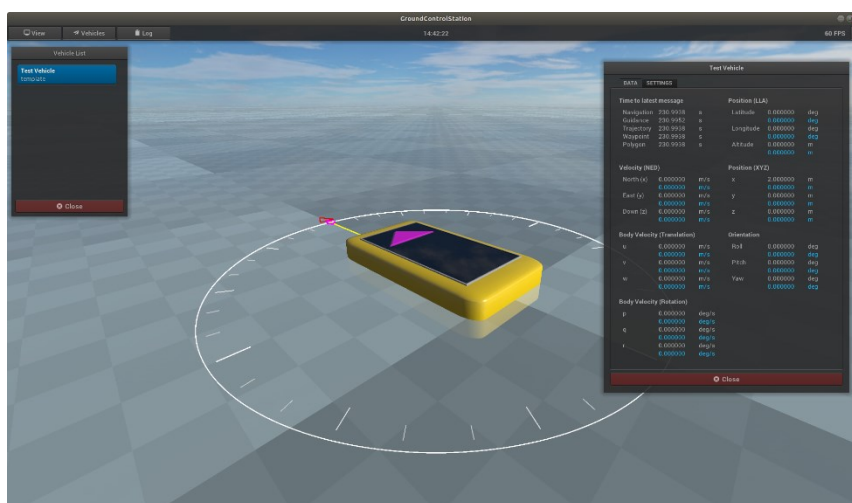


Abbildung 60 Datenpanel eines Fahrzeuges aus der Datenbank der GCS

### Einstellungen

Auf dieser Registerkarte können die grafischen Einstellungen für jedes Fahrzeug angepasst werden, siehe Abbildung 61.

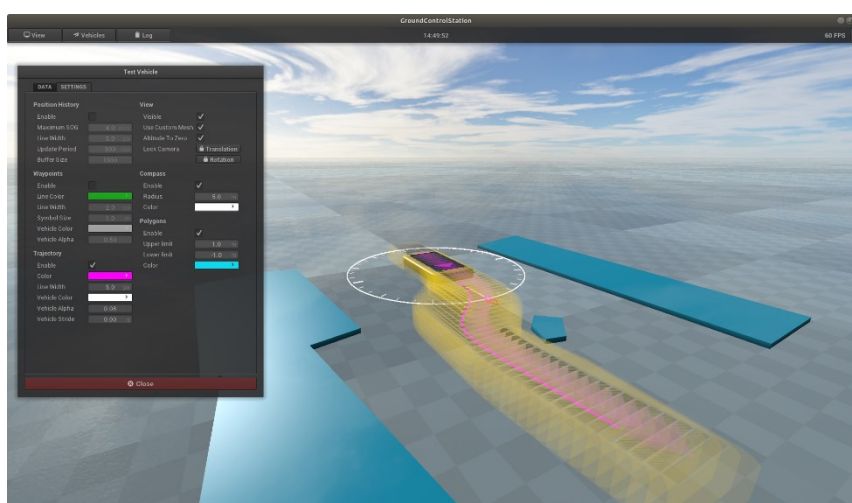


Abbildung 61 Grafische Einstellungen für ein Fahrzeug in der GCS

### Position History

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Enable	Show or hide position history.
Maximum SOG	The color of the position history is adapted to the speed over ground (SOG). With this value the maximum value for SOG can be specified.
Line Width	Width of the position history line.
Update Period	Time period with which positions are to be added to the position history.
Buffer Size	Maximum number of values stored in the position history. If the buffer size is reduced, the oldest positions are deleted.

### *Waypoints*

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Enable	Show or hide waypoints.
Color	Color of waypoints.
Line Width	Width of the line.
Symbol Size	Size of the waypoint symbol. All waypoints are connected by line segments.
Vehicle Color	Color multiplier for the vehicle polyhedron at a waypoint.
Vehicle Alpha	Normalized alpha value for vehicle polyhedra at waypoint.

### *Trajectory*

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Enable	Show or hide trajectory.
Color	Color of the trajectory.
Line Width	Width of the trajectory line.
Vehicle Color	Color multiplier for the vehicle polyhedra.
Vehicle Alpha	Normalized alpha value for vehicle polyhedra.
Vehicle Stride	Specifies the time interval at which the vehicle polyhedron should be displayed along the trajectory.

### *View*

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Visible	Show or hide the entire vehicle with all associated graphical representations.
Use Custom Mesh	If there is a ply file for this vehicle, it will be used for the graphical representation of the vehicle.
Altitude To Zero	The vehicle with all associated graphical representations is drawn in the x-y-plane, even if the z-position or altitude has a non-zero value.
Lock Camera	This allows the camera to be fixed to the vehicle.



### **Translation**

With this setting, the camera is always pointed at the vehicle, but without rotating itself.

### **Rotation**

With this setting, the camera is always pointed at the vehicle and the orientation of the camera is adjusted with the yaw angle of the vehicle so that the camera always rotates with it.

### *Compass*

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Enable	Show or hide compass.
Radius	The radius of the compass in meters.
Color	Color of the compass

### *Polygons*

<b>Value</b>	<b>Description</b>
Enable	Show or hide convex polygons.
Upper limit	For better visibility, polyhedra are created from each polygon. With this value the upper limit (z-value) of the polyhedra is given.
Lower limit	This value defines the lower limit (z-value) of the polyhedra.
Color	Color of convex polygons.

### **Log**

Die Leiste enthält auch einen Karteireiter zum Öffnen des Protokollmenüs, siehe Abbildung 62. Das Menü *Log* enthält Logmeldungen in Form von Textmeldungen. Logmeldungen können als IMP-Meldungen an das GCS gesendet werden. Das Fahrzeug muss sich in der Datenbank des GCS befinden. Sobald das GCS eine neue Log-Meldung erhält, wird der Text der Log-Schaltfläche in der Symbolleiste rot eingefärbt. Wenn die Text-zu-Sprache-Ausgabe aktiviert und konfiguriert ist und der Text des Protokolls gültig ist, gibt es eine Sprachausgabe.

Eine Logmeldung besteht aus drei Spalten:

#### *UTC*

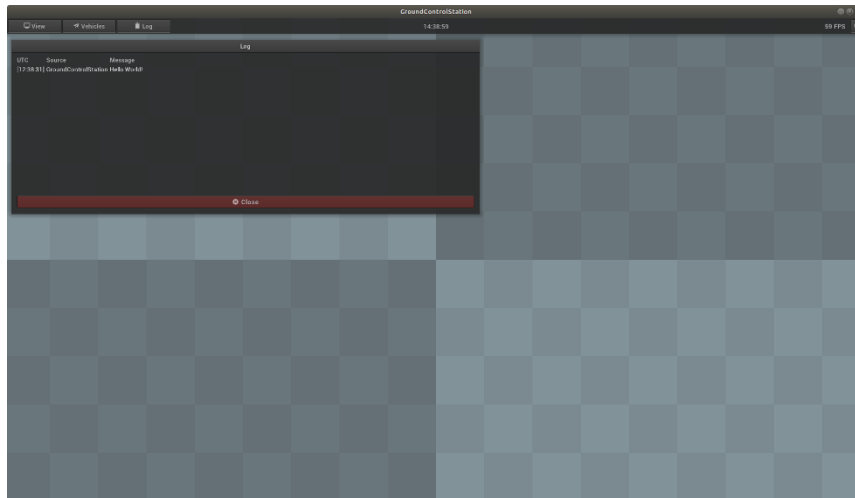
Gibt die Uhrzeit an, zu der das GCS die Protokollnachricht erhalten hat.

#### *Quelle*

Gibt das Fahrzeug an, das die Meldung gesendet hat. Auch das GCS selbst kann Logmeldungen hinzufügen. Die Quelle ist dann immer "GroundControlStation".

#### *Nachricht*

Die eigentliche Textnachricht. Das Fenster ist in horizontaler Richtung begrenzt, daher sind zu lange Meldungen nicht vollständig sichtbar.



**Abbildung 62 Karteireiter Log in der Ground Control Station**

### **3.5.3 AP 7.c bis AP 7.h Trajektoriengenerierung**

Die Ergebnisse der Arbeiten in den Arbeitspaketen 7.c bis 7.h flossen in das in den obigen Kapiteln beschriebene Trajektorienkorrektursystem und der Simulations- und Entwicklungsumgebung ein. Sie sind der besseren Übersicht wegen dort ausführlich beschrieben und dargestellt worden.

## 3.6 AP 11 Laborerprobung in der Schlepprinne

### 3.6.1 AP 11.a Aufbau und Erprobung eines Steuerungssystems für die Prototypenentwicklung

Für den praktischen Einsatz der in den APs 2-9 entworfenen Algorithmen und Schnittstellen wurde ein Regelungs- und steuerungssystem aufgebaut werden, welches den Anforderungen einer Prototypenentwicklung gerecht wird. Insbesondere wurde das Hauptaugenmerk bei diesem System auf eine schnelle Anpassung, einfaches Debugging sowie ein flexibles Daten-Logging aller Parameter und Systemgrößen gelegt.

Dazu gehören auch detaillierte Konfigurationsmöglichkeiten der Echtzeitsteuerungsrechner, der Aufbau verschiedenen Bedien- und Steuerungsmöglichkeiten für die Online-Änderung von Parametern und die Vorgabe von Stellbefehlen sowie die Visualisierung von Messgrößen, Signalen, Parametern und Zuständen des Systems. Der strukturelle Aufbau des Systems ist in Abbildung 63 dargestellt.

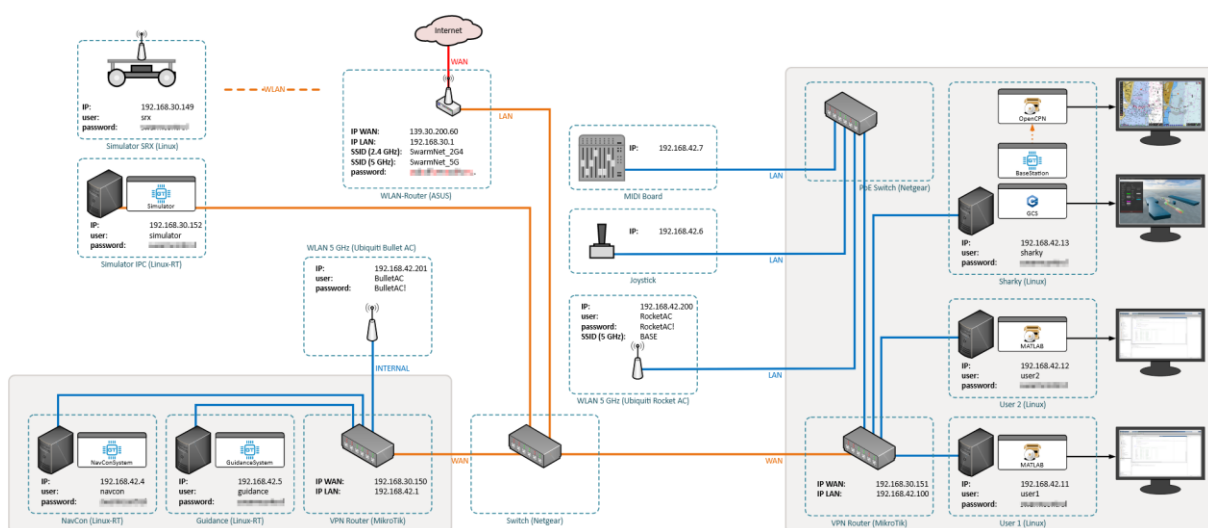


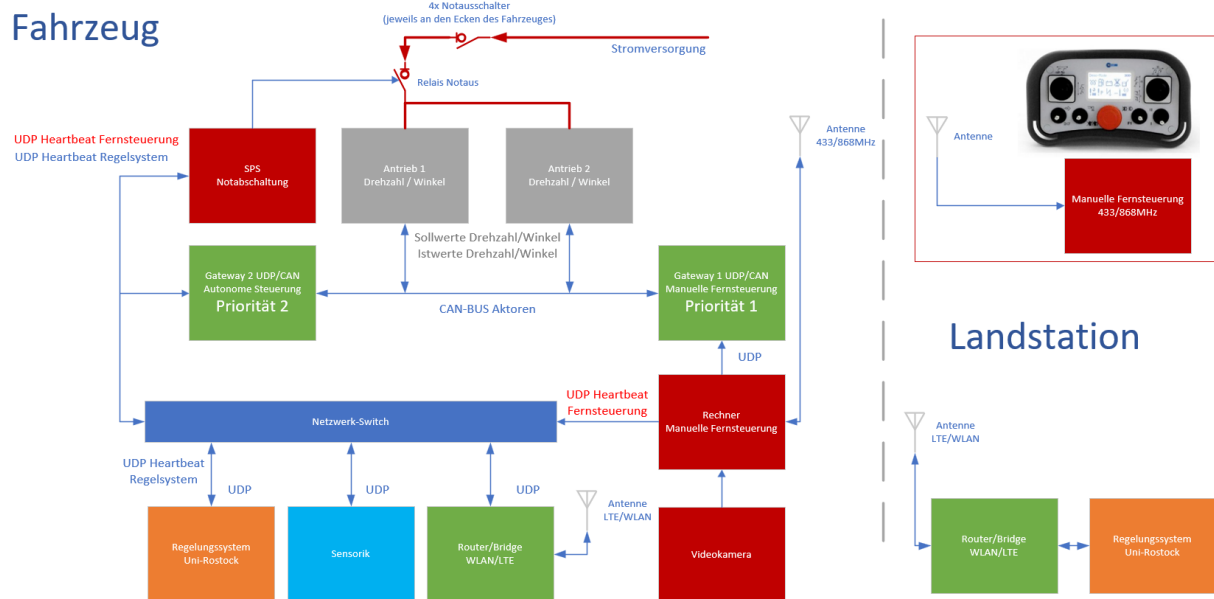
Abbildung 63 Struktur des Steuer- und Regelsystems für die Entwicklungsarbeit

Im Folgenden soll auf die einzelnen Komponenten eingegangen werden:

#### Echtzeitrechner

Die Interaktion des Steuer- und Regelsystems mit dem realen Fahrzeug macht es notwendig, dass alle Funktionen mit möglichst geringen und bekannten Latenzen ausgeführt werden. Weiterhin ist der Rechenaufwand einiger Algorithmen erheblich, sodass leistungsfähige Rechentechnik notwendig ist. Die für die Echtzeitsteuerungen mit vorhersagbaren Latenzen in der Industrie eingesetzten SPSen sind für diesen Anwendungsfall zu wenig leistungsfähig. Industrielle PCs sind schon deutlich rechenstärker jedoch ist ihre Rechenkapazität gegenüber normalen Desktop-PC auch noch reduziert und sie sind deutlich teurer. Für die erste Entwicklung der Algorithmen des Steuerungs- und Regelungssystems wurden daher Desktop-PCs eingesetzt. Um die Echtzeitfähigkeit zu garantieren wurden diese mit einem Linux-Betriebssystem mit RealTime-Patch konfiguriert. Dieses bietet bei der Zuordnung entsprechender Prioritäten maximale Latenzen im einstelligen Millisekundenbereich.

Da an Desktop-PC keine Industrieschnittstellen integriert sind, erfolgt die Interaktion mit der Aktorik des Fahrzeuges über UDP-Gateways. Die Geräte- und Verschaltungsstruktur eines A-SWARM-Fahrzeuges ist in Abbildung 64 dargestellt.



**Abbildung 64** Gerätestruktur eines A-SWARM-Fahrzeuges

### Bedien- und Schaltelemente

Die Komplexität des Steuer- und Regelsystems macht es notwendig, während der Versuche Funktionen einfach und intuitiv zu- und abschalten zu können, Parameter zu verändern und verschiedene Zustände des Systems, insbesondere sicherheitsrelevante Vorgänge, klar signalisiert zu bekommen. Ebenso muss darauf schnell reagiert werden können.

Die fortlaufende Weiterentwicklung des Systems bedingt eine hohe Flexibilität, die sich auch in der Zuordnung der Bedien- und Steuerelemente widerspiegelt.

Im Projekt wurden verschiedene Bedienelemente entworfen, gebaut und in das System integriert. Insbesondere wurde zur manuellen Vorgabe von Kräften, Geschwindigkeiten und zur Umschaltung der wichtigsten Regleralgorithmen inklusive der Notstop-Funktionalität ein 3-Achsen Joystick mit entsprechenden Tastern und LEDs kombiniert, gebaut und per UDP-Protokoll in das System eingebunden. Die Spannungsversorgung erfolgt über die Ethernetverkabelung per PoE.

Weiterhin wurde ein universeller DAW-Controller per UDP-Schnittstelle in das System eingebunden. Hierfür wurde das proprietäre Protokoll zur Ansteuerung des DAW-Controllers in der genutzten Toolkette programmiert. Der Controller bietet 96 Tasten und unabhängig ansteuerbare unterlegte LED-Signalisierungen, 9 Motor-Fader, 8 digitale Endlosdrehregler, 8 farbige und eine monochrome Segmentanzeige sowie ein Jogwheel. Die Schnittstellentreiber wurden so ausgelegt, dass eine freie Zuordnung der Bedienelemente zu den Funktionen des Systems erfolgen kann.

Joystick und DAW-Controller sind in Abbildung 65 dargestellt.



**Abbildung 65 Bedienelemente des Steuer- und Regelsystems**

### **Visualisierung**

Die Darstellung komplexerer Parameter sowie des Bewegungsverhaltens des Fahrzeuges und der errechneten Pfade und Trajektorien erfolgte über vier 24“ Monitore. Für Letzteres wurde die in Abschnitt 3.5.2 vorgestellte GUI der Ground Control Station verwendet, siehe Abbildung 66.



**Abbildung 66 Visualisierung der Signale und Parameter des Steuer- und Regelungssystems im Feldeinsatz**

### **Sprachausgabe**

Die Menge an Informationen während des Versuchsbetriebes führt oft dazu, dass wichtige Systemänderungen bzw. deren Signalisierung übersehen werden. Es wurde daher eine Sprachausgabe mit frei konfigurierbaren Texten entwickelt und in das System integriert, die wichtige Meldungen des Systems auch akustisch wiedergeben kann.

## Netzwerk

Der gesamte Datenaustausch zwischen den Komponenten des Fahrzeuges und des Entwicklungsleitstandes erfolgt per Ethernet-UDP-Multicast-Nachrichten und dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Intermodul-Protokoll IMP. Die Netzwerkstruktur ist in Abbildung 67 dargestellt.

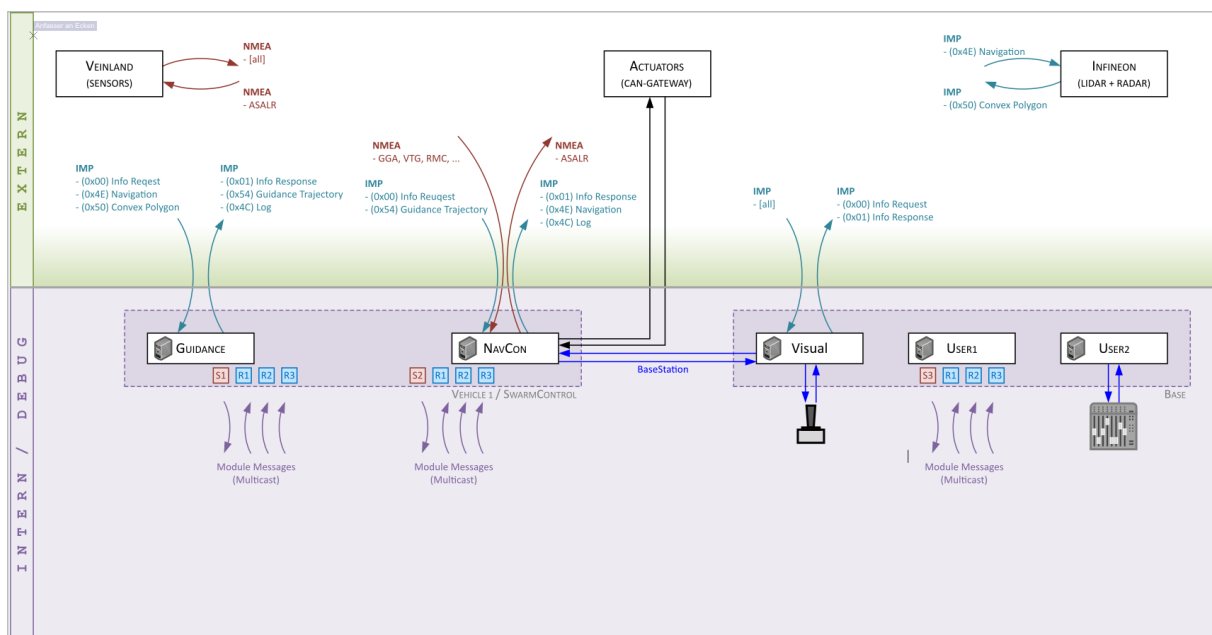


Abbildung 67 Kommunikationsstruktur des Steuer- und Regelsystems

### 3.6.2 AP11.b Validierung und praktische Erprobung der Ergebnisse durch Modellversuche in der Schlepprinne

Nach der erfolgreichen Erprobung des Regelungssystems in Simulationen und HiL-Tests ist es notwendig, alle aktualisierten und neu entwickelten Funktionalitäten unter reproduzierbaren Störbedingungen in Realität zu validieren. Hierfür sind Experimente im Modellmaßstab mit realistischen Sensormodellen, beispielsweise die Nachahmung statistischer Eigenschaften von GNSS-Systemen, das Mittel der Wahl.

Die Arbeiten von URO fokussierten sich in diesem Arbeitspaket auf die Erprobung der entwickelten Methoden zur Parametrierung des Steuer- und Regelsystems sowie auf den Umgang des Systems mit Ausfällen und Einschränkungen. Hierzu wurden Experimente in der Schlepprinne der SVA Potsdam durchgeführt.

Die Positions- und Bewegungssensorik wurde in der SVA durch ein optisches Trackingsystem realisiert, welches Position und Lage relativ zum Messwagen in 6 Freiheitsgraden mit einer Abtastrate von 100Hz ausgibt. Der Entwicklungsleitstand des Steuer- und Regelsystems

wurde auf dem Messwagen aufgebaut, siehe Abbildung 68 und Abbildung 69. Die Datenverbindung zwischen dem Fahrzeug und dem Leitstand wurde per Ethernetkabel realisiert.



**Abbildung 68 Aufbau des Entwicklungsleitstandes auf dem Schleppwagen des Schleppkanals der SVA Potsdam**

Es erfolgte während der Versuche die Parametrierung des zu Grunde liegenden Bewegungsmodell des Navigationsfilters und des Reglers. Im Speziellen die Ermittlung der Masse- und Dämpfungsmatrix sowie der Totzeiten der Übertragungswege.

Weiterhin wurde der Zustandsregler für verschiedene Störszenarien (Strömungskräfte, Windkräfte etc.) parametrisiert und getestet.

Die Regelgenauigkeit wurde unter verschiedenen Genauigkeitscharakteristiken der Sensoren getestet. Das Positionssignal des optischen Trackingsystems wurde dazu künstlich verrauscht.



**Abbildung 69 Messwagen und Fahrzeug im Schleppkanal der SVA Potsdam**

Weiterhin wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, inwieweit sich Aktorfehler, verzögerte Datenübertragung und Parametrierungsfehler auf die Qualität und Stabilität der Regelung auswirken.

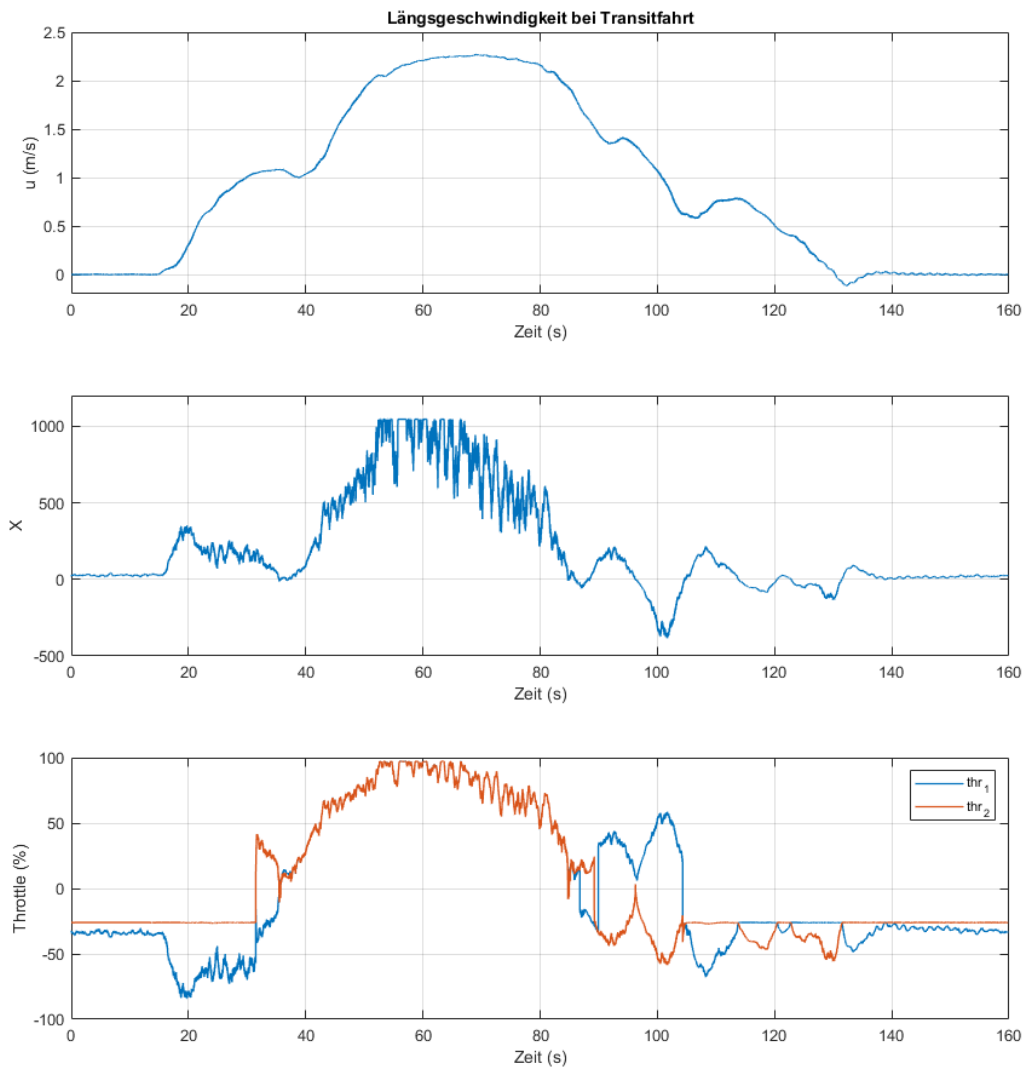
### **Parametrierung des Bewegungsmodells**

Eine wichtige Aufgabenstellung der ersten Versuche in der SVA war die Parametrierung des Bewegungsmodells sowohl für die Navigationsfilter als auch für den Regelungsentwurf. Die begrenzten Platzverhältnisse in der Schlepprinne bei gleichzeitig großen Abmessungen der Versuchsträger machte ein iteratives Vorgehen notwendig.

In den meisten Versuche mussten Regelungen dafür sorgen, dass das Fahrzeug in der Mitte der Schlepprinne blieb, insbesondere bei den Querfahrten und den Drehungen. Es wurde daher eine Vorabparametrierung auf Basis der geometrischen Daten des Fahrzeuges verwendet, mit der die Regelung entworfen wurde. Mit jeder Versuchsdurchführung wurde das Bewegungsmodell mit den Versuchsdaten verbessert und die Regelung neu entworfen.

Mit diesem Vorgehen, konnte eine sehr gute Genauigkeit der Regelung mit Abweichungen von wenigen Zentimetern von der Sollposition erreicht werden. Beispielhaft sind die Verläufe solch einer Versuchsfahrt für die Ermittlung der Elemente der Dämpfungsmatrix in Querrichtung in Abbildung 70 dargestellt, eine dazugehörige Aufnahme des Fahrzeuges während des Versuchs in Abbildung . Für eine Versuchsfahrt zur Ermittlung der Elemente der Dämpfungsmatrix der Rotation um die Z-Achse sind die Verläufe in Abbildung 72 dargestellt.

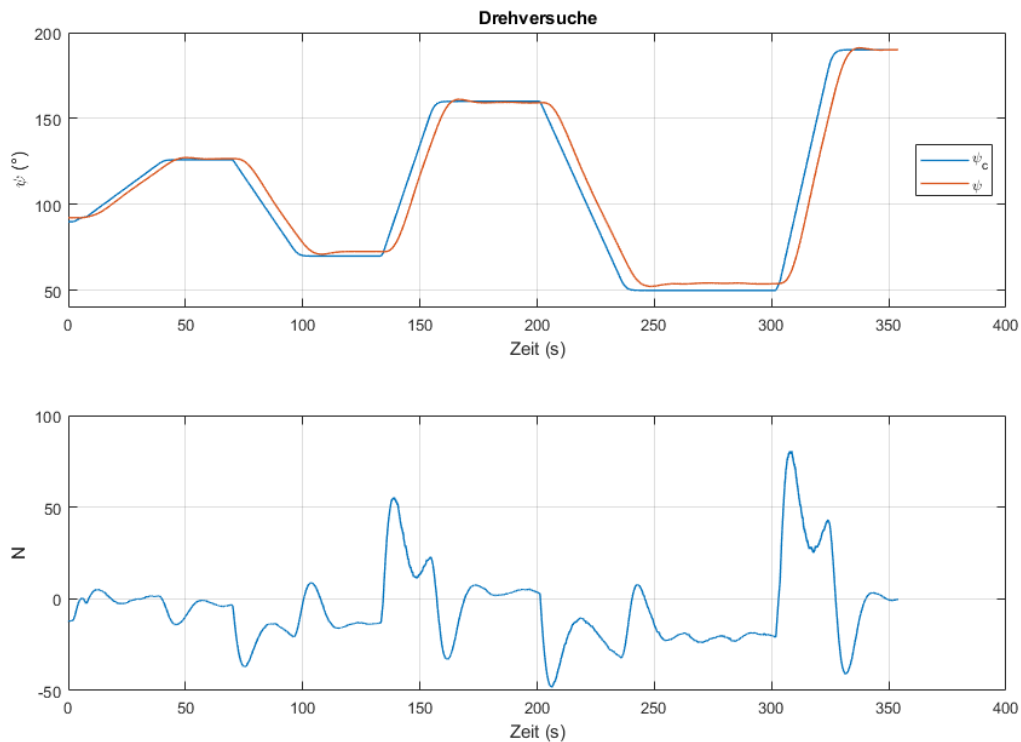




**Abbildung 70 Ergebnisse eines Identifikationsversuchs zur Identifikation der Elemente der Dämpfungsmatrix für die Längsbewegung (oben Geschwindigkeit, Mitte Kraft, unten Stellgrößen beider Antriebe in %)**



**Abbildung 71 Fahrzeug während eines Identifikationsversuchs in Querfahrt im Schleppkanal der SVA Potsdam**



**Abbildung 72 Ergebnisse eines Identifikationsversuchs zur Identifikation der Elemente der Dämpfungsmatrix für die Rotation um die Z-Achse**

### Parametrierung des Reglers

Der in Kapitel besprochene Zustandsregler wurde so parametrierung, dass eine möglichst schnelle Reaktion bei maximal 70% der Stellgrößen und ohne Überschwingen der Position bzw. des Winkels realisiert wurde. Insbesondere bei Anlegemanövern und beim Manövrieren in der Nähe von Strukturen muss ein Überschwingen der Positionsregelung ausgeschlossen werden können. Das Ergebnis eines Sollsprungvorgabe der Position in Querrichtung ist in Abbildung 73 dargestellt. Für die Sprungvorgabe des Kurswinkels ist der zugehörige Verlauf des Soll- und Istwinkels in Abbildung 74 dargestellt.

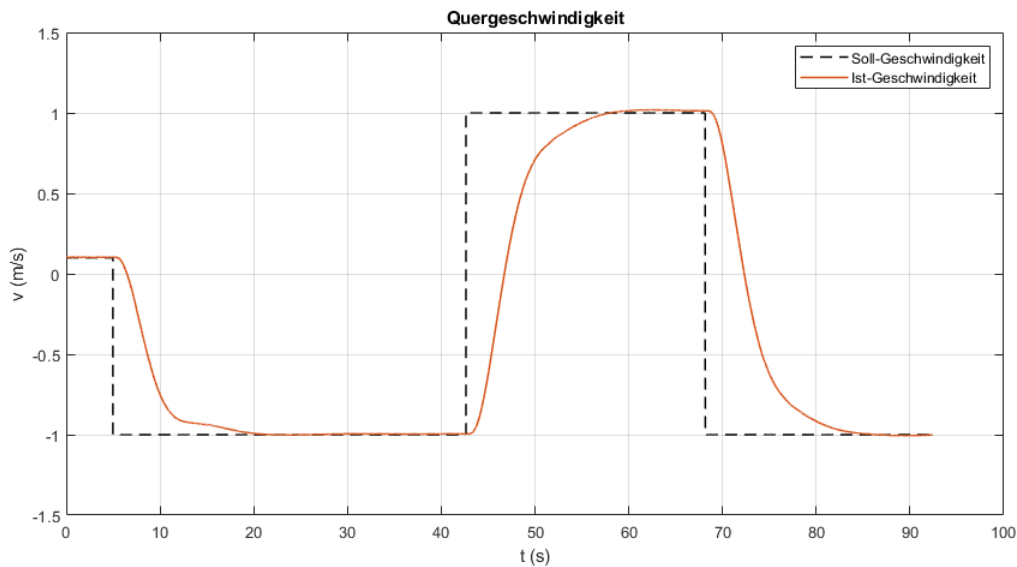


Abbildung 73 Verlauf der Soll- und Istposition einer Sprungvorgabe in Querrichtung

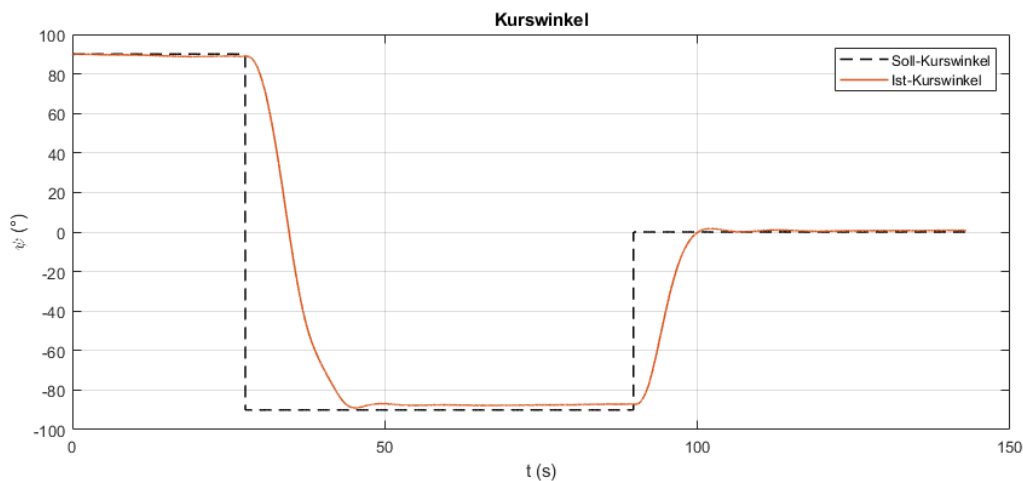
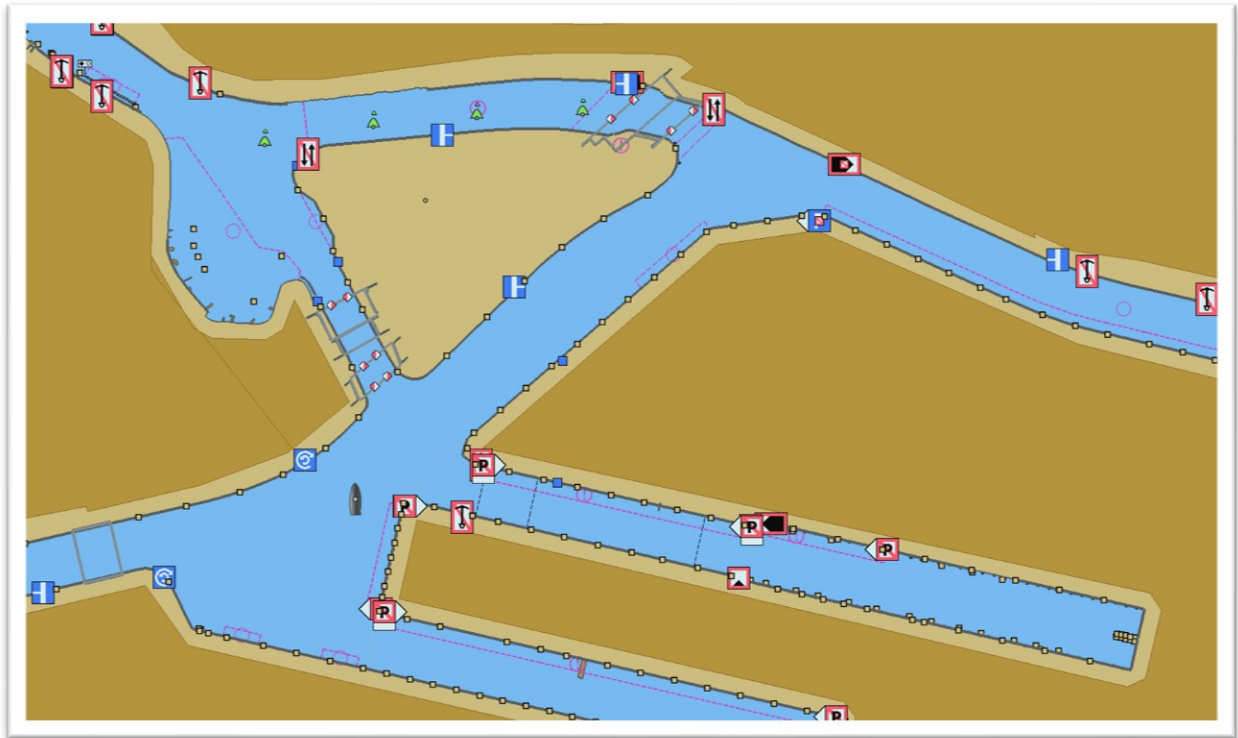


Abbildung 74 Verlauf des Soll- und Ist-Kurswinkels für eine sprunghafte Kurswinkeländerung

### 3.7 AP12 Freifeldversuche im Reallabor

#### 3.7.1 AP12.a Weiterentwicklung des Prototypensystems für den Einsatz im Reallabor

Die Feldversuche mit den A-SWARM-Fahrzeugen wurden im Bereich des Berliner Westhafens auf dem Gelände der Behala durchgeführt, siehe Abbildung 75.



**Abbildung 75 Erprobungsgebiet in und um den Berliner Westhafen**

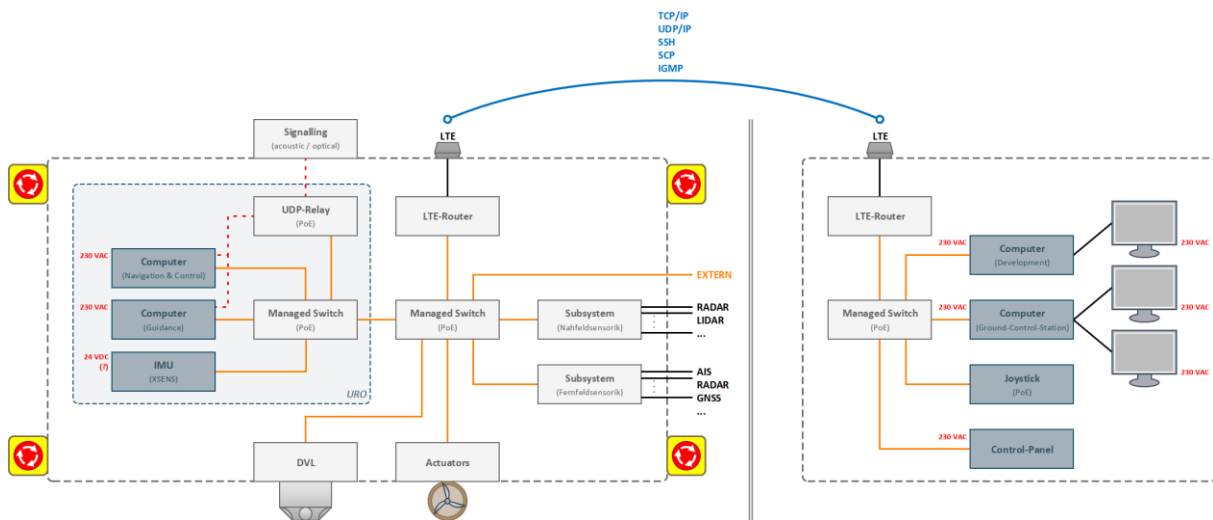
Insgesamt wurden 5 Testkampagnen mit einer Dauer von jeweils einer Woche durchgeführt. In den ersten beiden Testkampagnen wurde der Versuchsleitstand an Land aufgebaut, siehe Abbildung 76.

Für die Datenübertragung zwischen dem Fahrzeug und dem Leitstand wurde eine 5Ghz-WIFI-Funkverbindung konfiguriert, siehe Abbildung 77. Weiterhin wurden LTE-Router zur Übertragung konfiguriert und getestet. Im Verlauf der Testkampagnen hat sich die Datenübertragung per LTE jedoch nicht bewährt, da hier variierende Latenzen bis zu 5s auftreten konnten, was eine sichere Steuerung des Versuchsträgers unmöglich machte.

Es wurde sich daher ausschließlich auf die 5Ghz-Verbindung gestützt, die als Punkt-zu Punkt-Verbindung mit einem Ethernet over IP-Tunnel (EoIP) konfiguriert wurde und so transparent für alle Kommunikationskanäle bzw. -protokolle funktionierte. Die Reichweite mit Sichtverbindung auf dem Wasser betrug bis zu 500m. Damit waren Versuchsfahrten nur mit Sichtkontakt im Hafenbecken möglich. Für weitläufigere Erprobungsfahrten außerhalb des Hafenbeckens war es abweichend von der Projektplanung notwendig den Leitstand im Sichtbereich des Fahrzeuges mitzuführen.



**Abbildung 76** Versuchsleitstand am Hafenbecken 1 der BEHALA im Berliner Westhafen

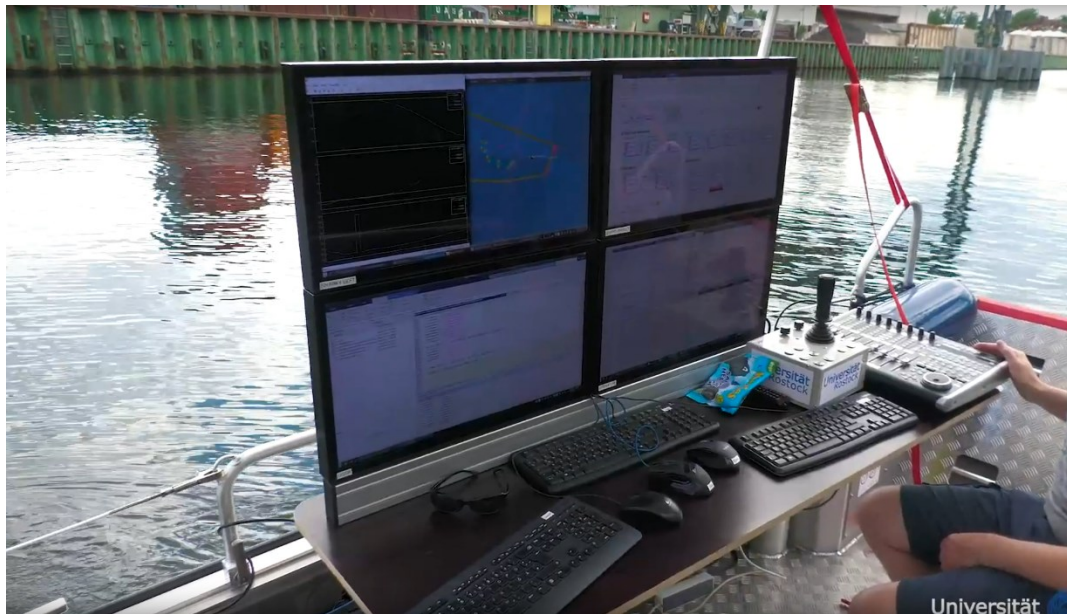


**Abbildung 77** Netzwerkkonfiguration des Steuer- und Regelsystems mit Fahrzeug und Entwicklungsleitstand bei Feldversuchen

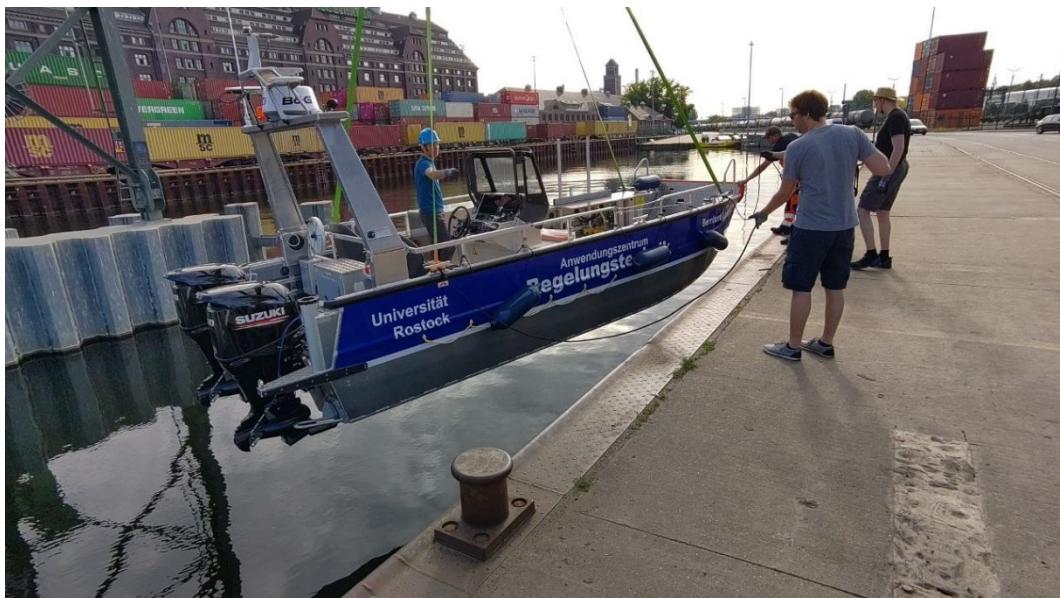
Zu diesem Zweck wurde der Experimentalkatamaran „Bernhard Lampe“ der Universität Rostock genutzt. Der Katamaran ist als Arbeitsboot entwickelt worden und wurde zum einen als Begleitboot für autonome Fahrzeuge des Lehrstuhl Regelungstechnik ausgestattet und konfiguriert und zum anderen kann er selbst als automatisiertes Fahrzeug betrieben werden. Er zeichnet sich durch eine starke Motorisierung mit einer 3dof-Joysticksteuerung zum exakten Manövrieren in der Nähe anderer Fahrzeuge aus. Ausgestattet ist er mit hochgenauer Sensorik, die als Referenz für die Versuchssensorik dienen kann. Der Katamaran ist mit einer bordeigenen, autarken 230V-Spannungsversorgung ausgestattet, die den Betrieb von Standard-Rechentechnik auf dem Boot ermöglicht.

Für den Einsatz in diesem Vorhaben wurde der Entwicklungsleitstand auf dem Arbeitsboot integriert. Dazu wurde ein Arbeitstisch für das Schienensystem des Bootes entworfen und

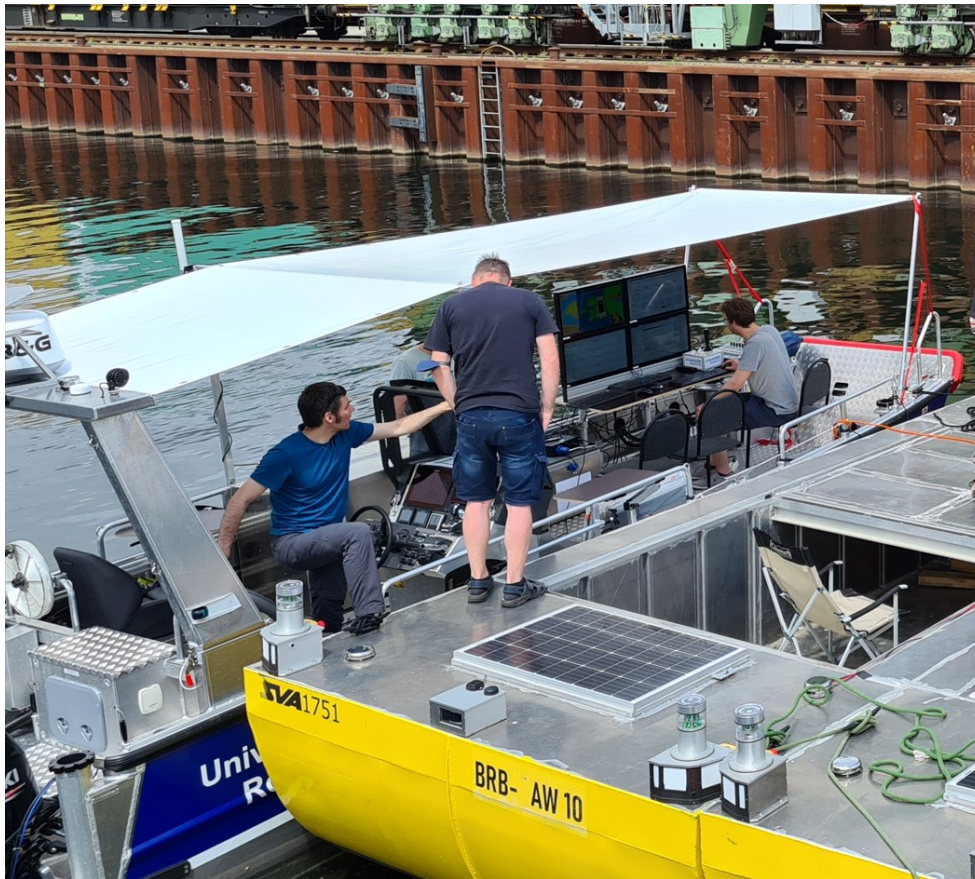
gebaut und die Rechner des Leitstandes, in wasserdichte, belüftete Gehäuse integriert. Die bis dahin genutzten Monitore des Leitstandes erwiesen sich als zu dunkel und hatten keinen IP-Schutzklasse, die sie für den Einsatz qualifizierten. Sie wurden daher gegen 24“-Outdoor-Monitore mit einer Helligkeit von 1500cd/m<sup>2</sup> und einer IP55-Schutzklasse ausgetauscht, welche an einer Masthalterung auf dem Boot befestigt wurden, siehe Abbildung 78. Als Sonnen- und Regenschutz wurde eine Schutzplane entworfen. Da das Boot täglich am Westhafen gekrant wurde, siehe Abbildung 79, musste diese Plane schnell auf- und abbaubar sein. Das Boot mit aufgebauter Schutzplane ist in Abbildung zu sehen.



**Abbildung 78 Entwicklungsleitstande mit Bedienelementen und Outdoor-Monitoren auf dem Experimentalkatamaran „Bernhard Lampe“**



**Abbildung 79 Kranen des Experimentalkatamarans im Berliner Westhafen**



**Abbildung 80 Experimentalkatamaran mit Schutzplane und Entwicklungsleitstand andockt an den A-SWARM-Fahrzeugen im Berliner Westhafen**

### 3.7.2 AP12.b Modellversuche im Erprobungsgebiet

Die Testkampagnen im Berliner Westhafen gliederten sich grob in folgende Zeiträume und Erprobungsziele:

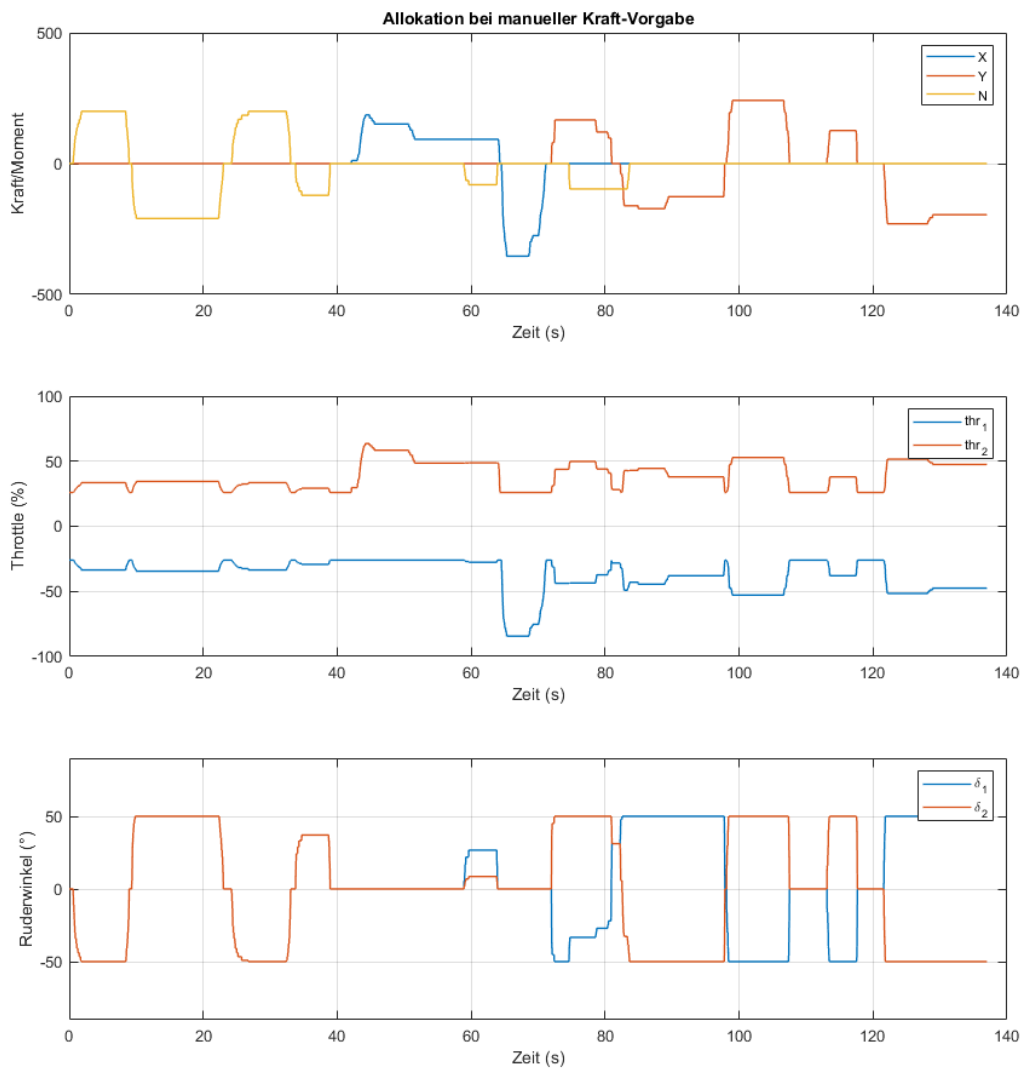
1. August 2021: Allgemeiner Test der Aktorik, Sensorik und der Datenkommunikation, Parametrierung des Steuer- und Regelsystems
2. März 2022: Optimierung der Allokation und der Regelung, Test des Zusammenspiels zwischen Trajektoriengenerierung und Regelung
3. Juni 2022: Test des neuen Entwicklungsleitstandes auf dem Experimentalkatamaran, Test der Trajektoriengenerierung und -optimierung auf dem Wasser
4. Juni/Juli 2022: Optimierung der Trajektorienplanung, Test der Bewegungsplanung, Optimierung der Allokation und der Regelung, Test der Dockingregelung, Weitläufige Versuchsfahrten durch die Berliner Kanäle
5. August 2022: Optimierung des Dockingmanövers, Optimierung der Trajektorien- und Bewegungsplanung, Abschlusstest und Demonstration

#### **Allokation**

Die Allokation hat die Aufgabe die vom Regler geforderten Kräfte und Momente in entsprechende Stellgrößen der Antriebe umzurechnen. Dies soll möglichst schnell und genau geschehen, weshalb die Dynamik der Antriebe berücksichtigt werden muss. Weiterhin soll für eine



hohe Effizienz der Wirkungsgrad entsprechend hoch sein. Einige dieser Anforderungen sind diametral und es bedarf für unterschiedliche Ziele auch verschiedener Allokationslösungen. In diesem Vorhaben wurde sich auf eine genaue Lösung konzentriert, die eine schnelle Umsetzung der geforderten Kräfte verspricht. Bei dieser Lösung werden die Schubkräfte der Antriebe gegensätzlich ausgerichtet, sodass sie sich ausgleichen. Durch Verstellen der Antriebswinkel kann dann eine schnelle Änderung der resultierenden Kraft erreicht werden, siehe auch Abschnitt 3.4.5. Das Ergebnis der Allokation bei einer manuellen Vorgabe der Kraft/Moment per 3D-Joystick ist in Abbildung 81 dargestellt.

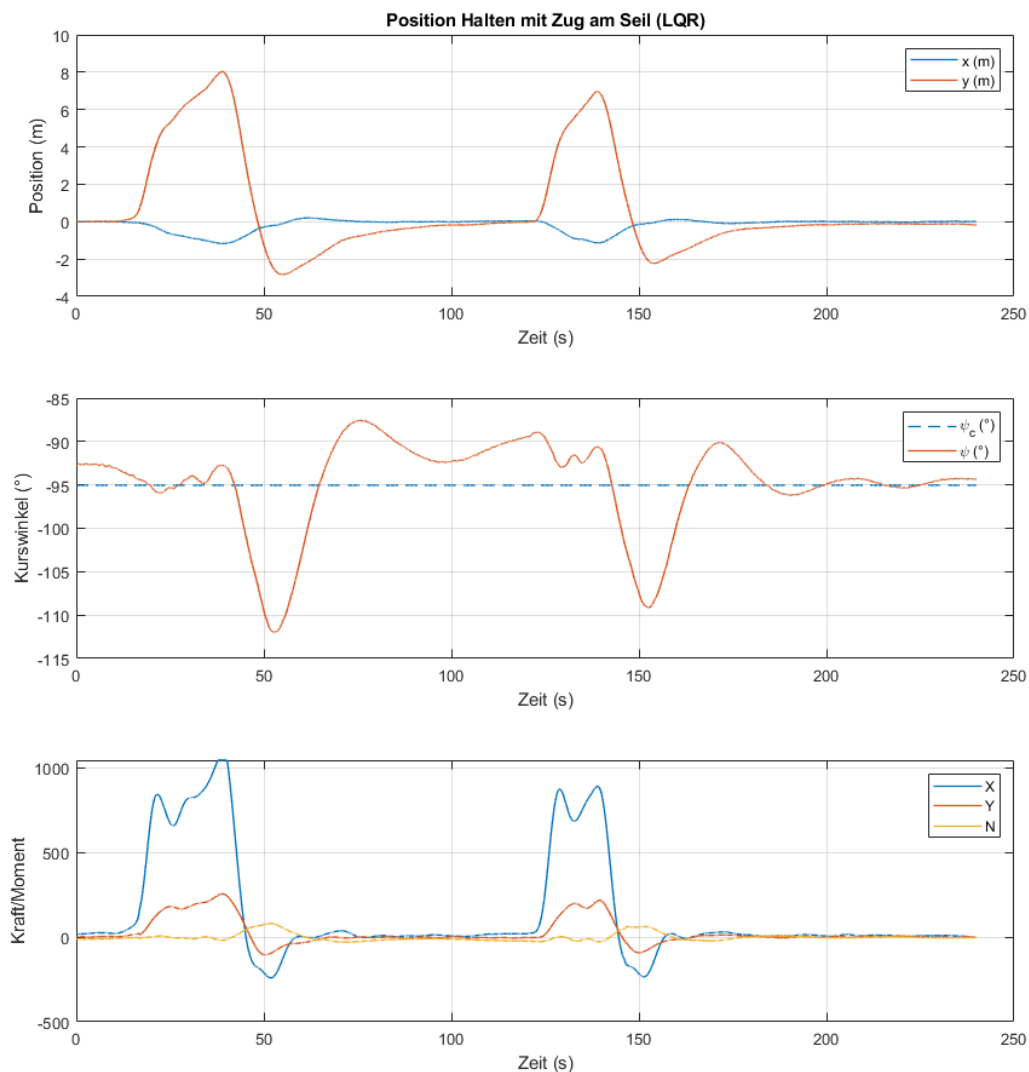


**Abbildung 81 Manöverallokation bei einer manuellen Vorgabe der Kraft und Moment**

## Positions- und Folgeregelung

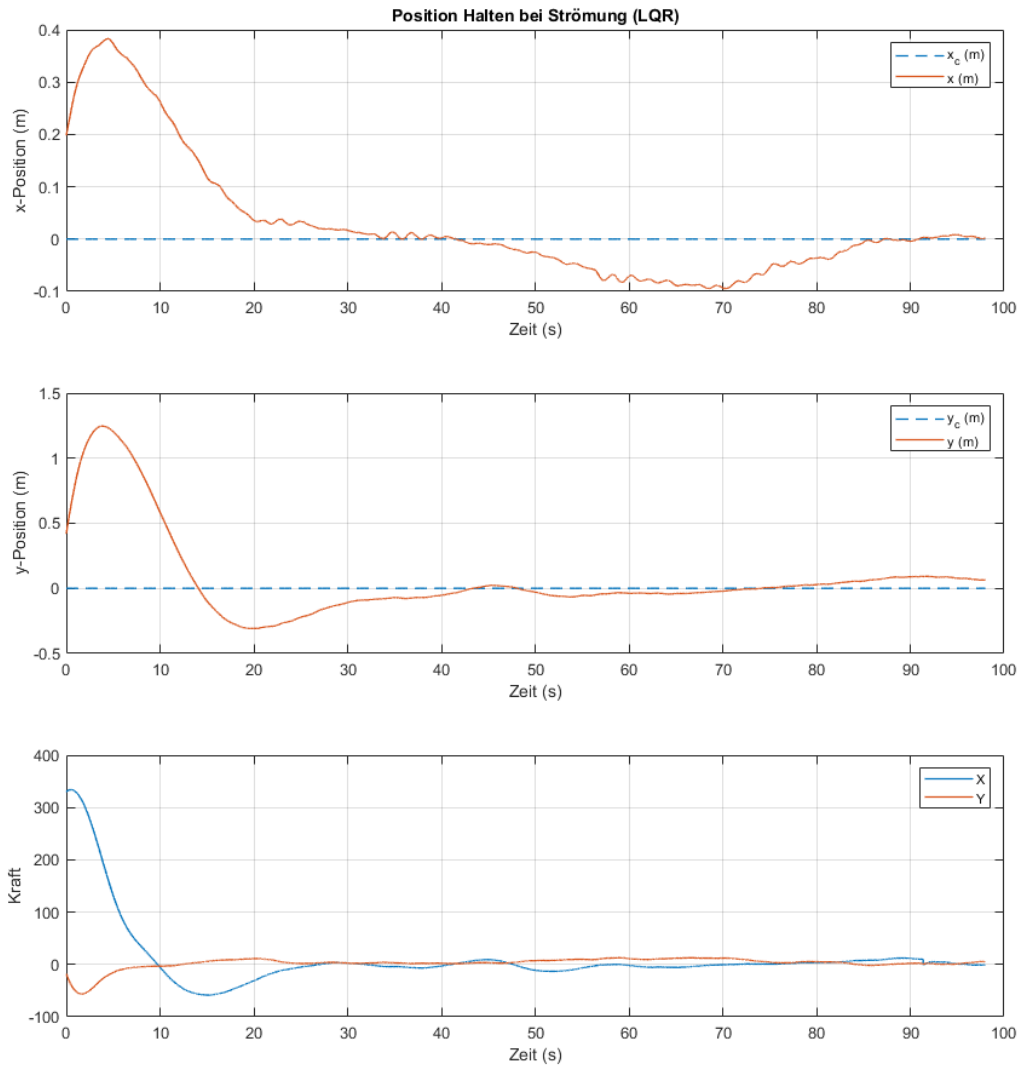
Für alle Manöver und auch das Abfahren von Trajektorien ist eine Positions- und Kurswinkelregelung unerlässlich. Diese beiden Regelungen bilden die Basis aller höheren Regelungsfunktionen. Insbesondere die Fähigkeit des Reglers Störungen auszureguln, stellt eine notwendige Eigenschaft da. In Abbildung 82 ist die Reaktion des Positionsreglers bei der Vorgabe

einer festen Sollposition und dem Einfluss von Störkräften dargestellt, die über ein Zugseil auf das Fahrzeug aufgebracht wurden.

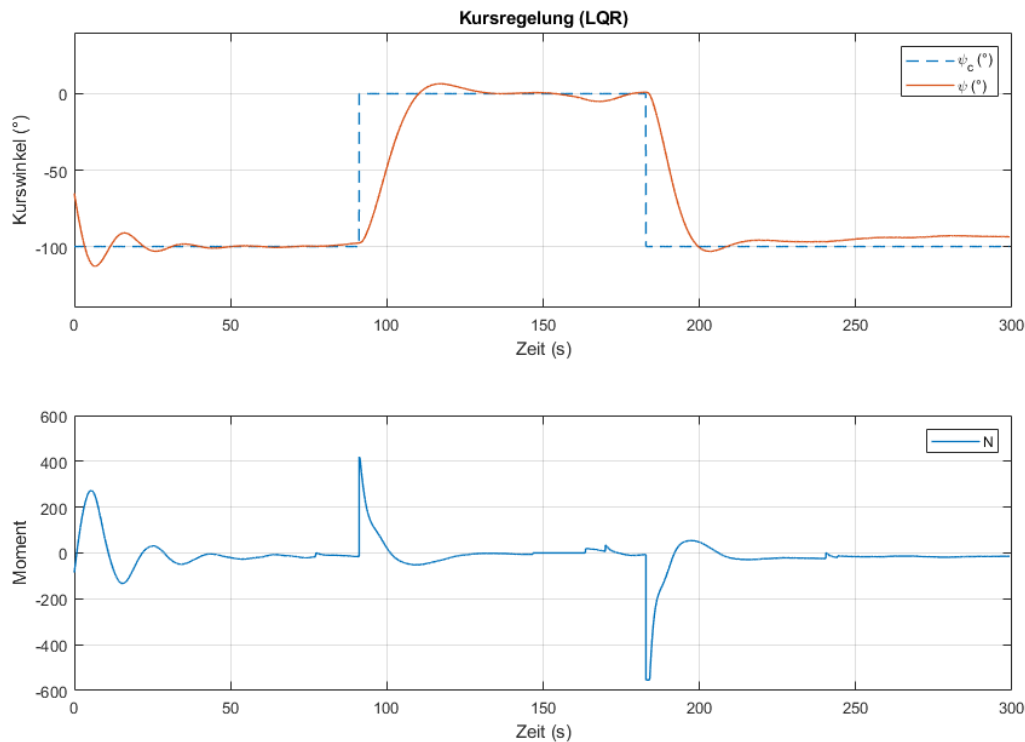


**Abbildung 82 Ausregelung der festen Sollposition bei manuell aufgebracht Störkräften**

In der Praxis treten eher Störkräfte durch Wind- und Strömungseinfluss auf, insbesondere verwirbelte, chaotische Strömungen sind eine besondere Herausforderung für die Regelung. In der Erprobungswoche im Juni 2022 konnte diese Situation praxisnah getestet werden, als ein Binnenschiff im Hafenbecken 1 bei einer Generatorverladung mit laufenden Antrieben die Position an der Kaikante hielt. Durch den Abstrom der Antriebe trat im gesamten Versuchsbecken des Hafenbeckens eine sehr stark verwirbelte Strömung auf. In diesem verwirbelten Bereich wurde das Fahrzeug positioniert und per Regelung auf Position gehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 83 dargestellt. Auch bei diesen sehr speziellen Bedingungen konnte eine sehr genaue Positionsregelung mit Abweichungen von maximal 10cm gewährleistet werden. Wie die Positionsregelung ist auch die Regelung des Kurswinkels essentiell für die übergeordneten Algorithmen. Der Verlauf des Sollwertsprungs innerhalb der Strömungsbedingungen und bei gleichzeitig aktiver Positionsregelung ist in Abbildung 84 dargestellt.



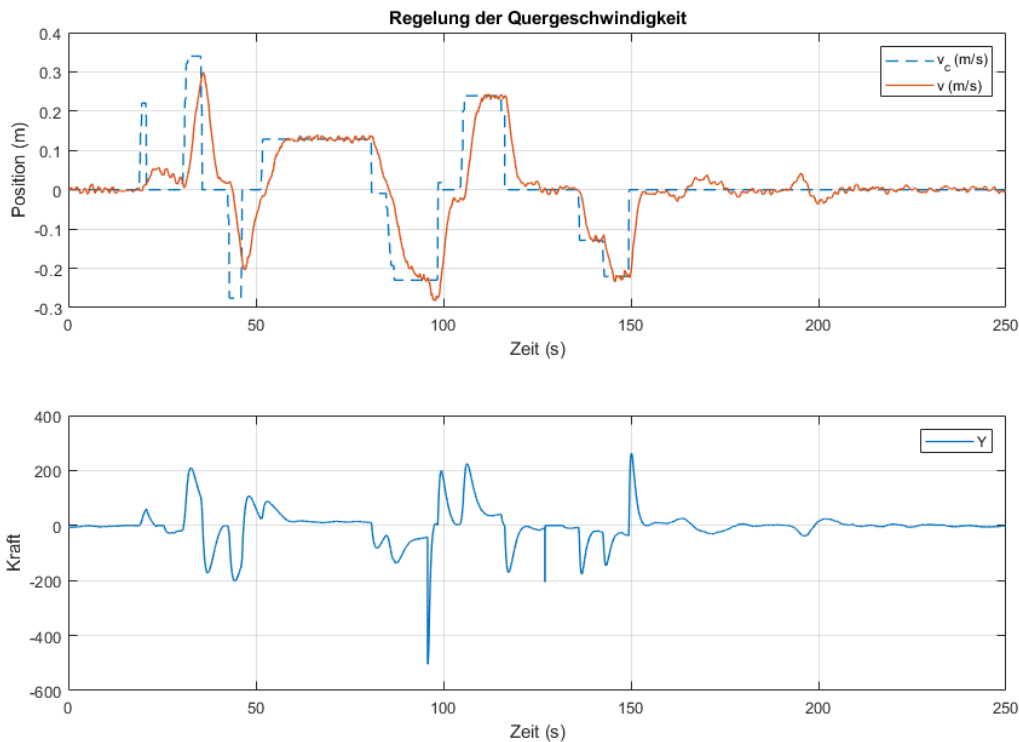
**Abbildung 83** Ausregelung der Position bei gleichzeitigen starken, chaotischen Strömungsstörungen



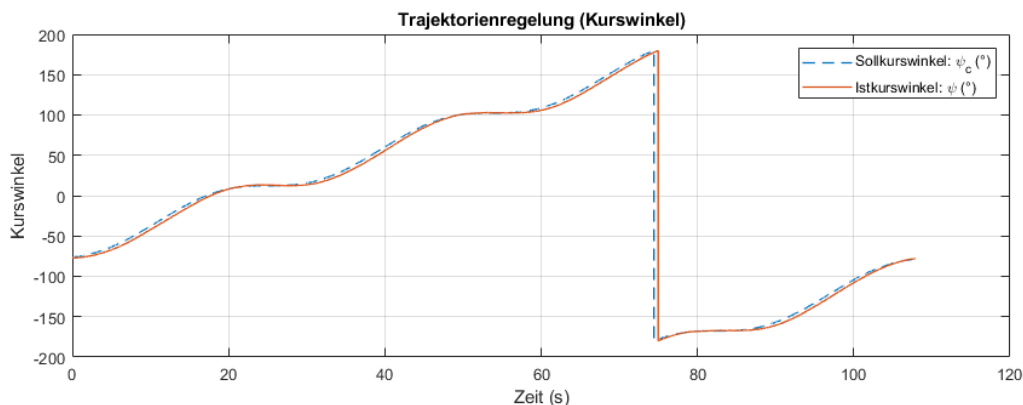
**Abbildung 84 Verlauf eines Sollwertsprungs der Kursregelung bei gleichzeitiger Positionsregelung unter starken Strömungsstörungen**

Neben der Positionsregelung ist die Regelung der Geschwindigkeit eine oft notwendige Funktion, z.B. bei Transitfahrt oder beim Nothalt ( $v=0$ ). Außerdem ist die manuelle Vorgabe der Geschwindigkeit des Fahrzeugs per Joystick eine der intuitivsten und genauesten Steuerungsmöglichkeiten für Operatoren und für eine spätere Fernsteuerung der Fahrzeuge sehr interessant. In Abbildung 85 ist so ein manueller Steuerungsvorgang mit Vorgabe der Quergeschwindigkeit und nachfolgender Geschwindigkeitsregelung dargestellt.

Als letzter Baustein der unterlagerten Regelungen wurde die Folgeregelung bei Sollwertänderungen im Versuchsgebiet getestet. Beispielhaft sei in Abbildung 86 eine Trajektorienfolgeregelung für den Kurswinkel dargestellt. Der Sollwert wird hier fortlaufend von der Trajektorienengenerierung an die Regelung übergeben und aktualisiert. Der Regler folgt dem Sollwertverlauf mit einer geringen Verzögerung, die durch die dynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges verursacht wird.



**Abbildung 85** Regelung der Quergeschwindigkeit bei manueller Vorgabe der Sollgeschwindigkeit per Joystick



**Abbildung 86** Trajektorienfolgeregelung für den Kurswinkel

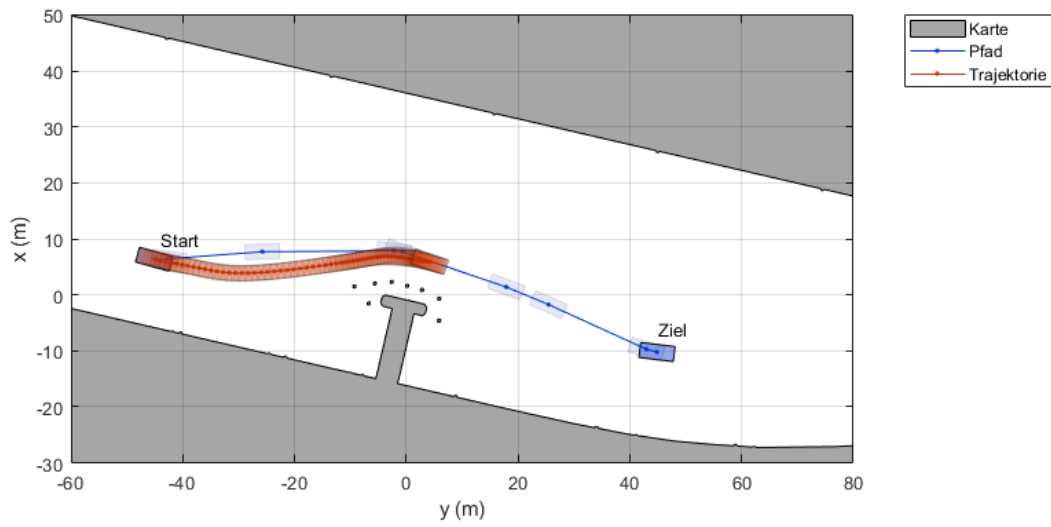
### Pfad- und Bewegungsplanung

Nach der Parametrierung und dem Test aller Reglerfunktionen konnten die übergeordneten Funktionen der Trajektoriengenerierung und -optimierung im Reallabor getestet und parametrisiert werden.

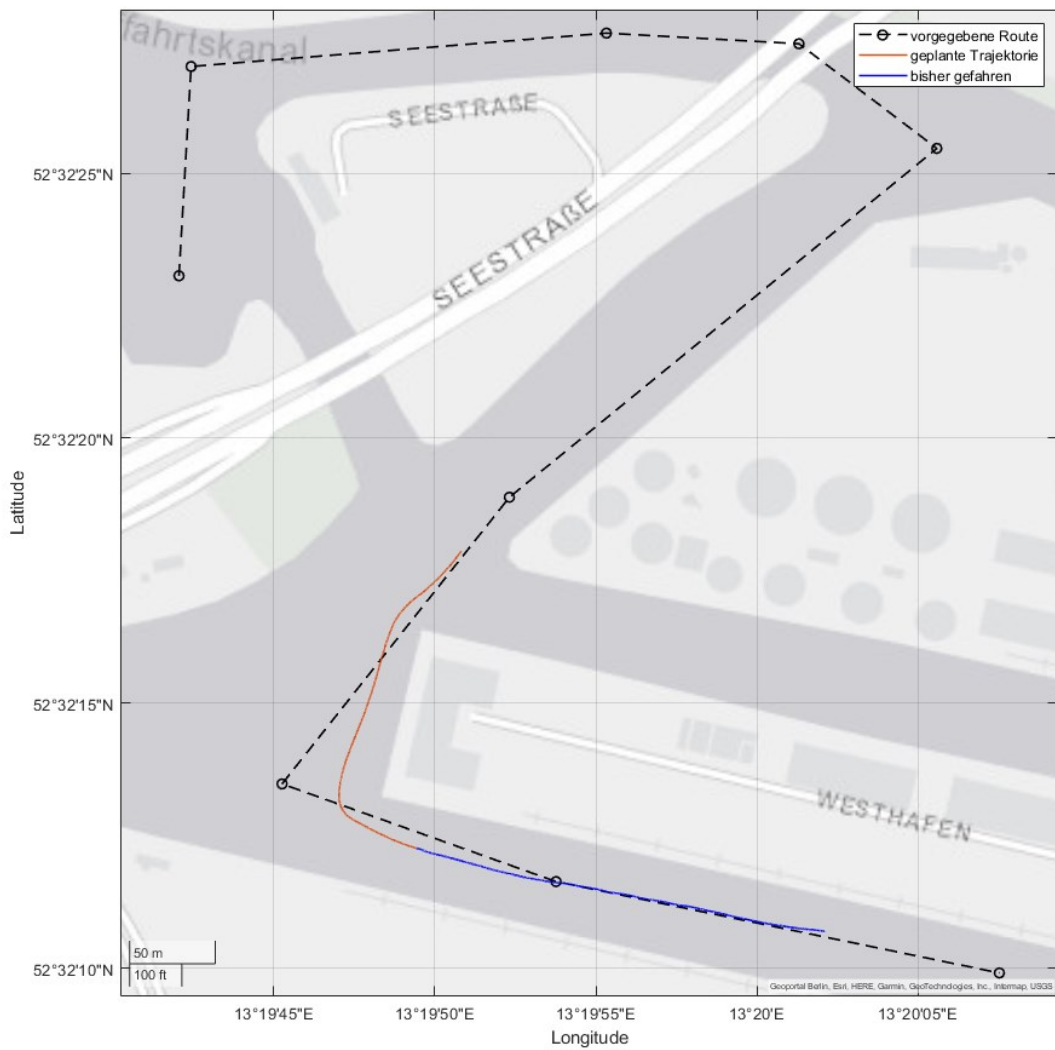
Erste Versuche wurden im Hafenbecken mit festen Hindernissen durchgeführt, die über die Umfeldsensorik erkannt wurden. In Abbildung 87 ist eine Momentaufnahme der Trajektorienoptimierung im Hafenbecken 1 zu sehen, in dem das dort befindliche Kranfundament erkannt und umfahren wurde.

Für die Erprobung längerer Strecken mit anderen Verkehrsteilnehmern und sich ändernden Bedingungen wurde eine Route um eine Insel in der Nähe des Westhafens gewählt, siehe

Abbildung 88. Abbildung 89 zeigt eine Szene aus der Enderprobung des Steuer- und Regelsystems im August 2022.



**Abbildung 87 Pfad- (blau) und Bewegungsplanung (rot) von einem Start- zu einem Zielpunkt bei Umfahrung eines erkannten, festen Hindernisses**



**Abbildung 88 Erprobungsrouten für einen umfangreichen Test des gesamten Steuer- und Regelsystems im Zusammenspiel mit der Umfelderkennung**



**Abbildung 89 Szene während der Enderprobung des Steuer- und Regelsystems im August 2022**

## Dockingmanöver

Als letzte Aufgabenstellung bestand die Erprobung des Docking-Regelalgorithmus zum Koppln zweier A-SWARM-Fahrzeuge. Da nur einer der Versuchsträger mit dem Steuer- und Regelsystem ausgestattet wurde, wurden die Docking Manöver zum großen Teil zu dem an der Kaikante vertäuten zweiten Versuchsträger durchgeführt. Ziel war es, das Fahrzeug von einer vorgegebenen relativen Startposition (ca. 10m von dem anderen Fahrzeug entfernt) mit einer seitlichen Abweichung von max. 2cm an das zweite Fahrzeug bis in Reichweite der Koppelmagnete anzunähern. Die geforderte Genauigkeit ergab sich aus den geometrischen Gegebenheiten der Koppelmagnete. Das Abkoppeln erfolge analog dazu, bis zu einem vorgegebenen relativen Abstand. In Abbildung 90 ist der Verlauf mehrere An- und Ablegemanöver dargestellt. In Abbildung 91 ist eine Momentaufnahme des Ablegemanövers zu sehen.

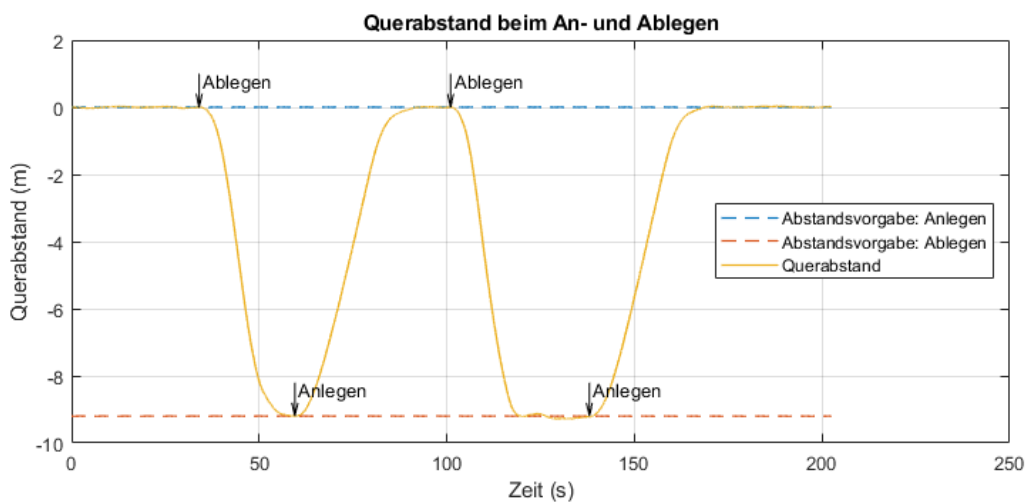


Abbildung 90 Verlauf der relativen Position beim mehrfachen Ab- und Anlegen.





**Abbildung 91 Ablegemanöver vom magnetisch gekoppeltem, zweiten Versuchsträger**

## 4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wie sich immer wieder zeigt, lassen sich wichtige Teilaspekte von F&E Projekten durch gezielte Ausarbeitungen besonders gut im Rahmen studentischer Qualifikationen (Studien-, Projekt- und Diplom-/Masterarbeiten) untermauern. Das liegt oft an der besonders hohen Motivation der Studenten, gute Abschlüsse mit praxisrelevanten Themen zu erzielen, weshalb auch im Rahmen des Teilprojektes von URO vorgesehen ist, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Dissertationen durchführen zu lassen. Die Ergebnisse werden zudem direkt auch zur Ausbildung von Studenten genutzt, wo sie in die entsprechenden Lehrveranstaltungen einfließen.

Bei der Universität Rostock wird das Teilprojekt zur Stabilisierung und Kompetenzerweiterung der maritimen Forschungsgruppe beitragen, so dass die Sicherung der vorhandenen Arbeitsplätze besonders in den Disziplinen Regelungs- und Automatisierungstechnik, Elektrotechnik und Schiffstechnik durch die Projektdurchführung erleichtert und die Qualifizierung zusätzlicher wissenschaftlicher Mitarbeiter ermöglicht wird.

Außerdem stellt der Antragsteller sicher, dass Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in abgeschlossenen oder parallellaufenden Vorhaben – auch aus anderen Industriezweigen – in diesem Projekt berücksichtigt werden. Der Antragsteller hat enge internationale Kontakte und ist selbst auf unterschiedlichen Konferenzen vertreten (beispielsweise im Programmkomitee der IFAC, Marine Systems), so dass stets die neuesten Erkenntnisse auf den zu bearbeiteten Arbeitsfeldern in die Bearbeitung des Vorhabens einfließen.

Neben der Veröffentlichung der Ergebnisse in Printmedien sind hier vor allem auch die nationalen und internationalen Tagungen und Kongresse zu nennen, auf denen das Gesamtsystem aber auch die Teilkomponenten einem breiten Fachpublikum vorgestellt werden.

### 4.1 Verwertungsplan mit Zeithorizont

lfd. Nr.	Verwertung	Zeithorizont
1	Wirtschaftliche Verwertung Die wirtschaftliche Verwertung obliegt den Industriepartnern.	--
2	Wissenschaftlich/technische Verwertung	
2.1	Nutzung der Simulationsmodelle und Algorithmen für weitergehende Untersuchungen	2023
2.2	Weiterentwicklung der Allokationsalgorithmen hinsichtlich Praxis-tauglichkeit	2023
3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Folgeentwicklungen/-Projekte	
3.1	Folgeentwicklungen sollen in einem Anschlussprojekt durchgeführt werden.	2023
4	Wissenschaftstransfer (Lehre, Studien-/Semesterarbeiten)	
4.1	Vorlesungsreihen, Universität Rostock, IAT	ab 2022

## 5 Bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet von anderen Stellen

Es wurden fortwährend nationale und internationale Weiterentwicklungen im Kontext des Projektes geprüft.

Bezüglich Fortschritts auf dem Feld der Regelung von autonomen Wasserfahrzeugen wurden diverse Publikationen und Anwendungen gefunden:

- In [36] wird eine fehlerbedingte Schubreduzierung am Bugstrahlruder untersucht, welche adaptiv erkannt und in einem Backstepping-Ansatz berücksichtigt wird.
- Ein adaptiver Sliding-Mode-Regler wird in [37] vorgestellt, wobei ein nichtlineares Modell unter Berücksichtigung von Coriolis-Effekten und einer nichtlinearen, hydrodynamischen Dämpfung zugrunde gelegt wird.
- Basierend auf neuronalen Netzen, wird in [38] eine robuste, adaptive Regelung für unbekannte Stellgrößenbegrenzungen, Totzeiten und externen Störungen sowie dynamischen Unsicherheiten untersucht.
- In [39] wird ein Allokationsalgorithmus auf der Grundlage von Penalty Programming entwickelt, um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren.
- In [40] wird eine energieoptimale Allokation durch Verstellung von Pitchwinkel und Drehzahl untersucht.
- Ansätze zur effizienten Berücksichtigung von hydrodynamischen Interaktionseffekten und physikalischen Beschränkungen der Antriebe basierend auf bivariaten Schubeffizienzfunktionen, neuronalen Netzen und sequentieller quadratischer Programmierung werden in [41] untersucht.
- Im Verbundprojekt SciPPPer (Schleusenassistenzsystem basierend auf PPP und VDES für die Binnenschiffahrt) wurde eine Mehrgrößenregelung innerhalb eines Schleusenassistenzsystems entwickelt.

Auf dem Feld der Trajektoriengenerierung und -optimierung wurden folgende Publikationen und Anwendungen gefunden:

- In [29] wird ein hybrides Verfahren zur globalen Pfadplanung vorgestellt, bei dem ein Wavefront-Propagation-Algorithmus mit der Velocity-Obstacle-Methode kombiniert wird.
- In [30] wird eine Methode für die Kollisionsvermeidung eines ASVs entsprechend der COLREGs beschrieben, wobei der Fokus auf offenen Gewässern liegt.
- Die in [31] beschriebene Methode zur Trajektorienplanung verwendet einen modellprädiktiven Regler, welcher die COLREGs als nichtlineare Nebenbedingungen berücksichtigt.
- In [32] wird die Trajektorienplanung und das automatische Docking für ein ASV in einem konvexen Gebiet basierend auf einer nichtlinearen Optimierung vorgestellt.
- In [33] wird der RRT-Algorithmus für die Routenplanung eines USVs verwendet, wobei eine Karte in Form einer Gridmap verwendet wird und die Fahrzeuggröße unberücksichtigt bleibt.

- Das in [34] beschriebene Verfahren verwendet den A\*-Algorithmus, um einen optimalen Pfad für ein USV zu finden, wobei das Fahrzeug als Punkt dargestellt ist.
- In [35] werden verschiedene potenzialfeld-basierte Verfahren zur Trajektorienplanung eines USVs in Bereichen mit statischen Hindernissen miteinander verglichen.
- In [36] wird eine Partikelschwarmoptimierung verwendet, um ein optimales Ausweichmanöver zwischen zwei Fahrzeugen in offenem Gewässer zu berechnen.

## **6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

### **6.1 Journal-Beiträge**

### **6.2 Konferenz-Beiträge**

R. Damerius, T. Hahn, T. Jeinsch

Towards Optimal Motion Planning of Surface Vehicles in Confined Waters, 09/2021

T. Hahn, R. Damerius, T. Jeinsch

An Identification Scheme to determine All Off-Diagonal Elements of Added-Mass Matrix for Marine Vessels, 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2021

R. Damerius, T. Jeinsch

Real-Time Path Planning for Fully Actuated Autonomous Surface Vehicles, 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) 2022

### **6.3 Studentische Arbeiten**

Auf Grund der Covid19-Pandemie wurden während der Projektlaufzeit kaum studentische Arbeiten durchgeführt.

### **6.4 Sonstiges**

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] A. Heßelbarth und weitere, „Driver assistance functions for safety inland vessel navigation,“ in *MTE ISIS*, Berlin, 2018.
- [2] M. Steidel und A. Hahn, „MTCAS – An Assistance System for Collision Avoidance at Sea,“ in *18 th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Tullamore, Ireland, 2019.
- [3] „MUNIN – Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks,“ [Online]. Available: <http://www.unmanned-ship.org/munin/>.
- [4] „Website von KONGSBERG,“ [Online]. Available: <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/EF62A43FFFC2209FC12581A90047B752?OpenDocument>.
- [5] W. Wang und weitere, „Design, Modeling, and Nonlinear Model Predictive Tracking Control of a Novel Autonomous Surface Vehicle,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, Australia, 2018.
- [6] R. Damerius, „InterModule Protocol auf Github,“ 19 09 2020. [Online]. Available: <https://github.com/RobertDamerius/InterModuleProtocol>. [Zugriff am 17 April 2023].
- [7] B. Kolewe, „Interpretierbare datenbasierte Modellierung für die Anwendung in Motorsteuergeräten,“ Universität Rostock, Rostock, 2018.
- [8] SNAME, „Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid,“ Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), New York, 1950.
- [9] A. J. Sørensen, Marine Control Systems, Propulsion and motion Control of Ships and Ocean Structures - Lecture Notes, Norwegen: Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [10] T. I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, Wiley, 2011.
- [11] A. J. Sørensen, S. I. Sagatun und T. I. Fossen, „Design of a Dynamic Positioning System using Model-based Control,“ *Control Engineering Practice*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 359-368, 1996.
- [12] T. Perez, Ship motion control: course keeping and roll stabilisation using rudder and fins, Springer Science & Business Media, 2006.
- [13] W. Blendermann, „Die Windkräfte am Schiff,“ Schriftenreihe Schiffbau;467, Hamburg, 1986.
- [14] R. Iserwood, „Wind resistance of merchant ships,“ *Royal Institute of Naval Architecture*, 1972.
- [15] Fugro GEOS for the Health and Safety Executive, „Wind and wave frequency distributions for sites around the British Isles,“ HSE Books, 2001.
- [16] C. De Wit, „Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships,“ Delft University of Technology, Delft, 2009.
- [17] J. Linder, M. Enqvist, T. I. Fossen, T. A. Johansen und F. Gustafsson, „Online Estimation of Ship's Mass and Center of Mass Using Inertial Measurements,“ in *10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC 2015*, Copenhagen, 2015.
- [18] Ø. N. Smogeli, „Control of Marine Propellers - From Normal to Extreme Conditions,“ Doctoral Theses at NTNU, 2006:187, Trondheim, 2006.
- [19] T. A. J. S. u. M. B. Perez, „MARINE VESSEL MODELS IN CHANGING OPERATIONAL CONDITIONS—A TUTORIAL,“ in *IFAC Proceedings Volumes, 14th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, 2006.
- [20] M. K. Park, „A Stabilizing Output-Feedback Linear Quadratic Control for Pure Input-Delayed Systems,“ *International Journal of Control*, 1999.

- [21] Z. Artstein, „Linear systems with delayed controls: A reduction,“ *IEEE Transactions on Automatic Control*, Bd. 27, Nr. 4, pp. 869-879, 1982.
- [22] P. a. W. J. Youn, „An approach to the linear multivariable servomechanism problem,“ *International Journal of Control*, pp. 961-079, May 1972.
- [23] J. D. u. J. L. Y. Lin, „Robust Adaptive Finite-time Fault-tolerant Control for Dynamic Positioning of Vessels,“ *International Journal of Control Automation*, pp. 3168-3178, Sep. 2021.
- [24] X. L. Y. C. J. L. u. F. D. L. Kun, „Adaptive sliding mode output feedback control for dynamic positioning ships with input saturation,“ *Journal of ocean engineering*, 2020.
- [25] K. L. u. a., „Robust adaptive neural networks control for dynamic positioning of ships with unknown saturation and time-delay,“ *Applied Ocean Research*, 05 2021.
- [26] S. W. u. M. H. K. Kim, „Fuel-Optimal Thrust-Allocation Algorithm Using Penalty Optimization Programming for Dynamic-Positioning-Controlled Offshore Platforms,“ *Energies*, 2018.
- [27] V. E. A. M.-C. u. A. F. Arellano-Quintana, „A Novel Experimental Model and a Drag-Optimal Allocation Method for Variable-Pitch Propellers in Multirotors,“ *IEEE Access*, pp. 68155-68168, 2018.
- [28] Z. H. H. L. W. u. X. W. Tang, „An Optimal Thrust Allocation Algorithm with Bivariate Thrust Efficiency Function Considering Hydrodynamic Interactions,“ *Journal of Marine Science and Technology*, 15 04 2021.
- [29] P. Chen, Y. Huang, E. Papadimitriou, J. Mou und P. v. Gelder, „Global path planning for autonomous ship: A hybrid approach of Fast Marching Square and velocity obstacles methods,“ *Ocean Engineering*, Bd. 214, p. 107793, 2020.
- [30] B.-O. H. Eriksen, G. Bitar, M. Breivik und A. M. Lekkas, „Frontiers in Robotics and AI,“ in *Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant with COLREGs Rules 8 and 13-17*, 2020.
- [31] E. H. Thyri und M. Breivik, „Collision avoidance for ASVs through trajectory planning: MPC with COLREGs-compliant nonlinear constraints,“ *MIC Journal*, Bd. 43, Nr. 2, pp. 55-77, 2022.
- [32] G. Bitar, A. B. Martinsen, A. M. Lekkas und M. Breivik, „Trajectory Planning and Control for Automatic Docking of ASVs with Full-Scale Experiments,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 53, Nr. 2, pp. 14488-14494, 2020.
- [33] Z. Zhang, D. Wu, J. Gu und F. Li, „A Path-Planning Strategy for Unmanned Surface Vehicles Based on an Adaptive Hybrid Dynamic Stepsize and Target Attractive Force-RRT Algorithm,“ *Journal of Marine Science and Engineering*, Bd. 7, p. 132, 2019.
- [34] J. Zhang, F. Zhang, Z. Liu und Y. Li, „Efficient Path Planning Method of USV for Intelligent Target Search,“ *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, Bd. 3, 2019.
- [35] R. Guardeso, M. Lopez, J. Sanchez und A. Consegliere, „AutoTuning Environment for Static Obstacle Avoidance Methods Applied to USVs,“ *Journal of Marine Science and Engineering*, Bd. 8, pp. 01-29, 2020.
- [36] G. Xia, Z. Han, B. Zhao und X. Wang, „Local Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Collision Avoidance Based on Modified Quantum Particle Swarm Optimization,“ *Complexity*, pp. 1-15, 2020.
- [37] T. I. Fossen und T. Perez, „Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs,“ *IEEE Control Systems*, Bd. 29, Nr. 6, pp. 32 - 46, 2009.
- [38] M. J. Grimble, R. J. Patton und D. A. Wise, „Use of Kalman filtering techniques in dynamic ship-positioning systems,“ *IEEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, Bd. 127, Nr. 3, 1980.

- [39] M. S. Grewal, Kalman filtering, Springer, 2011.
- [40] V. Hassani, A. J. Sørensen und A. Pascoal, „Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels Using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments,“ in *9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, Osaka, 2013.
- [41] H. Korte, M. Kurowski, M. Baldauf und B. Lampe, „AdaNav - A Modular Control and Prototyping Concept for Vessels with variable Gear Configurations,“ in *8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Guarujá, 2009.
- [42] H. Korte, J. Ladisch, M. Wulff, C. Korte und B. Lampe, „MIMO controller concept for vessels with modern steering gears,“ in *7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, 2006.
- [43] G. F. Franklin, J. D. Powell und A. Emami-Naeini, Feedback control of dynamic systems, Pearson Education, 2011.
- [44] S. Skogestad und I. Postlethwaite, Multivariable Feedback Control, Analysis and design., John Wiley & Sons, 2005.
- [45] C. Siebert, A. Haghani, P. Koschorrek und T. Jeinsch, „Robuste Regelung zur Dynamischen Positionierung von Schiffen mit Voith Schneider Propellern,“ in *Workshop der ASIM/GI - Fachgruppen STS und GMMS*, Stralsund, 2015.
- [46] T. I. Fossen und T. Perez, „Marine Systems Simulator (MSS),“ <<http://www.marinecontrol.org>>, 2004.
- [47] S. Ruiz, J. Font, G. Griffiths und A. Castellon, „Estimation of heading gyrocompass error using a GPS 3DF system: Impact on ADCP measurements,“ *SCIENTIA MARINA*, Bd. 66, Nr. 4, pp. 347-354, 2002.
- [48] G. Griffiths, „Using 3DF GPS Heading for Improving Underway ADCP Data,“ *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Bd. 11, Nr. 4, pp. 1135-1143, 1994.
- [49] G. Groen, „Comparison of parallel wind measurement with Sonic and Cup-Vane at nine locations for climatological applications,“ Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, 2011.
- [50] D. F. Roncero, „A study of QR decomposition and Kalman filter implementations,“ KTH, Stockholm, 2014.
- [51] F. Gustafsson, Statistical sensor fusion, Studentlitteratur, 2010.
- [52] W. Koch, Tracking and Sensor Data Fusion - Methodological Framework and Selected Applications, Springer, 2014.
- [53] A. Schubert, P. Koschorrek, M. Kurowski, B. Lampe und T. Jeinsch, „Roll Damping using Voith Schneider Propeller: a Repetitive Control Approach,“ in *To appear in 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems – CAMS*, Trondheim, 2016.
- [54] P. Koschorrek, C. Siebert, A. Haghani und T. Jeinsch, „Dynamic Positioning with Active Roll Reduction using Voith Schneider Propeller,“ in *10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'2015)*, Copenhagen, 2015.
- [55] P. Koschorrek, C. Siebert, A. Haghani und T. Jeinsch, „Dynamic Positioning with Active Roll Reduction using Voith Schneider Propeller,“ in *10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Copenhagen, 2015.
- [56] H. Korte, J. Majohr, C. Korte, J. Ladisch, M. Wulff und B. P. Lampe, „Prediction of Current Influence on Ship Motions - Linear Approach,“ in *Proc. 13th International Ship Control Systems Symposium*, Orlando, 2003.



- [57] M. Fu, J. Ning und Y. Wei, „Fault-Tolerant Control of Dynamic Positioning Vessel By Means of A Virtual Thruster,“ in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, 2011.
- [58] A. H. A. Sari, *Data-Driven Design of Fault Diagnosis Systems - Nonlinear Multimode Processes*, Springer Vieweg, 2014.
- [59] A. Haghani, T. Jeinsch und S. X. Ding, „Quality-Related Fault Detection in Industrial Multimode Dynamic Processes,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 61, Nr. 11, pp. 6446 - 6453, 2014.
- [60] Kongsberg, „K-POS - Dynamic Positioning Optimizing Complex Vessel Operations,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.km.kongsberg.com>. [Zugriff am 31 03 2016].
- [61] M. Schori, „Solution of Optimal Control Problems for Switched Systems - Algorithms and Applications for Hybrid Vehicles,“ 2016.

## Abkürzungsverzeichnis

AHRS	Lagereferenzsystem (Attitude Heading Reference System)
AP	Arbeitspaket
BB	Backbord
DP	Dynamische Positionierung (Dynamic Positioning)
FOG	Faser-optischer Kreisel (Fiber-Optic Gyroscope)
IAT	Institut für Automatisierungstechnik
IFAC	International Federation on Automatic Control
IMU	Inertialmesseinheit (Inertial Measurement Unit)
INS	Inertiales Navigationssystem (Inertial Navigation System)
SPS	Speicher programmierbare Steuerung
STB	Steuerbord
STG	Schiffbautechnische Gesellschaft
UKF	Unscented-Kalman-Filter
URO	Universität Rostock