



FernBin Sachbericht

Gesamtkonsortium

Oktober 2024

Autoren:

Fateme Bakhshande¹⁰, Abderahman Bejaoui¹⁰, Jörn Beschmidt⁶, Karim Böttger⁴, Guillermo Chilloce⁸, Mazyar Dawoodian⁸, Hannes Dierksmeier¹, Kathrin Donandt^{4,8}, Tim Feierfeil⁵, Rupert Henn¹, Maximilian Hohn⁹, Christian Hürten⁹, Maximilian Kaster⁹, Klemens Kauppert⁵, Frédéric Kracht¹, Axel Lachmeyer², Niels Lange¹, Alexander Lutz², Bettar el Moctar⁸, Jens Neugebauer⁸, Rinat Prezdneyakov⁷, Tim Redick⁷, Markus Moser⁷, Tim Reuscher⁷, Najibullah Sadid⁴, Martin Sandler³, Dieter Schramm⁹, Michael Schröder⁴, Johannes Schwarz-Beutel⁴, Stephan Schweig¹, Dirk Söffker¹⁰, Mark Spiller¹⁰, Jason Sutanto⁹, Navreet Singh Thind¹⁰, Matthias Waßenberg¹, Thomas M. Weber⁹, Björn Wierczoch⁸, Youjun Yang⁸, Haoming Zhang⁷

¹ DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., ² Argonics GmbH, ³ Argonav GmbH, ⁴ Bundesanstalt für Wasserbau, ⁵ Ingenieurbüro Kauppert, ⁶ in - innovative navigation GmbH, ⁷ Institut für Regelungstechnik (irt) der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen, ⁸ Institut für Nachhaltige und Autonome Maritime Systeme (INAM) der Universität Duisburg-Essen, ⁹ Lehrstuhl für Mechatronik (IMECH) der Universität Duisburg-Essen, ¹⁰ Lehrstuhl Steuerung, Regelung & Systemdynamik (SRS) der Universität Duisburg-Essen

Dieser Bericht umfasst alle Teilvorhaben im Verbundvorhaben „FernBin – Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt“, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wurde. Die Teilvorhaben sind:

- 03SX506A FernBin-Bausteine – Bausteine zum ferngesteuerten Fahren von Binnenschiffen (DST)
- 03SX506B Plattform zur Positions- und Lageschätzung, Fernsteuerung sowie zur teilautomatisierten Navigation von Binnenschiffen (Argonics)
- 03SX506C mikroVon (ingenieurbüro kauppert)
- 03SX506D Elemente zur Koordination und Fernsteuerung von Binnenschiffen (in)
- 03SX506E Sichere, assistierte Schiffsführung mit Online-Trajektorienplanung (RWTH)
- 03SX506F Fernsteuerung von Binnenschiffen auf der Basis von physikalischen Grenzen, Mensch-Maschine-Interaktion und Arbeitsabläufen (UDE)
- 03SX506Z Datenserver und Prognosemodelle für teilautomatisierte Binnenschiffe (BAW)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hinweis:

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

Inhalt

Teil I: Kurze Darstellung	1
1 Aufgabenstellung	2
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4 Wissenschaftlicher und technischer Forschungsstand zu Projektbeginn	6
4.1 Ausrüstungsstand der Binnenschiffe	6
4.2 Stand der Wissenschaft und Technik mit Bezug zum Projektthema	6
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
Teil II: Eingehende Darstellung	10
6 Einführung.....	11
7 Anforderungsdefinition, Konzeptentwicklung und Testspezifikation	11
7.1 Anforderungsspezifikation	11
7.2 Entwurf der Systemarchitektur	14
7.3 Definition von Testszenarien.....	16
7.4 Recherche relevanter Vorschriften	17
8 Bereitstellung und Ausrüstung des Testschiffs und Subsystemtests	17
8.1 Bereitstellung eines Testschiffs.....	17
8.2 Hardwareausrüstung	19
8.2.1 Ansteuerung der Steuerungs- und Antriebsanlagen.....	19
8.2.2 Ansteuerung Ruderventile	21
8.2.3 Ansteuerung der Hauptmaschine	21
8.2.4 Ansteuerung der Bugstrahlanlage	22
8.2.5 Autopilot und Bahnführung.....	22
8.2.6 Einlesen der Sensorik.....	22
8.2.7 Kameras	23
8.2.8 Radaranlagen und Inland-ECDIS	24
8.2.9 Laserscanner	25
8.2.10 Funkkommunikation.....	27
8.2.11 Navigationsplattform und Kommunikationsprotokoll	28
8.2.12 Topologie, Ausdehnung und Datenrate	28
8.2.13 Verfügbarkeit und Overhead	29
8.2.14 Verbreitung	29
8.2.15 Latenz	29

8.2.16	Auswahl eines Protokolls.....	29
8.2.17	Auslegung der Netzwerkarchitektur und Tests.....	29
8.2.18	Test im Labor.....	30
8.2.19	Installation, Kalibrierung und Inbetriebnahme der Sensorik für Navigationslösung	32
8.2.20	Installation auf dem Schiff.....	35
8.2.21	Propeller- und Rudermessungen.....	38
8.2.22	Weitere Installationstermine und Tests.....	40
9	Datenerfassung, -auswertung und -bereitstellung.....	42
9.1	Spezifikationen für Datenerfassung, -formate und -ablage	42
9.2	Infrastrukturdaten und Strömungsdaten	43
9.2.1	Beschreibung der Strömungsmodelle	44
9.2.2	Generierung der Strömungsdaten	46
9.2.3	Modellkalibrierung und Validierung	47
9.2.4	Abflussverteilung im Rhein und Nebenflüsse	50
9.2.5	Serveraufbau und Datenbereitstellung.....	51
9.2.6	Entwicklung eines Django-Webservers.....	52
9.2.7	Datenbereitstellung über Webseite und API.....	53
9.2.8	Relevanz für Forschung und Entwicklung.....	54
9.2.9	Ausblick und Weiterentwicklungsmöglichkeiten des INSEL Webservers.....	54
9.2.10	Algorithmen und Datenerzeugung.....	55
9.2.11	Die Bundeswasserstraßen-Kilometrierung der BAW	55
9.2.12	Der Stationierungsalgorithmus der BAW	56
9.2.13	Rückstationierung.....	57
9.2.14	Interpolation der Strömungsdaten.....	57
9.2.15	Zerlegung von Zeitreihen (AIS-Daten).....	57
10	AIS-Daten	58
10.1.1	Anonymisierung der AIS-Daten	58
10.1.2	Analyse zum Fahrverhalten	59
10.1.3	AIS-Benchmark-Datensatz	59
10.1.4	Verkehrsprognose	60
10.1.5	Ausblick.....	60
11	Messdaten der Schiffe	60
12	Fernsteuerung.....	63
12.1	Konzeptionierung des Steuerstands.....	63
12.2	Realisierung des Steuerstands	64
12.2.1	Physische Bedienelemente.....	65

12.2.2	Visualisierungselemente	68
12.2.3	Video-Visualisierung	69
12.2.4	Digitale Bedien- und Anzeigeelemente	71
12.2.5	Netzwerkstruktur Fernsteuerstand	73
13	Entwicklung der Kommunikationsschnittstelle.....	74
13.1	Analyse der Datenübertragung	74
13.2	Kommunikationsprotokoll mit Eigenschiff	77
13.3	Kommunikation zwischen Leitstelle und Schiffen.....	77
13.4	Kommunikation mit anderen Schiffen	78
14	Leitstelle.....	80
14.1	Softwarearchitektur der Leitstelle	80
14.2	Schnittstelle zur Darstellung geo-referenzierter trackbezogener Topologien	83
14.3	Schnittstelle zum Zugriff auf die Alarmfunktionen der Leitstelle.....	86
14.4	Schnittstelle zur Visualisierung von Routen-Daten.....	88
14.5	Interaktives Dashboard zur Visualisierung von Trajektorienplanungs- und Navigationslösung	91
14.6	Weiterentwicklung Verkehrssimulation	93
14.7	Weiterentwicklung der mikroskopischen Verkehrssimulation.....	95
14.7.1	Entwicklung mikroVon Kaskade	99
14.7.2	Datenhaltung	101
15	Mathematische Modellierung des Manövrierverhaltens des Eigenschiffes	103
15.1	Entwicklung des Modells zur mathematischen Beschreibung des Manövrierverhaltens	103
15.1.1	Validierung der numerischen Strömungssimulationen	103
15.1.2	Numerische Simulation des Überholvorgangs.....	108
15.1.3	Ausgangsmanövriermodell	112
15.1.4	Erweitertes Manövriermodell	112
15.1.5	Wassertiefenabhängiges Manövriermodell.....	112
15.1.6	Fourier-basiertes Modell für die Schiff-Schiff-Interaktion beim Überholen	113
15.1.7	Manövriermodell unter Berücksichtigung der Gewässerströmung	115
15.1.8	Propulsionsmodell	116
15.2	Modellierung des Testschiffs.....	119
15.2.1	Modellversuche und Validierung der numerischen Simulationen	119
15.2.2	Manövrieren im Tief- und Flachwasser	121
15.2.3	Schiff-Schiff-Interaktion beim Überholvorgang im Tief- und Flachwasser.....	125
15.2.4	Indirekte Systemidentifikation.....	128
15.3	Echtzeitfähige Trajektorienprädiktion	132

15.4	Digitaler Zwilling	133
16	Analysen zum Fahrverhalten (Fremdschiffe).....	133
16.1	Bereitstellung und Auswertung der AIS-Daten.....	133
16.1.1	Entwicklung und Konfiguration der AIS-Logger	133
16.1.2	Auswertung von AIS-Daten.....	135
16.1.2.1	Ansatz I: Bewegungs-/Verhaltensmodell.....	135
16.1.2.2	Ansatz II: Clustering.....	136
16.1.2.3	Ansatz III: Rekursiver Schätzalgorithmus zur Vorhersage des Trajektorienverlaufs von Schiffen	137
16.1.2.4	Evaluierung, Bestimmung der Verlässlichkeit der Vorgehensweisen, Fusion der Vorgehensweisen	138
16.2	Fahrdynamische Modellierung	139
16.2.1	Systemidentifikation anhand von AIS-Daten	139
16.2.2	Typische Routen & Geschwindigkeiten	147
16.2.3	Trajektorienprognose	152
16.2.3.1	Räumliches Situationsbewusstsein	152
16.2.3.2	Soziales Situationsbewusstsein.....	154
16.2.3.3	Unsicherheitsanalyse	157
16.3	Datenbank für Manövrierkoeffizienten	160
17	Entwicklung von Algorithmen für eine sichere und assistierte Schiffsführung	161
17.1	Implementierung Navigationsfilter.....	161
17.2	Hinderniserkennung	168
17.3	Erfassung von Situationen mit red. Leichtigkeit	169
17.4	Einbindung eines Bahnführungsassistenten	173
17.4.1	Schnittstelle zum Trajektorienplanungsmodul	175
17.5	Interaktive Online-Trajektorienoptimierung	176
17.5.1	Argonics: Interaktive Online-Trajektorienoptimierung	180
17.6	Warnstrategie.....	182
17.6.1	Psychologische Aspekte	183
17.6.2	Regulatorische Grundlagen.....	184
17.6.3	Ableitung der Anforderungen an eine Warnstrategie	185
17.6.4	Umsetzung und Validierung des Brücken-Alert-Managementsystems (BAM)	185
17.7	Workflowmanagement, Strategieauswahl und Notfallmanagement	189
17.7.1	Kollisionswarnsystem und Notfallfunktionalitäten	189
17.7.2	Abbildung von Verhaltensmustern der Schiffsführer	190
17.7.3	Situationsauswahl sowie Strategieentwicklung	202

17.7.4	Entwicklung des Notfallmanagements basierend auf Handlungsalternativen	208
18	Erprobung, Validierung der Anforderungen und Abschlussdemonstration	215
18.1	Erprobung und Evaluierung in der Simulation	215
18.2	Evaluierung Mensch-Steuerstand-Leitstand	215
18.2.1	Realfahrt-Probandenstudie	215
18.2.2	Erfahrungen mit der Fernsteuerung	217
18.2.3	Anmerkungen zum Fernsteuerstand	218
18.2.4	Gesellschaftliche Aspekte zur Fernsteuerung in der Binnenschifffahrt	218
18.2.5	Videoaufzeichnung-Probandenstudie	218
18.2.6	Einfluss der Bildauflösung und Bildrate auf das sichere Fahrgefühl	219
18.2.7	Anmerkungen zum Fernsteuerstand und zur Fernsteuerung in der Binnenschifffahrt	221
18.3	Drohnen-Befliegungen zur Validierung	221
18.4	Analyse und Überwachung von Onboard-Live-Daten	223
18.5	Felderprobung	223
18.5.1	Fernsteuerungstests	223
18.5.2	Manövriertests	230
18.5.2.1	Durchführung verschiedener Manöver	230
18.5.2.2	Validierung der Manöversimulationen	235
18.6	Demonstrationen	237
19	Nicht-technische Voraussetzungen für den Regelbetrieb	238
19.1	Qualifizierung	238
19.2	Anpassungsbedarf der Vorschriften	240
20	Zusammenfassung und Ausblick	242
21	Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	243
22	Referenzen	245
23	Abkürzungsverzeichnis	251
24	Anhang	253
24.1.1	Messprotokoll der Position der Sensoren	253
24.1.2	Fernsteuercheckliste	253
24.1.3	Ernst Kramer	253
24.1.4	Steuerstand	254
24.1.5	Systemstruktur	255
24.1.5.1	Gesamtstruktur	255
24.1.5.2	Fernsteuerstand	256
24.1.5.3	Leitstelle	257
24.1.5.4	Schiff	258

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Projektstrukturplan für das Projekt FernBin.....	4
Abbildung 2	Modulinstanzen der Fernsteuerung	15
Abbildung 3	GMS Ernst Kramer.....	18
Abbildung 4	Netzwerkstruktur: Managed Switch (1), Mobilfunkrouter mit 2 Modems (2), Satelliteninternetverbindung (3), Glasfaserverbindung (redundant) (4), Navigationsplattform (5), zentraler Server der Fernsteuerung (6)	19
Abbildung 5	Bedienteil der Fernsteuerung an Bord: Bildschirm mit Basisinformationen; Notausschalter (rot); Freigabeknopf (weiß)	20
Abbildung 6	Ansteuerung der Aktorik: Ruderanlage (1), Fahrhebel Hauptmaschine (2), Bugstrahlhebel (3), blaue Tafel (4), Navigationsplattform (5), Typhon (6)	20
Abbildung 7	Ansteuerung der Ruderventile.....	21
Abbildung 8	Ansteuerung der Hauptmaschine	22
Abbildung 9	Einlesen der Sensorik: GNSS-Kompass (1), Radar (2), Wendeanzeiger (3), Ruderlagegeber (4), Navigationsplattform (5), Echolot (6), Ladungsmesser (7), Momenten- und Schubmessung an der Welle (8), Drehzahlgeber an der Welle (9), Strömungsmessung über ADCP (10), Windmessung (11).....	23
Abbildung 10	An Bord verbaute Kameras: rückwärtsgerichtete 180°Kamera (1), vorausgerichtete 180° Kamera (2), vorausgerichtete Gangbordkamera an Steuerbord und Backbord (3, 5), vorausgerichtete Steuerhauskamera (4), rückwärtsgerichtete Gangbordkameras (6, 7), vorausgerichtete Bugkamera (8)	24
Abbildung 11	Abdeckungsbereiche der Laserscanner	26
Abbildung 12	Bugansicht der „Ernst Kramer“	27
Abbildung 13	Heckansicht der „Ernst Kramer“	27
Abbildung 14	Testaufbau Netzwerk.....	31
Abbildung 15	Bandbreiten für kontinuierliche Schreibzugriffe auf den Server für Testdateien mit 2000 MByte Größe	31
Abbildung 16	Draufsicht des Versuchsträgers mit Leitungsplan	33
Abbildung 17	Sensorausrüstung.....	34
Abbildung 18	Ausrüstung der Rechenhardware und Netzwerkkomponenten	34
Abbildung 19	Fehlende Sensoren bei der extrinsischen Kalibrierung (markiert in rot)	34
Abbildung 20	Extrinsische Sensorkalibrierung mit der RWTH-Totalstation.....	35
Abbildung 21	Vermessene Punktwolke zur Bestimmung der statischen Koordinatentransformationen der Sensoren	35
Abbildung 22	Testschiff Ernst Kramer auf der Helling der Schiffswerft Braun in Speyer.....	36
Abbildung 23	Installation der ADCP-Strömungssensoren (Aqua Doppler Current Profiler)	36
Abbildung 24	Schaltschrank der Navigationsplattform im Maschinenraum	37
Abbildung 25	Schaltschrank der Navigationsplattform im Steuerhaus	37
Abbildung 26	Schaltschrank der Navigationsplattform im Bugstrahlraum	37
Abbildung 27	DMS auf der Antriebswelle der Ernst Kramer	38
Abbildung 28	Komplettes Messsystem auf der Antriebswelle der Ernst Kramer	39
Abbildung 29	Telemetrie-Empfangeinheit	39
Abbildung 30	Hall-Sonden zur Messung der Drehzahl und der Drehrichtung an der Antriebswelle	40
Abbildung 31	Bedienpult für argoPilot und argoTrackPilot	41
Abbildung 32	Steuerstand mit RADARpilot720° Anzeige und Anzeige der Laserscannerbilder.....	42
Abbildung 33	Konzept des Datenaustausches mit den Projektpartnern nach Art der Daten.....	43

Abbildung 34	3D-Ansicht des knotenbasierten (a) und elementbasierten (b) Rechengitters (Modellausschnitt), das für die 2D-HN Simulation mit Telemac-2D (a) und DuMu ^x (b) verwendet wurde.	45
Abbildung 35	Vereinfachte Darstellung des 2D-HN Modellaufbaus, Berechnung der abflussbasierten Simulationsergebnisse und Generierung der gerasterten Strömungsdaten zur Bereitstellung.	46
Abbildung 36	Modellkette der Simulation und deren Randbedingungen für die Generierung der Strömungsdaten. Die 2D-HN Simulation beginnt mit dem Niederrheinmodell (Bonn bis Emmerich), Leserichtung von rechts nach links. Die Ergebnisse der Abfluss-Wasserspiegellagen-Beziehung am Einlauftrand des unterstromigen Modellabschnitts werden als Randbedingung an den Auslauf des oberstromigen Modellabschnitts übergeben.	47
Abbildung 37	(a) Differenz der Wasserspiegellagen zwischen kalibriertem 2D-HN Modell und den zugehörigen Fixierungen. (b) Rauheitsbeiwerte im Flussschlauch (unten)	48
Abbildung 38	Beispiel einer Punktwolke (gelb) für die Übertragung von Strömungsdaten aus dem Modell in ein Gitter. Die roten, grünen und blauen Linien stellen die Hektometer, das linke/rechte Fahrwasser und die Flussachse dar. Luftbildquelle: © GeoBasis-DE / BKG	50
Abbildung 39	Kurvenschar der Abflüsse im Längsschnitt des frei fließenden Rheins (Pegel Iffezheim bis Pegel Emmerich). Die Abflüsse sind in dieser Abbildung für 800 m ³ /s und alle ganzen 1000er m ³ /s dargestellt.	51
Abbildung 40	Struktureller Aufbau und verwendete Softwarekomponenten des INSEL Webservers	53
Abbildung 41	Pegelganglinie in cm im Jahr 2021. Die für den Benchmark ausgewählten Zeiträume sind rot markiert.	59
Abbildung 42	Visualisierung der Vorgehensweise zur Berechnung des berücksichtigten Bereichs um die Position des Zielschiffs.	60
Abbildung 43	Vom Echolot der Ernst Kramer aufgenommene Wassertiefe im Rhein zwischen den Kilometern 530 und 556, verglichen mit der Wassertiefe die vom insel.baw.de-Server bei gleichem Pegel zur Verfügung gestellt wird.	61
Abbildung 44	Auszugsweiser Vergleich der Messgrößen Kurswinkel ψ (oben), Rollwinkel ϕ (2. v. oben), Drehrate r (3. v. oben) und Stampfwinkel θ (unten) aus unterschiedlichen Datenquellen; Schwarz: Daten des GNSS-Empfängers; Rot: Daten der IMU	61
Abbildung 45	Darstellung der Umrechnung der Trajektorie der Ernst Kramer für einen Zeitraum von 20 Minuten. Oben: Rohdaten in WGS84-Koordinaten. Mitte: Daten in UTM. Unten: Daten in vereinfachtem Koordinatensystem	62
Abbildung 46	Vergleich direkt gemessener Größen für Position (oben), Längsgeschwindigkeit und -beschleunigung mit berechneten Werten anderer Sensoren. Schwarz: Direkte Messdaten; Grün: Werte infolge der Differenziation anderer Messwerte; Rot: Werte infolge der Integration anderer Messwerte.	63
Abbildung 47	Ergonomisches Grundkonzept des Fernsteuerstands	64
Abbildung 48	Fernsteuerstand an der Universität Duisburg-Essen.....	65
Abbildung 49	Steuerstand im VeLABi (DST).....	65
Abbildung 50	Fahrhebel des Fernsteuerstands.....	66
Abbildung 51	Bugstrahler-Hebel und Ruderhebel des Fernsteuerstands	67

Abbildung 52	SPS-Schaltschrank zur Ansteuerung der physischen Bedienelemente SPS-Schaltschrank zur Ansteuerung der physischen Bedienelemente.....	68
Abbildung 53	Draufsicht auf die Visualisierungsumgebung innerhalb der Spiel-Engine Draufsicht auf die Visualisierungsumgebung innerhalb der Spiel-Engine.....	69
Abbildung 54	Beispielbild der Achterkamera. Oben: Originalbild. Unten: Horizont- begradigtes Bild.....	71
Abbildung 55	HMI-Elemente Steuerstand in der Draufsicht in der Draufsicht	73
Abbildung 56	Anzeige von Radar, ECDIS und Navigationselementen auf dem zentralen Monitor.....	73
Abbildung 57	Netzwerkinfrastruktur Fernsteuerstand	74
Abbildung 58	Abbildung Mobilfunk Vodafone am 22.02.2024.....	75
Abbildung 59	Technologieverteilung 22.02.2024	75
Abbildung 60:	Signalstärke, Signalqualität und Latenz am Punkt 51° 28' 30.065" N 006° 48' 33.71" O	76
Abbildung 61:	Skizzierung der Aufteilung des FernBin AP 6300	78
Abbildung 62:	Relevante Situation für die Kommunikation von der Leitstelle.....	78
Abbildung 63:	Kommunikationsweg vom Eigenschiff zu Fremdschiffen	79
Abbildung 64	Softwarearchitektur und Schnittstellen der Leitstelle (IN-Anteile).....	80
Abbildung 65	Software der Leitstelle: Verkehrslageanzeige DTS	81
Abbildung 66	Software der Leitstelle: Simulationsumgebung VNE	82
Abbildung 67	Schematische Darstellung der GeoJSON-Attribut-Schnittstelle	83
68	Zusammengefasst erfolgt die Kodierung der topografischen Daten in einer GeoJSON- Struktur, die dann per REST-Patch-Kommando in die VTS-Datenbank (OMD) eingetragen wird. Die Daten werden über Track-Attribute verwaltet, die Darstellung auf dem Traffic Display DTS wird über Display-Filterregeln gesteuert (siehe [inDTS-UM]).....	83
Abbildung 69	Mit GeoJSON erzeugte Linie wird in der inDTS dargestellt	84
Abbildung 70	Beispiele für verschiedene einfache GeoJSON-Objekte.....	85
Abbildung 71	Darstellung einer extern generierten Solltrajektorie (schwarze Linie).....	86
Abbildung 72	Beispieldarstellung eines prädizierten Begegnungspunktes.....	86
Abbildung 73	Schematische Darstellung der TAS-Attribut-Schnittstelle	87
Abbildung 74	Signalisierung eines Alarms in der inDTS	88
Abbildung 75	die inDTS Traffic Event List zeigt einen neuen aktiven Alarm	88
Abbildung 76	Darstellung des vorherigen Beispiels mit Wegpunktdaten.....	89
Abbildung 77	Exemplarische Routenplanung auf der Elbe	90
Abbildung 78	Kartenanzeige der Navigationslösung mit Kamerabildern. Rot: GNSS- Messdaten, Grün: Schiffposition aus dem Navigationsfilter.	92
Abbildung 79	Startseite des FernBin-Dashboards	92
Abbildung 80	Benutzerschnittstelle des Dashboards am Steuerstand.....	93
Abbildung 81:	Informationsfenster aus der Verkehrssimulation	94
Abbildung 82:	Kumulativer Streckenfehler zwischen „Live“-Daten und Simulation im Verlauf der Entwicklung des Simulators.....	95
Abbildung 83:	Unterschied im Ablauf zwischen „klassischer“ Verkehrssimulation und mikroVon Kaskade	96
Abbildung 84:	Skizzierung des Ablaufs der kaskadierten Berechnungsläufe mit aktualisierten Verkehrsdaten.....	97
Abbildung 85:	Skizzierung der Steigerung der Prognosegüte durch kaskadierte Berechnung mit mikroVonKaskade.....	98

Abbildung 86: Prozessierung der Daten, Prognose des Verkehrsgeschehens und die Anzeige der Ergebnisse	99
Abbildung 87: Skizzierung der Datenpipeline zur Verarbeitung AIS	99
Abbildung 88: Skizze Ablauf Scheduler zur Kaskadierung der Simulationsläufe	100
Abbildung 89: Anzahl verarbeiteter Positionen und erkannter Interaktionen von Schiffen über einen Simulationszeitraum von etwa 15 Stunden und 40 Minuten	101
Abbildung 90: Skizzierung des „Beobachters“ zur Ablage relevanter Daten. Jedes Quadrat mit Pfeil ist eine Schiffsposition aus „Live“-Daten oder einer Simulation	102
Abbildung 91: Redis Schnittstelle für die Verteilung der Ergebnisse aus mikroVon Kaskade	102
Abbildung 92 Rechengebiet	104
Abbildung 93 Hintergrundgitter mit überlappendem Overset-Gitter des Schiffes	105
Abbildung 94 Kalibrierung des Druckscheiben-Modells.....	105
Abbildung 95 Geschwindigkeitsfeld in der Mittschiffsebene in m/s	105
Abbildung 96 Druckverteilung in der Mittschiffsebene in Pa.....	106
Abbildung 97 Gitterstudie und Vergleich mit experimentellen Daten aus dem SIMMAN-Workshop 2014	107
Abbildung 98 Validierungsstudie der Verläufe von Absenkung Δz (oben) und Trimm θ (unten) während eines Überholvorgangs mit einem normierten Abstand von $d/B = 1.5$	107
Abbildung 99 Validierungsstudie der normierten hydrodynamischen Längskraft X' (oben), Querkraft Y' (Mitte) und des Giermoments N' (unten) bei einem Überholvorgang zwischen zwei Schiffen mit einem normierten Abstand von $d/B = 1.5$	108
Abbildung 100 Erweitertes Rechengebiet für die Simulation der Überholvorgänge	109
Abbildung 101 Druckverteilung an drei unterschiedlichen Zeitpunkten eines Überholvorgangs mit einem dimensionslosen Abstand von $d/B = 1,5$	110
Abbildung 102 Verläufe der dimensionslosen Längskraft (oben), Querkraft (Mitte) sowie des Giermoments (unten) auf das überholte Schiff im Tiefwasser ($h/T = 4$) für unterschiedliche normierte Abstände d/B	111
Abbildung 103 Koordinatensystem auf dem Eigenschiff beim Überholen	113
Abbildung 104 Nachstromziffern für die Schiffe M2158B (Testschiff) und M2051 (Vergleichsschiff aus der Literatur nach Friedhoff et al. 2019).....	117
Abbildung 105 Kräfte und Momente bei einem gefesselten Ruderversuch. In blau die experimentellen Messungen (EFD) und in orange die RANS-Berechnungen mit dem Reynold-Stress-Turbulenzmodell (CFD)	120
Abbildung 106 Vergleich der numerischen Schrägschleppversuche mit Modellversuchen bei $h/T = 1,43$	121
Abbildung 107 Ergebnisse der numerischen Schrägschleppversuche bei verschiedenen h/T	121
Abbildung 108: Ergebnisse der numerischen Ruderversuche bei verschiedenen Wassertiefen	122
Abbildung 109 Zusatzmassen und Zusatzträgheitsmomente	122
Abbildung 110 Simulation von 35 °-Drehkreismanövern bei verschiedenen Wassertiefen mit dem reinen Abkowitz-Modell („model 1“) und dem Flachwassermodell („model 2“).....	124
Abbildung 111 Simulation von 20/10 Zick-Zack-Manövern bei verschiedenen Wassertiefen mit dem reinen Abkowitz-Modell („model 1“) und dem Flachwassermodell („model 2“).....	125
Abbildung 112 Interaktionskräfte und -momente bei verschiedenen seitlichen Abständen. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffs ist auf 0,71 m/s festgelegt. Das Zielschiff überholt das eigene Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit und bei	

verschiedenen seitlichen Abständen von 1,5, 2,0, 3,0 und 6,0. Das Überholen erfolgt in tiefem Wasser mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von 4,0.....	126
Abbildung 113 Interaktionskräfte und -momente bei verschiedenen Wassertiefen. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffs ist auf 0,71 m/s festgelegt. Das Fremdschiff überholt das eigene Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit und bei einem normierten seitlichen Abstand von 2,0. Das Überholen erfolgt bei verschiedenen Verhältnissen von Wassertiefe zu Tiefgang von 1,43, 1,79, 2,00 und 4,00.....	127
Abbildung 114 Ablaufschema der indirekten Systemidentifikation	128
Abbildung 115 Bahnverlauf des KVLCC2 während eines 35 °/35 ° Zick-Zack-Manöver.....	130
Abbildung 116 KVLCC2. Drehkreismanöver $\delta = 35^\circ$ nach Backbord.....	132
Abbildung 117 Digitaler Zwilling in virtueller Testumgebung.....	133
Abbildung 118 Schematische Darstellung eines AIS-Loggers	134
Abbildung 119 Abdeckung des Rheins mit AIS-Loggern.....	135
Abbildung 120 Beispiel der Verhaltensvorhersage basierend auf einem lokal gültigen Bewegungsmodell	136
Abbildung 121 Längen-(links) und Breiten-(rechts) Fehler (links) und longitudinale (rechts) Fehler für Kombinationen aus Modell plus Transitionswahrscheinlichkeiten	136
Abbildung 122 Unterteilung der Fahrrinne in mehrere Abschnitte zwischen den Hektometersteinen (rote Kreise) (oben), b) Verteilung der Trajektorien über verschiedene Regionen.....	137
Abbildung 123 Vorhersagen der Modelle und des neuen Ansatzes (Modell + Bayes) (links), b) Fehler der Vorhersage von i) Modell ii) Bayes iii) Fusioniertes (Modell + Bayes) Ansätze	138
Abbildung 124 links: Vorhersagegenauigkeit der Modelle; recht: POD-Ergebnis für Ansatz 1	138
Abbildung 125 Koordinatensystem für die Simulation von Schiffsmanövern auf Flüssen	140
Abbildung 126 Positionsmessung am Bug.....	140
Abbildung 127 Ausschnitt einer aufgezeichneten Trajektorie der Ernst Kramer auf dem Rhein	141
Abbildung 128 Vergleich zwischen gemessenem (rot) und mittels Neuronalem Netzwerk approximiertem Ruderwinkel (schwarz).....	142
Abbildung 129 Flussmittellinie und Koordinaten. Diese Abbildung veranschaulicht die Flussmittellinie, die durch die blaue Linie dargestellt wird und als Bezugspunkt für die Schiffspositionierung dient. Darüber hinaus wird die s-Richtung entlang der Flussmittellinie sowie die x-Richtung hervorgehoben, die den senkrechten Abstand des Schiffs von der Flussmittellinie repräsentiert.	143
Abbildung 130 Vorhergesagte Schiffsbewegungen und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für Gruppe „1d“. Die Unterdiagramme (a1-a4) zeigen die PDFs der vorhergesagten Schiffspositionen an vier verschiedenen Flusspositionen entlang des Rheins: 751,3 km, 751,6 km, 751,9 km und 752,4 km. Diese veranschaulichen die Verteilung der vorhergesagten Schiffspositionen basierend auf den σ - und μ -Werten. Das Unterdiagramm (b) zeigt den Vergleich zwischen der vorhergesagten Schiffsroute und der tatsächlichen Route, die aus den AIS-Daten gewonnen wurde. Schließlich zeigt das Unterdiagramm (c) die Differenz zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen x-Positionen der Schiffe und hebt Abweichungen zwischen den Modellvorhersagen und den realen Beobachtungen hervor.....	145

Abbildung 131	Vorhergesagte Schiffsbewegungen und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für Gruppe „2u“. Die Unterdiagramme (a1-a4) zeigen die PDFs der vorhergesagten Schiffspositionen an vier verschiedenen Flusspositionen entlang des Rheins: 751,3 km, 751,6 km, 751,9 km und 752,4 km. Unterdiagramm b) zeigt den Vergleich zwischen der vorhergesagten Schiffsroute und der tatsächlichen Route, die aus den AIS-Daten gewonnen wurde. Schließlich zeigt Unterdiagramm c) die Differenz zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen x-Positionen der Schiffe und hebt Abweichungen zwischen den Modellvorhersagen und den realen Beobachtungen hervor.	146
Abbildung 132	Typische Routen nach Fahrtrichtung zwischen Rhein-km 598 und 603 (ca.) (rot: Bergfahrt, grün: Talfahrt). Kartendaten unterliegen dem Urheberrecht von OpenStreetMap-Mitwirkenden und sind unter https://www.openstreetmap.org verfügbar, die Kartenkacheln stammen von CartoDB und sind unter CC-BY-3.0 lizenziert.	147
Abbildung 133	Wasserstraßenkilometerdifferenz pro Minute in der Bergfahrt - Donau-km 2279-2285	148
Abbildung 134	Fließgeschwindigkeiten nahe Isarmündung (© L. Backhaus).....	148
Abbildung 135	Verteilung des Abstands von der Fahrrinnenmitte am Rhein-km 606,1 (Bergfahrt).....	149
Abbildung 136	Verteilungen des Abstands von der Fahrrinnenmitte zwischen Rhein-km 598,5 und 608,5.....	150
Abbildung 137	Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 1000 m ³ /s (Rhein-km 606).	151
Abbildung 138	Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 1750 m ³ /s (Rhein-km 606).	151
Abbildung 139	Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 2250 m ³ /s (Rhein-km 606).	151
Abbildung 140:	Möglichkeiten der Definition der longitudinalen und lateralen Fortbewegung eines Schiffes (vgl. [DONA2023]).....	153
Abbildung 141	Vergleich des Vorhersagefehlers verschiedener Trajektorienprognosenmodellvarianten für zu Berg fahrende Schiffe auf dem Rhein (WWKM 556-562, 570-579, 598-608).....	153
Abbildung 142	Beispiel einer Verkehrssituation um Zielschiff (grün) zum Zeitpunkt t_1 (oben) und t_{obs} (unten). Die Zellenanzahl ist zu Visualisierungszwecken geringgehalten.	155
Abbildung 143	Visualisierung der vom STT-R-CSCT Modell den Umgebungsschiffen pro Beobachtungszeitschritt (t_{obs}) zugeteilten Gewichten und Trajektorienprognose von R-CSCT (blau) und STT-R-CSCT (dunkelgrün). Gestrichelte Linien repräsentieren aktuelle Modelleingaben (bzw. Ausgaben unten rechts) für das Zielschiff (hellgrün) und die Umgebungsschiffe (gelb/grau). Die Größe der Kreise ist proportional zum Gewicht. Kartenkacheln von CartoDB unter CC-BY-3.0, Kartendaten von OpenStreetMap.	156
Abbildung 144:	Vergleich des Vorhersagefehlers über den Vorhersagezeitraum von vorgeschlagenen Modellen und state-of-the-art Modellen.	157
Abbildung 145:	Vorhersage pro Modellvariante mit Unsicherheit. Grün: Eingabe und Zielausgabe, rot: finale Trajektorienprognose, beige: mittels MC Dropout erhaltene Trajektorienprognosen. Kartendaten unterliegen dem Urheberrecht	

von OpenStreetMap-Mitwirkenden und sind unter https://www.openstreetmap.org verfügbar.....	158
Abbildung 146 Entwicklung der Unsicherheit über den Vorhersagezeitraum hinweg. N-CSCT (Danube) bezeichnet ein für die Donau trainierte N-CSCT.	159
Abbildung 147 ATE pro ATU Intervall.	160
Abbildung 148 Sensor und Rechenhardware in RWTH-Navigationslösung [RWTH1]	161
Abbildung 149 Überblick der Navigationslösung.....	162
Abbildung 150 Flussdiagramm der Softwareimplementierung des IRT-Navigationsfilters	163
Abbildung 151 Wirkungsplan des IRT-Navigationsfilters	163
Abbildung 152 2-D Lokalisierungsfehler des Hybrid-Navigationsfilters	164
Abbildung 153 Entwickelter Faktor-Graph Ansatz.....	165
Abbildung 154 Optimierungsbasierte Navigationslösung.....	165
Abbildung 155 Schiffstrajektorien mit unterschiedlichen Algorithmen.....	166
Abbildung 156 Schiffstrajektorien mit unterschiedlichen Algorithmen.....	166
Abbildung 157 Route der Messfahrt	166
Abbildung 158 Versuchsträger mit den Sensoren im Dortmund-Ems-Kanal.....	166
Abbildung 159 Konzept der neuartigen Deep-Learning-basierten Integritätsprüfung.....	167
Abbildung 160 Die Architektur des entwickelten neuronalen Netzes.....	168
Abbildung 161 Testergebnis zur Klassifizierung der fehlerbehafteten GNSS-Beobachtungen mittels der lern-basierten Methode zur Integritätsprüfung.	168
Abbildung 162: Schema zur Bewertung wasserstraßen-bezogener Kriterien	170
Abbildung 163: Musterhafte Bewertung einer Testsituation.....	172
Abbildung 164: Darstellung von prognostizierten Begegnungspunkten mit farbcodierter Einstufung der Sicherheit und Leichtigkeit (Hintergrundkarte: DOP-DE)	172
Abbildung 165: Farbcodierte prognostizierte nächste Interaktionen des Eigenschiffs	173
Abbildung 166 Simulator mit Bahnführung und Online-Trajektorienplanung.....	174
Abbildung 167 Erweiterte Schnittstelle im ECDIS.....	174
Abbildung 168 Anzeige der Navigationsdaten im Fernsteuerstand	175
Abbildung 169 Testszenario für Trajektorienfolgeregelung. Das eigene Schiff (blau) weicht einer geplanten Trajektorie (rot) aus, um eine Kollision mit dem Hindernis (grau) zu vermeiden.	176
Abbildung 170 Struktur der Simulationsumgebung für Tests und Validierung der Trajektorienplanungsmethoden	179
Abbildung 171 Simulationsszenario für Trajektorienplanungsmodul.....	179
Abbildung 172 Sicherheitskorridore mit Hindernis	180
Abbildung 173 Werkzeug zur Bearbeitung von Leitlinien.....	181
Abbildung 174 Modul zur Routenplanung.....	181
Abbildung 175 Wasserstands- und tiefgangsabhängige Routenplanung.....	182
Abbildung 176 Berechnung der Ankunftszeit	182
Abbildung 177 Drei-Ebenen-Modell der integrierten Operationsaufgaben eines Schiffsführers, angelehnt an [RHED2017]	184
Abbildung 178 Benutzeroberfläche des BAM-Systems.....	186
Abbildung 179 Alarmkonfigurator des BAM-Systems.....	186
Abbildung 180 Kommunikation von Alerts veralteter Alert-Quellen in Anlehnung an IEC 61924-2.....	187
Abbildung 181 Kommunikation von Alerts am Fernsteuerstand.....	188

Abbildung 182	Beispiel für die Beschreibung eines komplexen Interaktionsgeschehens bzw. eines sich entwickelnden Verkehrsszenarios mittels der Situation-Operator-Modellbildung (SOM).....	193
Abbildung 183	Ausschnitt eines Handlungsraums für ein Wendemanöver als Beispiel.....	194
Abbildung 184	Ereignisdiskrete Generierung sowie Regelung von Situationen zur Erkennung von Konflikten und Warnungen [Bej2023]	197
Abbildung 185	Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein [Bej2022b].....	198
Abbildung 186	Ergebnis der wissensbasierten Analyse für Time to closest point of approach (TCPA)	198
Abbildung 187	Darstellung der kontinuierlichen Verhaltensplanung [2].....	199
Abbildung 188	Anfangssituation und Zwischenziele des Fahrmanövers Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein.	200
Abbildung 189	Anwendung der Methode der Verhaltensplanung auf das Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ [Bej2023]	201
Abbildung 190	Planung eines ereignis-diskreten Handlungsraums angewandt auf das Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein.....	202
Abbildung 191	Planung situierter Handlungsräume angewandt auf das Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein.....	202
Abbildung 192	Allgemeine Übersicht über die Funktionsweise des Notfallmanagements	208
Abbildung 193	Initialsituation des Datensatzes (Ego-Schiff in blau, weißes Schiff im Rhein, grünes Schiff im Vinckekanal) [Bej2024].....	211
Abbildung 194	Beschreibung der auftretenden Warnung aufgrund des geringen Abstandes von dem Ego-Schiff (blau) zu dem Schiff im Rhein (weiß) [Bej2024]	211
Abbildung 195	Resultierender Handlungsraum aufgrund der Warnung (vgl. Abbildung 15 [Bej2024])	212
Abbildung 196	Beschreibung der auftretenden Warnung wegen des Unterschreitens des Warnwerts $TCPA_w$ (siehe Tabelle zwischen dem Ego-Schiff (blau) und dem grünen Schiff im Rhein [6]).....	213
Abbildung 197	Berechnung des neuen Handlungsraumes aufgrund der Warnung in Abbildung und Aktualisierung des Handlungsraums in Abbildung 197 [Bej2024].....	214
Abbildung 198	Erreichen der Endsituation durch die Zusammensetzung aus den optimalen Handlungssequenzen in den Handlungsräumen in und Abbildung 16 und Abbildung 18 unter Berücksichtigung der Aktualisierung ersten optimalen Handlungssequenz [Bej2024]	214
Abbildung 199	Fahrbereich auf dem Duisburger Vinckekanal bei der Realfahrt-Probandenstudie	216
Abbildung 200	Subjektives Kontrollgefühl nach Bildauflösung	220
Abbildung 201	Anteil der als sicher bewerteten Fahrt nach Bildrate.....	220
Abbildung 202:	Drohnenaufnahme der Ernst Kramer im niederländischen Testgebiet am 07.07.2024.....	222
Abbildung 203:	Beobachtete Begegnung der Ernst Kramer mit einem anderen Schiff am 13.07.2023 auf dem Wesel-Datteln-Kanal (Hintergrundkarte: TopPlusOpen).....	222
Abbildung 204	Übersichtsdarstellung LiDAR-Bilder.....	224
Abbildung 205	225	
Abbildung 206	226	
Abbildung 207	227	
Abbildung 208:	LiDAR-Bilder vom Heck vor Einfahrt in die Schleuse	228
Abbildung 209	229	

Abbildung 210 Beschleunigungs- und Verzögerungsphase während der Versuche	231
Abbildung 211 Ideale Trajektorien von Drehkreismanövern mit Ruderlage nach STB und BB	231
Abbildung 212 Zick-Zack Manöver. δT stellt den Ruderwinkel und ψT den Kurswinkel dar.....	232
Abbildung 213 Propulsionsversuch.....	232
Abbildung 214 R-Manöver (Ruderwinkel δT und Drehrate rR).....	233
Abbildung 215 Position des Bugstrahruders am Schiff und Schubrichtung β	233
Abbildung 216 Echtzeitanzeige der Messdaten	235
Abbildung 217 Vergleich zwischen Großausführungsmessung und Manöverberechnung für ein Drehkreismanöver mit 45 ° Ruderwinkel. Links: Normierte Bahn des Schiffes; rechts oben: Normierte Voraugeschwindigkeit über normierte Zeit; rechts unten: Normierte Drehrate über normierte Zeit	236
Abbildung 218 Vergleich zwischen Simulation und Messung für 35/10 Zick-Zack-Manöver nach Steuerbord (alle Größen normiert). Links oben: Bahn; links unten: Ruder- und Kurswinkel; rechts oben: Voraugeschwindigkeit; rechts, 2. v. oben: Quergeschwindigkeit; rechts, 3. v. oben: Drehrate; rechts unten: Driftwinkel	237
Abbildung 219 Testfahrt bei der Nationalen Maritimen Konferenz 2023.....	238

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen Fernsteuerstand	13
Tabelle 2: Untersuchte Übertragungsverfahren nach physikalischem Übertragungsweg	28
Tabelle 3: Vergleich der Datenrate und maximaler Ausdehnung der Übertragungsverfahren	28
Tabelle 4: Übersicht der montierten Hardware	32
Tabelle 5: Übersicht der Festlegung von Datenaustauschformate und die Bereitstellung	43
Tabelle 6 Beschreibung der Strömungsdaten, jeder Datenpunkt enthält folgende Informationen	49
Tabelle 7: Bedien- und Anzeigeelemente je Steuerstand-Bildschirm	72
Tabelle 8: Verwendung von Daten in einer „klassischen Verkehrssimulation und in mikroVon	96
Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse der Gitterstudie mit den Experimenten aus dem SIMMAN- Workshop 2014	106
Tabelle 10 Daten aus Modellversuchen	117
Tabelle 11 Nachstromziffern für verschiedene Wassertiefen	118
Tabelle 12: Ergebnisse eines Drehkreis-Manövers mit einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ und einem Abbruchkriterium von 720° für das reine und das kombinierte Manövriermodell	119
Tabelle 13: Ergebnisse eines Zick-Zack-Manövers mit einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ und einer Kurswinkeländerung von $\psi = 35^\circ$ für das reine und das kombinierte Manövriermodell	119
Tabelle 14 Ergebnisse der Simulation ($\delta = 40$)	120
Tabelle 15: Hydrodynamische Koeffizienten [$\times 10^{-5}$] für das Testschiff für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Wassertiefe und Tiefgang (h/T)	123
Tabelle 16: Flachwasserkoeffizienten für das Testschiff Ernst Kramer	124
Tabelle 17: Benötigte Daten für die indirekte Systemidentifikation	129
Tabelle 18: Hydrodynamische Koeffizienten des KVLCC2. Alle Koeffizienten sind dimensionslos und wurden mit 10^3 multipliziert werden.	130
Tabelle 19: Hydrodynamische Koeffizienten des KVLCC2, die durch die indirekte Systemidentifikation berechnet wurden. Koeffizienten aus der Literatur (Spalte Input), Lineare Korrelation zu linearer Regression (Spalte Linear) und Ridge- to-Ridge-Regression (Spalte Ridge v1: Version 1, Spalte Ridge v2: Version 2). Koeffizienten multipliziert mit 10^3	131
Tabelle 20: Sechs unterschiedliche Gruppen, die sich aus der Kombination von Länge und Fahrtrichtung ergeben	143
Tabelle 21: Auflösung und Diskretisierungsfehler unterschiedlicher Referenzsysteme zur Definition der lateralen und longitudinalen Fortbewegung eines Schiffes.	153
Tabelle 22: Liste der Merkmale in einem Situationsvektor	196
Tabelle 23: Liste der vordefinierten Operatoren	196
Tabelle 24: Region der zu visualisierende Fahrtrajektorien	197
Tabelle 25: Fehlermeldung bzgl. des erlaubten Fahrbereichs	203
Tabelle 26: Warnhinweise beim Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit	203
Tabelle 27: Warnungen & Konflikte bzgl. TCPA (Time to closest point of approach)	203
Tabelle 28: Warnungen & Konflikte bzgl. des euklidischen Abstands zu anderen Schiffen	204
Tabelle 29: Warnungen & Konflikte bzgl. des longitudinalen Abstands Δx zum Vorausfahrenden Schiff	207
Tabelle 30: Warnungen & Konflikte bzgl. des seitlichen Abstands Δy zum Vorausfahrenden Schiff)	207
Tabelle 31: Warnungen & Konflikte bzgl. TTC (Time to collision)	208

Tabelle 32: Warn- und Konfliktwerte (Fall stromabwärtsfahrende Schiffe) [Bej2024].....	210
Tabelle 33: Warn- und Konfliktwerte (Fall stromaufwärtsfahrende Schiffe) [Bej2024]	210
Tabelle 34 Zuverlässigkeitsanalyse der Handlungssequenzen in Abbildung 16 [Bej2024].....	212
Tabelle 35: Zuverlässigkeitsanalyse der Handlungssequenzen in Abbildung 18 [Bej2024].....	214
Tabelle 36: Überblick über die Qualitätsabstufungen der Kameraaufnahmen.....	219
Tabelle 37 Übersicht über die geplanten Versuchsarten. Die ersten vier Versuchsarten haben eine erhöhte Priorität	230
Tabelle 38 Übersicht über die Drehkreismanöver.....	231

Teil I: Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt FernBin befasst sich mit der Entwicklung und Erprobung eines zukunftsweisenden Ansatzes zur Fernsteuerung von Binnenschiffen, um auf den wachsenden Fachkräftemangel in der Binnenschifffahrt zu reagieren und innovative Logistikkonzepte zu fördern. Ziel des Projekts ist es, ein System zu schaffen, das es ermöglicht, Schiffe von einem Fernsteuerstand an Land zu steuern. Dabei sollen die Transportleistung und Verkehrssicherheit, wie sie bei konventionell von Bord gesteuerten Schiffen erreicht wird, auch bei ferngesteuerten Einheiten gewährleistet werden.

Zentrale Aufgaben des Projekts sind:

1. **Technische Entwicklung:** Die Konzeption und Implementierung der erforderlichen technischen Ansätze, wie Sensoren, Aktoren und Schnittstellen zur Steuerung der Schiffe, stehen im Vordergrund. Dazu gehört der Aufbau eines Fernsteuerstandes an Land sowie die Entwicklung eines robusten Datenprotokolls zur sicheren Übertragung der Steuerdaten.
2. **Assistenzsysteme:** Parallel zur Fernsteuerung sollen Assistenzsysteme wie Bahnführung und Kollisionswarnung entwickelt werden, die den Schiffsführer unterstützen. Ein adaptives Navigationssystem wird hierbei in Echtzeit auf den Verkehr reagieren, den Raumbedarf bei Begegnungen prognostizieren und den Schiffsführer durch Visualisierung möglicher Fahrmanöver unterstützen.
3. **Verkehrsprognose:** Die Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage des Fahrverhaltens anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere auf fließenden Gewässern, ist ein weiterer Schwerpunkt. Hierbei werden die Manövriereigenschaften der ferngesteuerten Schiffe sowie das Verhalten anderer Schiffe einbezogen, um eine sichere Navigation zu gewährleisten.
4. **Leitstellenkonzept:** Aufbauend auf diesen Entwicklungen soll eine zentrale Leitstelle eingerichtet werden, die umfassende Verkehrsinformationen sammelt, analysiert und Operatoren ermöglicht, bei Bedarf einzugreifen. Diese Leitstelle wird zudem als Plattform für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern fungieren.
5. **Langfristige Perspektive:** Die im Rahmen von FernBin entwickelten Technologien stellen einen Zwischenschritt auf dem Weg zum vollständig automatisierten Binnenschiff dar. In zukünftigen, autonom fahrenden Schiffen könnten die Fernsteuerfunktionen als Rückfallebene dienen und von einer Notfallzentrale bei kritischen Situationen aktiviert werden.

Insgesamt soll FernBin den Grundstein für eine moderne, effizientere und umweltfreundlichere Binnenschifffahrt legen, in der der Einsatz von Fernsteuerung und Automatisierung dazu beiträgt, den Personalmangel zu beheben und gleichzeitig neue Potenziale für die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Wasserstraße zu erschließen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt FernBin wurde vor dem Hintergrund des zunehmenden Mangels an qualifiziertem nautischem Personal, insbesondere Schiffsführern, sowie des Güterstruktureffekts ins Leben gerufen. Der Bedarf an innovativen Lösungen für die Binnenschifffahrt ist stark gewachsen. Eine vielversprechende Antwort darauf bietet die Fernsteuerung von Schiffen, bei der der Schiffsführer nicht mehr von Bord, sondern von einem festen Standort an Land aus operiert. Dies macht den Arbeitsplatz attraktiver und könnte den Personalengpass mildern.

Darüber hinaus eröffnet die Fernsteuerung die Möglichkeit, dass ein Schiffsführer, unterstützt durch Assistenzsysteme, mehrere Schiffe gleichzeitig überwachen und steuern kann. Zudem könnte eine Leitstelle eingerichtet werden, die umfassende Informationen über den Wasserstraßenverkehr sammelt und koordiniert. Die Einrichtung einer solchen Leitstelle bietet neue Möglichkeiten, den Verkehr effizienter und sicherer zu gestalten.

Das Projekt konnte auf die von Nordrhein-Westfalen bereitgestellte Infrastruktur des „Versuchs- und Leitzentrums Autonome Binnenschiffe“ (VeLABi) zurückgreifen, dass ab Oktober 2019 implementiert und bis März 2020 fertiggestellt wurde. Diese Infrastruktur bildete eine wesentliche Voraussetzung für den Start des Vorhabens und ermöglichte eine effiziente Nutzung der bereitgestellten Forschungsmittel.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt FernBin wurde von den Partnern DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (Koordinator), Argonics GmbH, Argonav GmbH, Bundesanstalt für Wasserbau, Ingenieurbüro Kauppert, in – innovative navigation GmbH, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen (Institut für Regelungstechnik), Universität Duisburg Essen (Institut für Schiffbau, Meerestechnik und Transportsysteme, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik und Lehrstuhl für Mechatronik und Systemdynamik) durchgeführt.

Das Projekt wurde in mehrere Arbeitspakete unterteilt, die zeitlich und inhaltlich strukturiert sind. Der Ablauf des Projekts wurde mithilfe eines detaillierten Verbundbalkenplans organisiert, der die einzelnen Arbeitspakete und deren Unterarbeitspakete abbildet. Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg sind sechs Meilensteine definiert, die den Fortschritt und Erfolg der Projektphasen sicherstellen.

Die Meilensteine im Einzelnen:

- **MS 1:** Zu Beginn des Projekts lagen alle Förderbescheide vor. Ein Kick-Off-Meeting wurde durchgeführt, in dem die Arbeitsplanung für das gesamte Projekt sowie für die nächsten 3-4 Monate im Konsortium detailliert abgestimmt wurde.
- **MS 2:** Die erste Version der Testspezifikation (Version 1.0) wurde geliefert, einschließlich Testplanung, Erwartungen, Kriterien für das Bestehen der Tests und Definition der Abschlusszenarien.
- **MS 3:** Das Testschiff wurde technisch ausgerüstet, um Navigations- und Bewegungsdaten zu erfassen. Erste Testfahrten wurden durchgeführt, die Daten aufgezeichnet und aufbereitet. Diese Daten dienen als Grundlage für die Modellierung und Entwicklung von Algorithmen. Ein Referenzdatensatz wurde erstellt, um spätere Entwicklungen damit vergleichen zu können.
- **MS 4:** Das Navigationsfilter wurde inklusive Integritätsalgorithmen erfolgreich integriert und an das Sensorsystem angepasst. Die korrekte Funktionsweise wurde nachgewiesen. Die Trajektorien des Schiffes können nun unter Berücksichtigung von Strömungs-, Wind- und Antriebsdaten präzisiert werden, und das Verhalten des Schiffes wird mithilfe von reduzierten Modellen dargestellt.
- **MS 5:** Die Online-Trajektorienoptimierung wurde auf dem Schiff implementiert und erfolgreich getestet.
- **MS 6:** Das Projekt wurde abgeschlossen, und der Abschlussbericht, der die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammenfasst, ist erstellt.

Diese strukturierte Planung und die klar definierten Meilensteine halfen, das Projekt zielgerichtet voranzutreiben und eine effiziente Zusammenarbeit der verschiedenen Projektpartner zu gewährleisten.

Projektstrukturplan FernBin

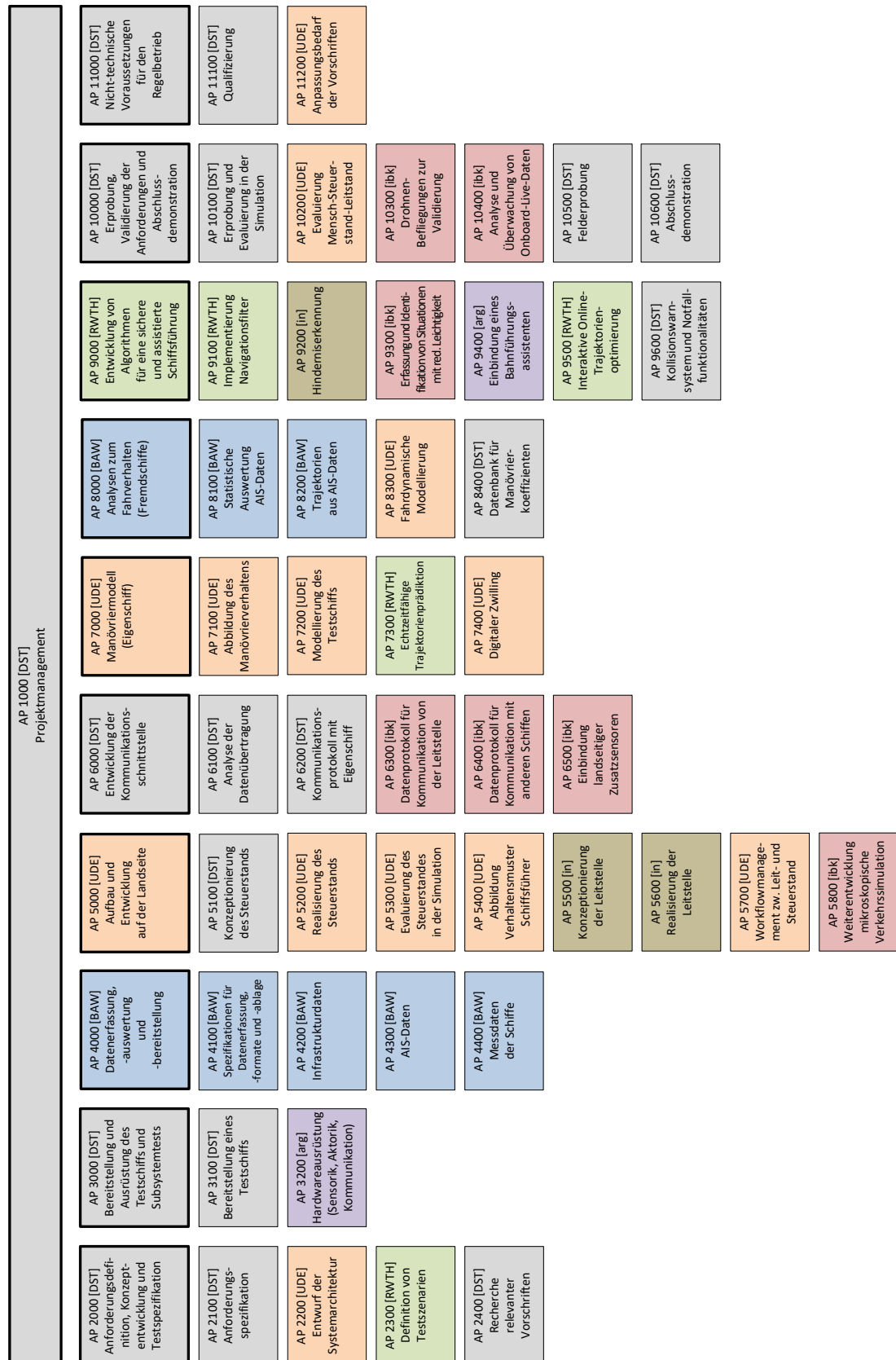


Abbildung 1 Projektstrukturplan für das Projekt FernBin

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan mit allen Arbeitspaketen und den zugehörigen verantwortlichen Projektpartnern. Bei der Bearbeitung des Projekts waren in vielen Unterarbeitspaketen mehrere Projektpartner mit ihren individuellen Kompetenzen aktiv, weshalb dieser Bericht auch von allen Projektpartnern für die Gesamtprojekt erstellt wurde. Im Bericht wird teilweise auf die Nummern der Unterarbeitspakete Bezug genommen.

4 Wissenschaftlicher und technischer Forschungsstand zu Projektbeginn

4.1 Ausrüstungsstand der Binnenschiffe

Der Ausrüstungsstand der Binnenschiffe variiert sehr stark. Zum Mindestausrüstungsstandard für die Navigation gehören Radar, ECDIS, GPS, Echolot, Wendegeschwindigkeitsanzeiger und AIS. Zunehmend finden verschiedene Assistenzsysteme (z. B. argoTrackPilot) Anwendung. Der Integrationsgrad der Navigationsgeräte variiert ebenfalls sehr stark. Ausgehend von jeweils einzelnen Geräten werden die Navigationsfunktionen zunehmend in komplexeren Systemen (z. B. RADARPilot720°) zusammengeführt. Durch die Integration der Navigationsfunktionen können Kosten eingespart und die Ergonomie verbessert werden.

Die Aktoren der Propulsions- und Manövrierorgane werden auf allen modernen Binnenschiffen elektrisch angesteuert. Außerdem verfügen sie über elektrische Sensoren zur Zustandsüberwachung. Die Steuerung der anderen Bordsysteme kann ebenfalls als integriertes System ausgeführt sein. Vielfach werden die verschiedenen Bordsysteme aber noch über einzelne Bedienelemente gesteuert.

Der Ausrüstungsstand des im Projekt eingesetzten Testschiffs war im Vorhinein nicht bekannt. Dementsprechend mussten die Schnittstelle zwischen Bordsystemen und Fernsteuerung konfigurierbar sein.

4.2 Stand der Wissenschaft und Technik mit Bezug zum Projektthema

Im Bereich der Automatisierung der Navigation wohl in der See- und der Binnenschifffahrt gab und gibt es eine Reihe von Forschungsprojekten. In Hinblick auf die Fernsteuerung gab es deutlich weniger Forschung.

Der Einsatz von Schleppschiffen bei An- und Ablegemanövern großer Schiffe in Hafenarealen wurde im Projekt FernSAMS durch eine Fernsteuerung kosten- und zeiteffizienter gestaltet werden. Neben dem Entwurf und der Inbetriebnahme eines geeigneten Sensorkonzepts, eines störungssicheren Kommunikationsverfahrens und einer neuartigen Steuerkonsole wird ein Schwerpunkt insbesondere auf die Besonderheiten von Schleppschiffen gelegt. So werden die Anforderungen an die Steuerkonsole in Hinblick auf typische Schleppmanöver festgelegt und eine automatische Leinenübergabe untersucht.

DNV-GL entwickelte 2014 das batteriebetriebene Schiffskonzept ReVolt, das ohne jegliche Besatzung auf offener See, vorrangig jedoch in Küstennähe, navigieren kann und auf den Einsatz für Warentransporte auf Kurzstrecken zielt. Um dieses Ziel zu erreichen, soll sowohl eine Fernsteuerung als auch eine Automatisierung des Schiffes entwickelt und je nach Bedarf und technischem Stand eingesetzt werden. Im kleinen Maßstab wurden die Machbarkeit einer Fernsteuerung und eine Pfadfolgeregelung bereits experimentell gezeigt.

Der Schiffstechnikhersteller Wärtsilä untersucht die ferngesteuerte Steuerung von Hochseeschiffen, die 2017 über eine Distanz von 8.000 km und für verschiedenste Manöver erfolgreich getestet worden ist. Anders als bei der Fernsteuerung von Binnenschiffen im vorliegenden Projekt muss zur Kommunikation zwischen Steuerstand und Schiffen auf hoher See auf eine Satellitenverbindung mit sehr kleinen Übertragungsraten zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund wurde ein besonderer Fokus auf die Auswahl und Übermittlung der zu übertragenden Daten gelegt.

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 VTS-Diensten an Land. Integraler Bestandteil des Projektes war die Schaffung eines Assistenzsystems, das basierend auf ausgetauschten

Schiffsrouten Konfliktsituationen vermeiden sollte und internationale Regeln zur Vermeidung von Kollisionen auf See (Flächenverkehr) sowie die Einbettung in nationale Vorschriften (Linienverkehr) berücksichtigen konnte. Der Schiffsoffizier stand 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 Vorauswahl und Berücksichtigung von Eigenschaften des potentiellen Kollisionsgebietes gelegt. Ebenso wurden PNT-Einheiten als Basistechnik vorausgesetzt und genutzte Sensordaten bewertet. Der Einsatz von Bahnreglern wurde in MTCAS nicht ausgeführt.

Die Ermittlung von robusten PNT-Informationen als fundamentaler Bestandteil der von der International Maritime Organization (IMO) vorgeschlagenen e-Navigation wurde beispielsweise in [1] und [2] aufgegriffen. In diesen Projekten in der Verantwortung des DLR Neustrelitz wurde eine PNT-Einheit für den maritimen Einsatz entwickelt, die bordeigene GNSS-Empfänger, Gyro-Daten und Geschwindigkeitsinformationen einbeziehen konnte. Die maßgeschneiderte Anpassung der Lage- und Bewegungsinformationen mit dem Ziel der geregelten Schiffsführung und Netzwerkkoordination waren nicht Ziel des Vorhabens. Die Einbeziehung explizit von Galileo als ergänzendes System und die robuste Datenfusion auf Satellitenrohdatenebene (Pseudoranges, Dopplerranges, Ephemeriden) standen ebenfalls nicht im Fokus der Arbeiten.

Das Projekt LAESSI befasste sich mit der Entwicklung von Assistenzsystemen zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen. 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 eine Darstellung der Schiffsbewegung und ihrer Einflussfaktoren (Conning-Anzeige) entwickelt.

Das im November 2018 gestartete Förderprojekt SCIPPER hat die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems für die Automatisierung der Schleusenein- und -ausfahrt zum Ziel. Schleusenmanöver stellen für die Binnenschifffahrt im Allgemeinen eine sehr anspruchsvolle Manöversituation dar, was sich allein aus den typischen Abmessungen von Schleusenkammern (12 m) und der Breite von Gütermotorschiffen (11,40 m) erkennen lässt. Mit dem Projekt soll die Sicherheit dieses anspruchsvollen Manövers erhöht werden, was aber nicht zu Lasten der Schleusungsdauer gehen darf, weshalb sogar eine Beschleunigung des Schleusungsvorgangs erreicht werden soll.

Mit dem Hafen von Rotterdam als großes Testfeld entwickelt das DLR in Oberpfaffenhofen zusammen mit der Weatherdock AG ein neues Schiffssignalsystem. Das entsprechende Förderprojekt AIS-Plus entwickelt markt- und produktorientiert das herkömmliche AIS weiter, um auch bei hohem Verkehrsaufkommen und schlechten Übertragungsbedingungen (Daten gehen teilweise verloren) eine zuverlässige Positionsmeldung zu garantieren. Damit soll die Schifffahrt im Allgemeinen sicherer gemacht, aber auch die Küstenüberwachung vervollständigt werden.

Mit der Maritime Connectivity Platform (MCP) soll eine effiziente, sichere, hochverfügbare, elektronische Plattform zum Austausch von Informationen zwischen allen maritimen Beteiligten, die an der Plattform autorisiert sind, zur Verfügung stehen [3]. Die Plattform bietet neben dem Nutzermanagement die Möglichkeit, eigene freie oder kommerzielle Dienste aus den e-navigation oder e-maritime Bereichen einzubinden und bekannt zu machen. Eine wesentliche Aufgabe der Plattform ist die Verteilung von Informationen (Messaging Service) über verschiedene Kommunikationslinks hinweg und dies zusätzlich geo-sensitiv. MCP ist gemeinsam von den EU-Förderprojekten EfficienSea2 und Sea Traffic Management (STM) und dem koreanischen SMART Navigation Projekt entwickelt worden.

Im EU-Projekt MUNIN – Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks wurde die technische Machbarkeit der automatisierten Schiffsführung beim ferngesteuerten Manövrieren durchgeführt, welches die Gelegenheit bot, multiple Bahnvorsagen zu testen und die Rechengeschwindigkeiten zu prüfen.

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.

Im H2020-Projekt NOVIMAR wurden Techniken und Verfahrensabläufe untersucht, um einen virtuellen Schleppverband teilautomatisiert fahren zu lassen.

In dem Projekt SEAFAR wurde in Belgien ein Konzept zum automatisierten, ferngesteuerten Fahren kleiner Schiffe (bis 650 t) auf kleinen Wasserstraßen (Klassen I - III) entwickelt. Dabei sollen die Schiffe von einem landgestützten Steuerstand aus ferngesteuert werden. Ein Testbetrieb soll 2019 beginnen und eine unbemannte Navigation auf Europäischen Wasserwegen in 2024 erreicht werden. In die Entwicklungen von Seafar NV konnte erst zu Projektende Einblick gewonnen werden.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts FernBin spielte die Zusammenarbeit mit verschiedenen assoziierten Partnern eine zentrale Rolle, um die fachliche Expertise und Praxisnähe sicherzustellen. Diese Partner unterstützten das Projekt nicht nur durch ihr spezifisches Wissen, sondern auch durch wertvolle Einblicke in die realen Anforderungen und Abläufe der Binnenschifffahrt.

Die assoziierten Partner des Projekts waren:

- **Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS)**, Bonn: Die GDWS war maßgeblich an der Abstimmung regulatorischer und verkehrstechnischer Rahmenbedingungen beteiligt und stellte sicher, dass die Projektziele im Einklang mit den aktuellen Regularien der Wasserstraßen und der Schifffahrt stehen.
- **Rhenus Partnership**, Duisburg: Als großer Logistikdienstleister brachte Rhenus Einblicke in die Möglichkeiten und Herausforderungen der Integration neuer Technologien in die logistischen Abläufe der Schifffahrt. Rhenus Partnership stellte das Versuchsschiff „**Ernst Kramer**“, das für die praktischen Tests und die Implementierung der Fernsteuerungstechnologie verwendet wurde. Das Schiff wurde umfassend mit modernen Sensoren und Steuerungstechniken ausgerüstet, um die Anforderungen der Fernsteuerung und der Datenübertragung zu erfüllen. Diese technische Ausstattung ermöglichte es, die Funktionen der Fernsteuerung unter realen Bedingungen zu testen und zu verfeinern. Zusätzlich übernahm Rhenus die Bereitstellung der Besatzung sowie der fernsteuernden Schiffsführer. Dies war besonders wichtig, um die Fernsteuerungstechnologie in einem praktischen Kontext zu evaluieren und die Abläufe unter den Bedingungen der Binnenschifffahrt zu simulieren. Die Erfahrung und das Know-how der Besatzung und der Schiffsführer trugen wesentlich zur erfolgreichen Durchführung der Testfahrten und zur Sicherstellung der Funktionalität der neuen Technologien bei. Durch diese umfassende Unterstützung konnte das Projekt FernBin erfolgreich vorangetrieben werden, und die gesammelten Daten sowie die praktischen Erfahrungen trugen maßgeblich zur Weiterentwicklung der Fernsteuerungslösungen bei.

- **Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)**, Straßburg: Die ZKR sorgte für die Einbindung internationaler Regelungen und förderte den Austausch mit anderen europäischen Ländern, was für die Weiterentwicklung der Binnenschifffahrt auf internationaler Ebene von großer Bedeutung war.
- **MSG eG, Würzburg**: Die MSG eG hat dem Konsortium den “**Koppelverband Stadt Würzburg / Mainfranken**” als Messplattform zur Verfügung gestellt. Das Schiff wurde mit einer hochpräzisen GNSS-Antennenanlage ausgestattet. Die so gewonnenen Daten konnten erfolgreich in Datenmodellen und Vorhersageprozeduren verwendet werden.

Die enge Zusammenarbeit mit diesen Partnern gewährleistete, dass das Projekt praxisnah ausgerichtet wurde und gleichzeitig die technischen, logistischen und regulatorischen Herausforderungen der Binnenschifffahrt umfassend berücksichtigt wurden.

Ein Austausch mit Seafar NV, die im März 2024 eine Fernsteuerzentrale in Duisburg eröffnet haben, kam erst kurz vor Projektende zustande.

Teil II: Eingehende Darstellung

6 Einführung

Angeichts aktueller Herausforderungen wie dem Mangel an qualifiziertem nautischem Personal, insbesondere Schiffsführern sowie dem Güterstruktureffekt wächst der Bedarf an innovativen und zukunftsorientierten Lösungen zur Stärkung der Binnenschifffahrt.

Ein Ansatz ist die Fernsteuerung von Schiffen: Dabei steuert der Schiffsführer das Schiff nicht mehr von seinem Steuerstand im Steuerhaus, sondern von einem Fernsteuerstand an Land. Damit kann die Attraktivität des Berufsbilds Binnenschiffskapitän erhöht und mehr Nachwuchskräfte gewonnen werden. Der Schiffsführer arbeitet nicht mehr an Bord, sondern an einem festen Arbeitsort in Wohnortnähe mit familienkompatiblen Arbeitszeiten.

Darüber hinaus soll der Schiffsführer durch eine Reihe von Assistenzsystemen, wie z. B. Bahnregler und Kollisionswarnsystem unterstützt und entlastet werden. Unter Einsatz von leistungsfähigen Assistenzsystemen verschiebt sich die Arbeit vom aktiven Steuern zum Überwachen und es ist denkbar, dass ein Schiffsführer zeitweise mehr als ein Schiff gleichzeitig steuern kann. Denkbar ist auch, dass von einer Reedereizentrale aus viele Schiffe durch eine Gruppe von Schiffsführern fern-gesteuert werden. Dabei wäre nicht nur eine Redundanz vorhanden, falls ein fernsteuernder Schiffsführer unerwartet ausfällt, sondern gleichzeitig könnten auch die Kosten signifikant gesenkt werden.

Diese Ansätze wurden in dem Verbundvorhaben FernBin verfolgt. Dabei wurden alle nötigen Komponenten und Voraussetzungen entwickelt, um mit einem ferngesteuerten Binnenschiff die gleiche Transportleistung und Verkehrssicherheit zu erreichen, wie mit konventionell von Bord gesteuerten Schiffen. Damit können zwei übergeordnete Ziele erreicht werden: Der Fachkräftemangel bei Schiffsführern kann entschärft werden, indem einerseits der Beruf des Schiffsführers für junge Menschen wieder attraktiver wird und andererseits durch den Einsatz von Assistenzsystemen für das Steuern der Schiffe perspektivisch weniger Schiffsführer als Schiffe erforderlich sind. Mit der Fernsteuerung können zudem kleinere Schiffseinheiten wirtschaftlich betrieben werden, mit denen neue Logistikkonzepte realisiert und damit Güterverkehre auf die Wasserstraße verlagert werden können.

In der geplanten „Forschungsstrategie zum automatisierten Fahren in der Binnenschifffahrt“ ist das ferngesteuerte Fahren ein Zwischenschritt auf dem Weg zum automatisierten Fahren. Viele der Techniken und Komponenten, die hier entwickelt werden, kommen später auch auf einem automatisierten Binnenschiff zum Einsatz. Bei einem völlig autonom fahrenden Binnenschiff könnten in Zukunft die Fernsteuerfunktionen als Rückfallebene auch in eine Notfallzentrale verlagert werden, die bei Systemausfällen oder kritischen Situationen manuell eingreifen könnte.

7 Anforderungsdefinition, Konzeptentwicklung und Testspezifikation

7.1 Anforderungsspezifikation

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Anforderungen und technische Spezifikationen entwickelt, um den sicheren und effizienten Betrieb eines Schiffs von einem entfernten Steuerstand aus zu gewährleisten. Das Projektziel ist es, die Aufgaben eines Schiffsführers teilweise oder vollständig aus der Ferne zu steuern, unter Verwendung fortschrittlicher Sensorik und Kamertechnologie, um eine zuverlässige Überwachung und Steuerung des Schiffs in Echtzeit zu ermöglichen.

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern wurde ein Pflichtenheft entwickelt. Dieser Katalog fasst die funktionalen Anforderungen sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Systemkomponenten zusammen. Dazu gehörten insbesondere die erweiterte Sensorik, die Datenerfassung an Bord,

die Übertragung der Daten an Land, die Navigationsplattform, die Assistenzsysteme, der landseitige Kommunikationsknotenpunkt sowie der Fernsteuerstand und die Leitstelle.

Durch Interviews mit den Schiffsführern des Testschiffes und Instruktoren des SBKR, die über umfassende Erfahrung mit Schiffsführungssimulatoren verfügen, wurden die funktionalen Anforderungen an den Fernsteuerstand und an das Bedienen der Schiffe aus der Ferne präzisiert. Zunächst wurde die bestehende Infrastruktur im Simulatorstand des VeLABi vorgestellt. Daraufhin wurden die notwendigen Informationen sowie die erforderlichen Bedien- und Kontrolleinrichtungen festgehalten und dokumentiert.

Einige Aufgaben des Schiffsführers mussten aufgrund des technischen Ausrüstungsstandes des Schiffs angepasst werden. Bestimmte Tätigkeiten, wie die Bedienung der Anker, können nicht aus der Ferne gesteuert und überwacht werden, da die Umrüstung der analogen Anzeigen und Bedienelemente unverhältnismäßig hohe Kosten verursacht hätte, die in keinem Verhältnis zum Nutzen für das Projekt standen.

Die wesentlichen Anforderungen sind im Folgenden textuell zusammengefasst.

Aufgaben des Operators¹

Der Operator übernimmt sämtliche Steuerungsaufgaben, die normalerweise im Steuerhaus ausgeführt werden, einschließlich:

- Bedienung der Propulsions- und Steuerorgane
- Überwachung der Verkehrssituation und Umgebungsbedingungen
- Navigation sowie Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, Schleusen und Häfen
- Überwachung der Maschinenanlagen

Anforderungen an Fernsteuerstand

Der Fernsteuerstand ist so zu konzipieren, dass er den Schiffsführern eine intuitive Bedienung ermöglicht, indem er der traditionellen Schiffsbrücke nachempfunden ist. Hier stehen alle notwendigen Steuerungs- und Überwachungsfunktionen zur Verfügung, einschließlich eines umfassenden Projektionssystems, das eine realitätsnahe Darstellung der Umgebung des Schiffs bietet. Dazu wurde im Rahmen der Befragung folgende Tabelle mit Mindestanforderungen und erweiterten Komfortfunktionen ausgearbeitet.

Rolle der Leitstelle

Die Leitstelle unterstützt den Schiffsführer durch Verkehrsüberwachung und -koordination. Sie kann auch im Notfall eingreifen und zusätzliche Fernsteueraufgaben übernehmen. Eine klare Aufgabe der Leitstelle ist die Vorbereitung und Durchführung von Schichtübergaben der Schiffsführer, die das Schiff aus der Ferne steuern.

Sichere Schiffsführung und Notfallstrategien

Für den Fall eines Kommunikationsausfalls zwischen dem Fernsteuerstand und dem Schiff wurden Notfallstrategien entwickelt. Diese unterscheiden zwischen Szenarien, in denen qualifizierte Besatzungsmitglieder an Bord sind, und solchen, in denen dies nicht der Fall ist. Eine klare Aufgabenverteilung zwischen Fernsteuerstand und Besatzung ist in solchen Szenarien essenziell.

¹ Der fernsteuernde Schiffsführer an Land wird im folgenden Operator genannt, um ihn leichter vom Schiffsführer an Bord unterscheiden zu können.

Tabelle 1: Anforderungen Fernsteuerstand

Mindestanforderungen	Vollbedienung / Komfortfunktionen
1. Rudersteuerung (Euro600)	1. Nachtsichtgerät
2. Maschinensteuerung (Kobelt) (Voraus / Zurück / Drehzahl)	2. Bedienung Funkgerät (Kanalwahl / Sprechen)
3. Bugstrahlanlage (Verhaar) (Start / Stopp / Steuerung / Drehzahl)	3. Argo Joysticksteuerung
4. Kamerasystem (Axis IP Kameras)	4. Bedienung Scheinwerfer
5. Bedienung blaue Flagge (Relais)	5. Bedienung Steuerhaushub (Auf / Ab)
6. Anzeige Radarbild (in 7. enthalten)	6. Bedienung Mast (Radarmast (Auf / Ab)
7. Anzeige ECDIS (Radarplot 720°)	7. Start / Stopp Aggregatmotor
8. Sygo Beladungsmesser (Tiefgang / Tonnage / Schwimmlage)	8. Bedienung Scheibenwischer
9. Wendeanzeiger	9. Überwachung Kontrolleinrichtungen und Warnanlagen
10. Geschwindigkeitsanzeige (neues GPS inkl. Kompass)	10. Bedienung Ankeranlagen (Ankerfalleinrichtung)
11. AIS (Nauticast)	11. Bedienung Festmachereinrichtung (Ankerpfahl)
12. Anzeige Windmesser (VDO)	12. Bedienung Radargerät
13. Argo TrackPilot (inkl. Leitlinien)	13. Bedienung ECDIS
14. Argo DataPortal	14. Bedienung Typhoon
15. Mikrofon (Hören von Funk und Schallsignalen)	15. Bedienung Navigationsbeleuchtung
16. Echolot (Radio Zeeland 120)	16. Bedienung Wechselsprechanlage
17. Messen der Strömungsverhältnisse vor dem Schiff (ADCP Sensor)	17. Füllstandsanzeige Brennstoff / Schmieröl / Ballast / Trinkwasser /
18. Sprechverbindung ins Steuerhaus	18. Abstandsmesseinrichtung (Abstand zum Kai / Schleusenwand)
19. Sprechverbindung zum Matrosen beim Festmachen (Handy mit Headset)	19. Zweiter Windmesser Vorschiff
	20. Bedienung / Umschaltung Notruder

Kamerasysteme und Sensorik

Die Fernsteuerung erfordert eine präzise visuelle und sensorische Überwachung, die durch ein Netzwerk von hochauflösenden Kameras und fortschrittlicher Sensorik unterstützt wird:

- **Domkameras** am Bug und Steuerhaus bieten eine Rundumsicht und erfassen das Geschehen mit einer Auflösung von 1920x1080 Pixeln und einer Bildrate von 15 Hz.
- **Seitenkameras mit Zoom** unterstützen Manöver wie Anlegemanöver und Schleuseneinfahrten, indem sie detaillierte Sicht entlang der Bordwände bieten.
- Eine **Infrarotkamera** ergänzt die Sicht bei schlechten Sichtverhältnissen wie Dunkelheit oder Nebel.
- **LiDAR-Sensoren** am Bug und den Seiten des Schiffs erfassen Hindernisse und Distanzen in Echtzeit, um eine sichere Navigation zu ermöglichen.

- Ein **Global Navigation Satellite System (GNSS)** liefert exakte Positionsdaten.
- **Ladungs- und Höhenmesser** liefern den Tiefgang des Schiffs und dessen Höhe über Wasser

Datenverarbeitung und Übertragung

Alle von den Kameras und Sensoren erfassten Daten werden zentral verarbeitet und in Echtzeit an den Fernsteuerstand übermittelt. Die Datenübertragung erfolgt über einen Router mit sogenannter „multiple carrier aggregation“. Dazu wurde zu Projektbeginn eine Mindestbandbreite von 100 Mbps festgelegt, was eine stabile und sichere Kommunikation gewährleistet soll.

Assistenzsysteme

Die integrierten Assistenzsysteme, wie Navigationshilfen, Hinderniserkennung und Kollisionswarnungen, unterstützen den Schiffsführer bei der sicheren Steuerung des Schiffs. Diese Systeme arbeiten in Echtzeit mit den Sensordaten zusammen, um potenzielle Gefahren frühzeitig zu erkennen und die entsprechenden Maßnahmen vorzuschlagen.

Das Projekt zur Fernsteuerung von Schiffen hat umfassende technische und funktionale Anforderungen spezifiziert, um den Betrieb aus der Ferne sicher und effizient zu gestalten. Das Pflichtenheft bildet die Grundlage für die Weiterentwicklung und Erprobung des Systems.

7.2 Entwurf der Systemarchitektur

In der Anfangsphase des Projekts wurden die Anforderungen der einzelnen Projektpartner an das Gesamtsystem definiert. Auf der Basis dieser Anforderungsdefinitionen wurden anschließend die Systemarchitektur für das ferngesteuerte, koordinierte Fahren in der Binnenschifffahrt entwickelt.

Hierzu wurde das Gesamtsystem zunächst in die wesentlichen Module unterteilt:

- Steuerstand
- Leitstelle
- Workflowmanagement
- Navigationsfilter
- Hinderniserkennung
- Situationsidentifizierung
- Bahnführungsassistent
- Interaktive Trajektorienplanung
- Notfallfunktionalitäten
- Kommunikationsmodul
- Landseitige Zusatzsensorik
- Zusätzliches Anzeige- und Bediensystem auf dem Eigenschiff

In Kooperation mit den jeweils verantwortlichen Projektpartnern ist die verwendete Hardware für die einzelnen Modulen in der Systemarchitektur definiert worden. Ebenso wurden die Schnittstellen der einzelnen Module definiert. Neben den benötigten Systemgrößen/Eingängen für die Umsetzung der jeweiligen Module und den Modulausgängen wurden hierbei – soweit möglich – auch die Zugriffsart, das Datenformat, die Auflösung, die Genauigkeit, die Aktualisierungsrate und die zulässige bzw. resultierende Latenzen der Daten definiert.

Auf Grundlage dieser Spezifikationen der einzelnen Datenströme wurden die jeweiligen Kommunikationsarten, Sender und Empfänger abgeleitet. Des Weiteren wurde bei der Erstellung der Systemarchitektur auch Schnittstellen zu Instanzen berücksichtigt, welche nicht dem betrachteten Gesamtsystem zugehörig sind – hier sind vor allem andere Nutzer der Schifffahrtsstraßen zu nennen. In Abbildung 2 sind die Hauptinstanzen für die ferngesteuerte, koordinierte Binnenschifffahrt dargestellt. Neben dem

ferngesteuerten Schiff und dem Fernsteuerstand – wahlweise der VeLABi-Simulator des DST oder der Schiffführungssimulator des Lehrstuhls Mechatronik der UDE – stellen vor allem die Leitstelle und der Kommunikationsknotenpunkt zentrale Elemente der Systemarchitektur dar. Hierbei erhält die Leitstelle zusätzlichen Zugriff auf landseitige Zusatzsensorik und erlangt somit weitere Umgebungsinformationen für die Koordination der ferngesteuerten Binnenschifffahrt. Die kabellose Kommunikation zwischen der Landseite und dem Schiff stellt einen Engpass dar. Durch einen zentralen Kommunikationsknotenpunkt wird die Notwendigkeit einer mehrfachen Übertragung von Daten vermieden. Der zentrale Knotenpunkt stellt den Instanzen auf der Landseite verschiedene Informationen zur Verfügung, beispielsweise Videostreams oder Steuerdaten. Hierbei ist das Modul „Kommunikationsknotenpunkt“ als die Sammlung verschiedener Services und Server zu verstehen, welche nicht zwingend auf einem Endgerät laufen und auch räumlich voneinander getrennt sein können.

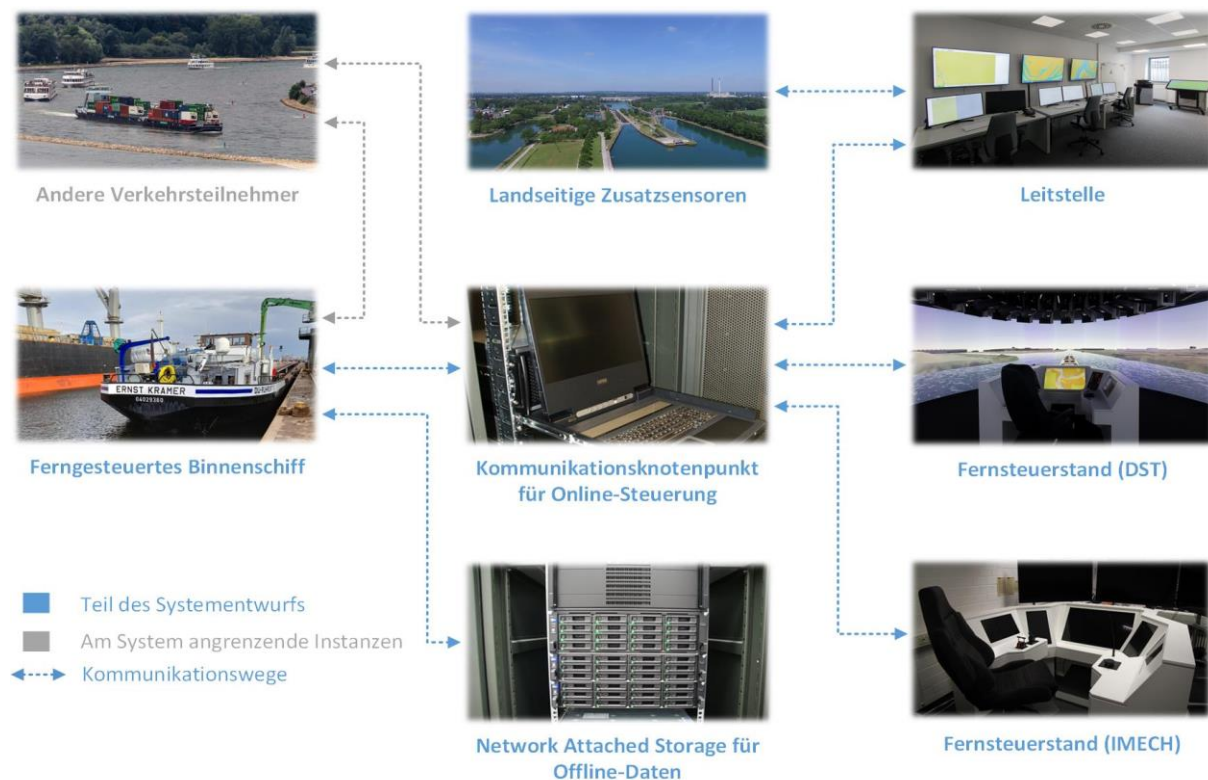


Abbildung 2 Modulinstanzen der Fernsteuerung

Zur Entwicklung von einzelnen Submodulen werden unter anderem Daten – z. B. Messungen der Sensorik an Bord – benötigt. Teile dieser Daten wurden erst im Laufe dieses Projekts erzeugt. Zur effizienten Speicherung und Nutzung dieser Daten wurde ein Network Attached Storage (NAS)-Modul vorgesehen. Hier können alle anfallenden Daten abgespeichert und von den Projektpartnern bei Bedarf abgerufen werden. Bei der Speicherung dieser Daten gibt es keine Anforderungen hinsichtlich Echtzeit, so ist eine Zwischenspeicherung der aufzunehmenden Daten auf dem Schiff und eine Synchronisierung mit dem NAS zu unkritischen Zeitpunkten – also bei guter Netzabdeckung und ausreichend Bandbreite ohne Gefährdung der Fernsteuerung – möglich.

Während innerhalb der einzelnen Module die tatsächliche Kommunikation und Umsetzung dem jeweiligen verantwortlichen Projektpartner obliegt, wurde die Kommunikation zwischen den Modulen zentral abgestimmt. Die Kommunikation zwischen den Hauptakteuren der Fernsteuerung – Schiff, Fernsteuerstand und Leitstelle – ist über ein VPN (Virtual Private Network) realisiert worden, welches die Module in ein logisches Netzwerk zusammenfasst. Innerhalb dieses Netzwerks wird jedem

kommunizierendem Gerät eine feste IP-Adresse zugewiesen. So können Verbindungsabbrüche durch die Verfügbarkeit im Netzwerk auch einseitig erkannt werden.

Als Standard für den Datenaustausch wird die „Open Platform Communications Unified Architecture“ (OPC UA) übergreifend verwendet. Diese erlaubt eine zuverlässige und programmiersprachenübergreifende Kommunikation der Systembausteine auf Industriestandard. Bei der Entwicklung der verschiedenen Softwarekomponenten können unter anderem die im Konsortium verbreiteten Programmiersprachen Python, Matlab sowie C-basierte Programmiersprachen verwendet werden. Zudem gibt es entsprechende Schnittstellen zu den von den Projektpartnern verwendeten speicherprogrammierbaren Steuergeräten (SPS).

Der Datenaustausch über OPC UA bietet zusätzlich Diagnosedaten zur Identifizierung fehlerhafter Übertragungen. Zur Minimierung von Einheitenfehlern zwischen den einzelnen Modulen, werden bei der Übertragung von Systemgrößen SI-Einheiten genutzt. Analog wird zur Reduktion von Datentypfehlern das Datenformat für skalare Systemgrößen auf „double“ festgelegt. Der OPC UA-Server ist hierbei Bestandteil des Moduls „Kommunikationsknotenpunkt“ und bietet damit allen Netzwerkteilnehmern den Zugriff auf alle Steuerdaten an einer zentralen Stelle. Jeder Projektpartner erhält hierbei einen bestimmten Adressbereich auf dem OPC UA-Server, um Daten austauschen zu können. Die Definitionen der einzelnen Datenknoten auf dem Server ist projektweit einsehbar und jeder Projektpartner hat (Lese-)Zugriff auf die Datenknoten. Diese Knotenstruktur vereinfacht die Zuordnung der Datenquellen zu den verantwortlichen Projektpartnern und dient zugleich der Übersichtlichkeit.

Für die Übertragung von Videobildern ist das für Livestreams verbreitete Netzwerkprotokoll RTSP (Real-Time Transport Protocol) vorgesehen worden. Um Mehrfachübertragungen von den datenintensiven Videoübertragungen zu vermeiden, wird ein Videoserver auf dem Kommunikationsknotenpunkt verwendet. Die Videostreams werden hier einmalig vom Schiff empfangen und dann von diesem landseitigen Server aus weiterverteilt. Somit können zum Beispiel im Fernsteuerstand und der Steuerzentrale dieselben Kamerabilder datensparend angezeigt werden.

Ähnlich verläuft die Übertragung von Radardaten über den Kommunikationsknotenpunkt, hierfür wird der „RadarProxy“ des Projektpartners ArgoNav landseitig als Server zum Verteilen der empfangenen Radarbilder verwendet.

In Anhang 24.1.5.1 ist die entwickelte Systemarchitektur des Gesamtsystems zu dargestellt. Im Rahmen dieses mechatronischen Systementwurfs sind die Systemgrenzen sowie die Schnittstellen und angrenzenden Komponenten ebenso wie die verwendete Hardware mit allen Projektpartnern abgestimmt und definiert worden. Das Systemdesign ist in mehreren umfassenden Diagrammen in verschiedenen Detailebenen aufgezeichnet. Diese veranschaulichen die einzelnen Hardwarekomponenten, Softwarekomponenten und ihre Vernetzung im Gesamtsystem.

Zusätzlich existieren weitere Systemdiagramme für die Module „Ferngesteuertes Schiff“, „Leitstelle“ und „Fernsteuerstand“, in welchen die verwendeten Hardware- und Software-Komponenten und deren Schnittstellen definiert sind. In diesen detaillierten Diagrammen sind zudem die Systemgrenzen definiert und die entsprechenden Submodule den verantwortlichen Projektpartnern zugeordnet. Diese Diagramme sind dem Bericht angehängt (siehe Anhang 24.1.5).

7.3 Definition von Testszenarien

Im Verlauf des Projektes wurde das Testkonzept entwickelt, welches die notwendigen Tests und Prüfverfahren für die relevanten Anforderungen an Hardware und Softwaremodule definiert. Das Dokument stellt eine mögliche Vorlage zur Übersicht der zu testenden Leistungsmerkmale eines Produkttyps sowie die Zuordnung zu den Prüfverfahren und einem oder mehreren Testfällen. Das Ziel hierbei ist es,

eine Rückverfolgbarkeit zwischen den zu testenden Leistungsmerkmalen (Anforderungen) und den zugeordneten Testfällen herzustellen.

Des Weiteren wurde das Dokument „Testspezifikationen“ erstellt, welches als Vorlage für die Spezifikation einzelner Testfälle dient. Hierbei werden jeweils testfallabhängig Listen an Vor- und Nachbedingungen vorgesehen sowie festzuhaltenden Beobachtungen und Ereignisse während des Tests definiert.

7.4 Recherche relevanter Vorschriften

Zu Projektbeginn wurde untersucht, welche Vorschriften relevant in Bezug zur Fernsteuerung sind. Hier sind zwei Bereiche zu unterscheiden: die Technik an Bord bzw. im Fernsteuerstand und der Betrieb des Schiffes.

Im Bereich der Technik wurden nur die „Technische Vorschriften für Binnenschiffe – ES-TRIN“ als relevant identifiziert. Hierin gibt es allerdings keine Aussagen zur Fernsteuerung. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen werden in ES-TRIN bisher nur im Einsatz befindliche bzw. marktreife Systeme behandelt, und die Fernsteuerung von Binnenschiffen befindet sich noch in der Entwicklung bzw. Erprobung. Zum anderen bezieht sich ES-TRIN bisher nur auf Systeme an Bord von Binnenschiffen, d. h. nicht auf den Fernsteuerstand an Land und die Datenverbindung zwischen Fernsteuerstand und Schiff.

Bei der Gestaltung des Fernsteuerstands fand die Norm DIN EN 1864: „Fahrzeuge der Binnenschifffahrt – Steuerhaus – Ergonomische und sicherheitstechnische Anforderungen“ Anwendung.

Die weiteren Vorschriften betreffen den Betrieb des Schiffes:

- Binnenschifffahrtsstraßenordnung – BinSchStrO
- Rheinschiffspersonalverordnung – RheinSchPersV
- Rheinschiffahrtspolizeiverordnung – RheinSchPV

Im Rahmen des Projekts sind alle Testfahrten mit vollständiger und ausreichend qualifizierter Besatzung durchgeführt worden. Der Schiffsführer an Bord bleibt der verantwortliche Schiffsführer und hat immer die volle Kontrolle über das Schiff, bzw. kann sie aufgrund der installierten Sicherheitsfunktionen jederzeit und ohne Verzögerung wieder erlangen. Deswegen wurden keine Konflikte mit den o. g. Vorschriften identifiziert.

Bei der Durchführung der Testfahrten wurden dann unterschiedliche Rechtsauffassungen zwischen dem Projektkonsortium und den Schifffahrtsbehörden bzgl. der Definition der Rudergänger deutlich, was die Möglichkeiten der Testfahrten deutlich einschränkte (s. Abschnitt 18.5).

Perspektivisch soll die Besatzungsstärke bei der Fernsteuerung an Bord reduziert werden, damit zumindest kein erhöhter Personalaufwand entsteht. Dazu ist eine Anpassung der Vorschriften notwendig. Vorschläge hierfür wurden im Projekt erarbeitet und werden in Abschnitt 19.2 beschrieben.

8 Bereitstellung und Ausrüstung des Testschiffs und Subsystemtests

8.1 Bereitstellung eines Testschiffs

In enger Abstimmung mit der Rhenus Schiffsmanagement GmbH und den Projektpartnern wurde ein geeignetes Testschiff für das Projekt ausgewählt. Nach gründlicher Prüfung der Anforderungen fiel die Wahl auf das Trockengutschiff „GMS Ernst Kramer“, Baujahr 1974 (siehe Abbildung 3). Trotz altersbedingter Einschränkungen in der technischen Ausstattung erfüllt das Schiff die notwendigen

Voraussetzungen für die Verwendung im Projekt. Es hat eine Länge von 105,0 m, eine Breite von 9,5 m und einen maximalen Tiefgang von 3,2 m.

Nach intensiven Gesprächen mit dem P&I Versicherer zur Bewertung der im Projekt entstehenden Risiken, konnte ein Rahmenvertrag mit Rhenus abgeschlossen werden.



Abbildung 3 GMS Ernst Kramer

Installation an Bord

Die Installation an Bord umfasste die Ausrüstung des Testschiffes mit der für die Fernsteuerung und die Fahrversuche erforderlichen Sensorik, Gerätetechnik zur Erfassung der Messwerte, Kameratechnik, Gerätetechnik zur Ansteuerung der Antriebe und Steuerorgane, Netzwerkinstallation zur Übertragung der Daten auf dem Schiff sowie der notwendigen Kommunikationstechnik zur Übertragung der Daten zwischen Landseite und Schiff.

Zusätzlich zur Installation der Gerätetechnik wurde die zentrale Navigationsplattform realisiert, die einen einheitlichen Zugriff auf die Sensordaten und die Ansteuerung der Antriebe und Steuerorgane für alle Projektpartner ermöglicht. Diese Navigationsplattform wird auch für die Kommunikation mit dem Fernsteuerstand genutzt.

Die notwendigen Arbeiten wurden im Rahmen des Arbeitspaketes 3200 geplant und durchgeführt. Die folgenden Teilarbeitspakete wurden für das Arbeitspaket 3200 definiert und bearbeitet:

- Die Ausrüstung des Testschiffes mit Sensorik wurde erfolgreich abgeschlossen.
- Die Entwicklung der Navigationsplattform als Mittelschicht zwischen Anwendung und Schiffshardware wurde erfolgreich abgeschlossen.
- Die Ausrüstung des Testschiffes mit einer Kommunikationseinrichtung zur Übertragung von und zur Landstation wurde erfolgreich abgeschlossen
- Eine zentrale Datenerfassung und -speicherung wurde erfolgreich umgesetzt.
- Messaufgaben auf einem zweiten Schiff zur Ermittlung fahrdynamischer Eigenschaften wurden nicht durchgeführt, da die mit dem Testschiff erhobenen Daten für ausreichend angesehen wurden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Arbeitspaketes 3200 ausführlicher dargestellt.

8.2 Hardwareausrüstung

Die Argonics GmbH koordinierte in diesem Arbeitspaket die Beschaffung und die Integration der Hardwareausrüstung. Ausgehend von drei Knotenpunkten in Form von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in Maschinenraum, Steuerstand und Bugstrahlraum, wurde ein redundantes Netzwerk implementiert, an das die Hardwareausrüstung entsprechend angeschlossen wurde (vgl. Abbildung 4). Es erfolgte die Koordinierung der Einbauorte und die damit einhergehenden Verkabelungsarbeiten. Außerdem wurden die Stromversorgung der Geräte und notwendige Installationsarbeiten geplant.

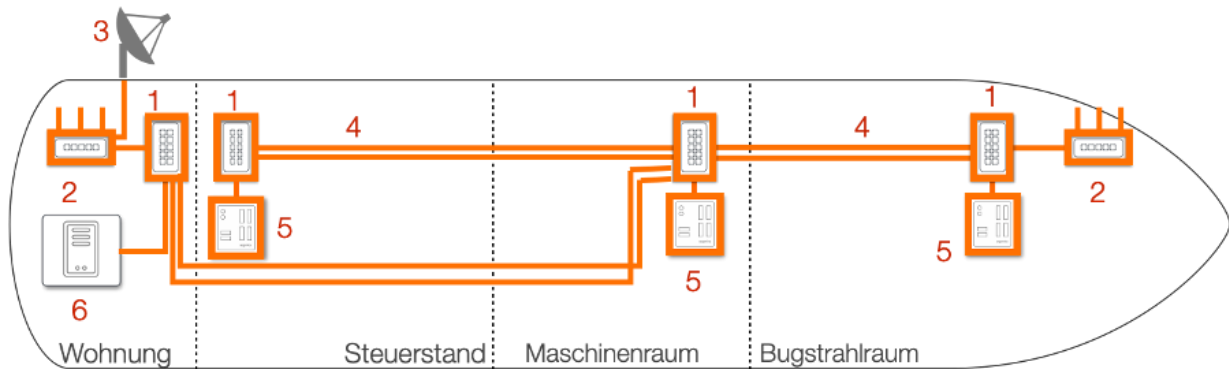


Abbildung 4 Netzwerkstruktur: Managed Switch (1), Mobilfunkrouter mit 2 Modems (2), Satelliteninternetverbindung (3), Glasfaserverbindung (redundant) (4), Navigationsplattform (5), zentraler Server der Fernsteuerung (6)

8.2.1 Ansteuerung der Steuerungs- und Antriebsanlagen

Die Anlage zur Fernsteuerung ist unter anderem in der Lage, die Hauptmaschine, das Ruder und das Bugstrahlruder anzusteuern. Dazu wurde im Steuerhaus eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) installiert, die die folgenden Aufgaben erfüllt:

- Ansteuerung Ruderventile
- Vorgabe der Drehzahl der Hauptmaschine
- Vorgabe der Drehzahl und des Ruderwinkels für das Bugstrahlruder
- Ansteuerung blaue Tafel
- Ansteuerung Typhon
- Kommunikation mit dem zentralen Datenserver der Fernsteuerung (Empfang der Sollwerte aus der Fernsteuerzentrale)
- Umschalten zwischen lokaler Steuerung und Fernsteuerung
- Überwachung der Verbindung
- Alarmierung bei Problemen
- Anzeige des Status der Fernsteuerung

Die für die Fernsteuerung notwendigen Steuerbefehle werden von der Fernsteuerzentrale an Land auf den zentralen Datenserver auf dem Schiff übertragen. Von dem Datenserver an Bord werden die Daten an die SPS im Steuerhaus weitergeleitet und dann im Fall des ferngesteuerten Fahrens auf die Steuerorgane gegeben (siehe Abbildung 6).



Abbildung 5 Bedienteil der Fernsteuerung an Bord: Bildschirm mit Basisinformationen; Notausschalter (rot); Freigabeknopf (weiß)

Es sind 3 verschiedene Betriebsarten der Anlage an Bord möglich, welche von dem Schiffsführer an Bord über das in Abbildung 5 dargestellte Bedienteil freigegeben werden können:

- **Fernsteueranlage durch Notastaster deaktiviert:** Die Fernsteueranlage ist elektrisch von der Ruderanlage und der Hauptmaschine getrennt, die Steuerung erfolgt mit den bordeigenen Fahrhebeln und Geräten. Die Ansteuerung des Bugstrahlruders erfolgt über eine digitale Netzwerkschnittstelle, diese kann nicht elektrisch getrennt werden.
- **Fernsteueranlage aktiviert (Notastaster entriegelt), lokale Steuerung:** Bereit für die Fernsteuerung, weiterhin liegt die Steuerung aber beim Schiffsführer auf dem Schiff. Die Signale für Ruderwinkel und Hauptmaschine werden von den bordeigenen Hebeln eingelesen, in der Fernsteueranlage verarbeitet und wieder auf die bordeigenen Geräte gegeben. Die Sollwerte für das Bugstrahlruder werden direkt von der Steuerungsanlage des Bugstrahlruders verarbeitet.
- **Fernsteueranlage aktiviert (Notastaster entriegelt), ferngesteuert:** Das Kommando wurde vom Schiffsführer an den Fernsteuerstand übergeben. Ab jetzt werden die Sollwerte für Ruderwinkel, Drehzahl und Bugstrahlruder von den Hebeln am Fernsteuerstand eingelesen und auf die bordeigenen Geräte übertragen.

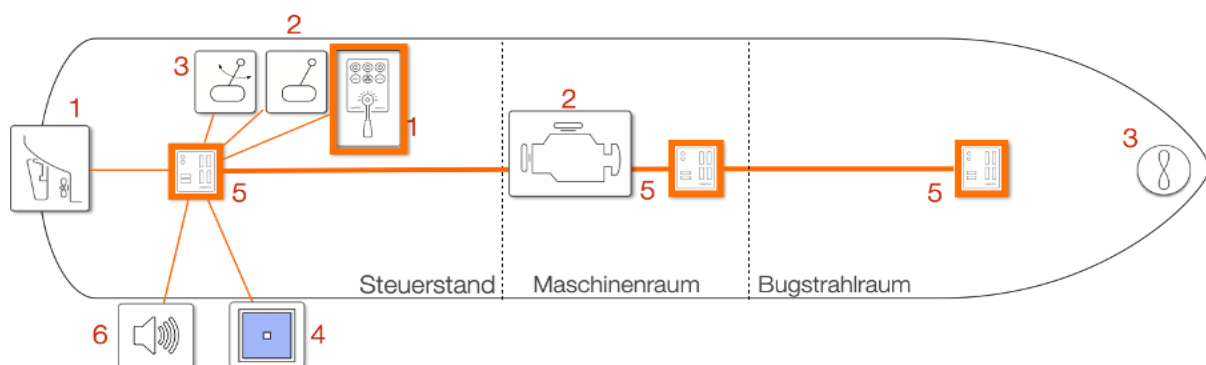


Abbildung 6 Ansteuerung der Aktorik: Ruderanlage (1), Fahrhebel Hauptmaschine (2), Bugstrahlhebel (3), blaue Tafel (4), Navigationsplattform (5), Typhon (6)

8.2.2 Ansteuerung Ruderventile

Die Hydraulikventile zur Verstellung des Ruderwinkels werden bei deaktivierter Fernsteueranlage (Notaustaster gedrückt) über die bordeigene Autopilotanlage vom Typ Radio Holland Euro 500 angesteuert. Die Aktivierung der Fernsteueranlage durch Entriegeln des Notaustasters schaltet mehrere Kontakte eines Sicherheitsrelais so um, dass die Ventile der Ruderhydraulik elektrisch mit der Fernsteueranlage verbunden werden. Die Verbindung zum bordeigenen Autopiloten wird elektrisch getrennt. Umgekehrt wird die elektrische Verbindung zur Fernsteueranlage beim Deaktivieren durch den Notaustaster getrennt (siehe Abbildung 7).

Wenn die Fernsteueranlage aktiviert ist, wird sowohl die Wegesteuerung (Nachlaufsteuerung) als auch die Wendegeschwindigkeitsregelung (Kreiselpilot) von der SPS im Steuerstand übernommen. Es wurde ein Wendegeschwindigkeitsregler vom Typ argoPilot installiert, der gegenüber dem bordeigenen System über eine erweiterte Funktionalität verfügt. Zum einen besitzt der argoPilot eine Schnittstelle zum Bahnführungssystem. Zum anderen wurde die Software so erweitert, dass die Experimente bei den Messfahrten zur Identifikation der Schiffsdynamik weitgehend automatisiert durchgeführt werden konnten.

Die Vorgabe der Steuerbefehle erfolgt im Fall der lokalen Steuerung über den gleichen Tillerhebel wie bei der bordeigenen Anlage. Im ferngesteuerten Betrieb wird der Sollwert des Tillerhebels aus der Fernsteuerzentrale genutzt. Die Umschaltung zwischen Wegesteuerung und Wendegeschwindigkeitsregler erfolgt über separate Taster der Fernsteueranlage oder über den berührungsempfindlichen Bildschirm in der Fernsteuerzentrale, abhängig vom gewählten Fahrstand.

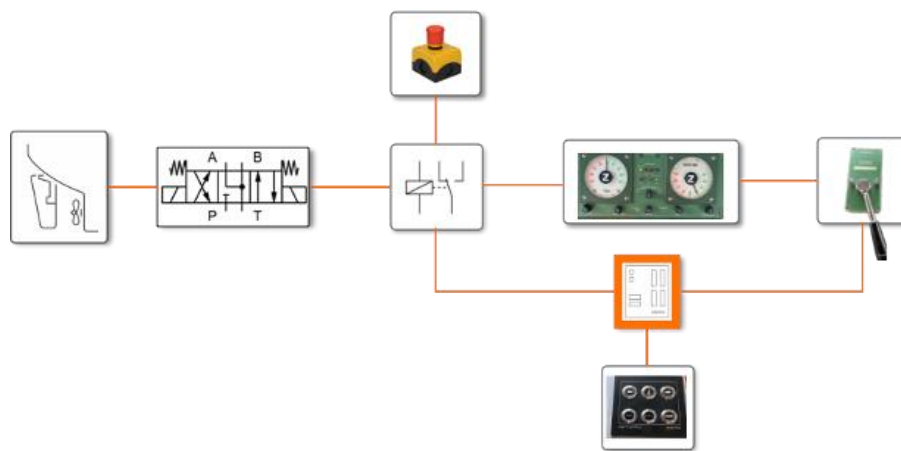


Abbildung 7 Ansteuerung der Ruderventile

8.2.3 Ansteuerung der Hauptmaschine

Die Ansteuerung der Hauptmaschine erfolgt über einen elektronischen Fahrhebel mit einem Potentiometer zur Positionserfassung. Bei aktiver Fernsteueranlage wird an Bord die elektrische Verbindung zwischen dem Fahrhebel und der Motorsteuerung getrennt und über ein Sicherheitsrelais auf einen analogen Ausgang der Fernsteueranlage umgeschaltet. Gleichzeitig wird die Fahrhebelstellung in die Fernsteueranlage eingelesen. Bei lokaler Steuerung über die Fernsteueranlage wird die aktuelle Stellung des Fahrhebels in die Fernsteueranlage eingelesen und dann über einen analogen Ausgang wiederum auf die Motorsteuerung geschrieben. Beim ferngesteuerten Betrieb wird der Wert des Fahrhebels in der Fernsteuerzentrale auf die Motorsteuerung geschrieben. Diese Umschaltung des Sollwertes erfolgt in der Software der Fernsteueranlage abhängig vom gewählten Fahrstand.

Wird die Fernsteueranlage durch Drücken des Notastasters deaktiviert, erfolgt eine galvanische Trennung der Fernsteueranlage von der Motorsteuerung mit Hilfe von Relaiskontakten des Sicherheitsrelais (siehe Abbildung 8).

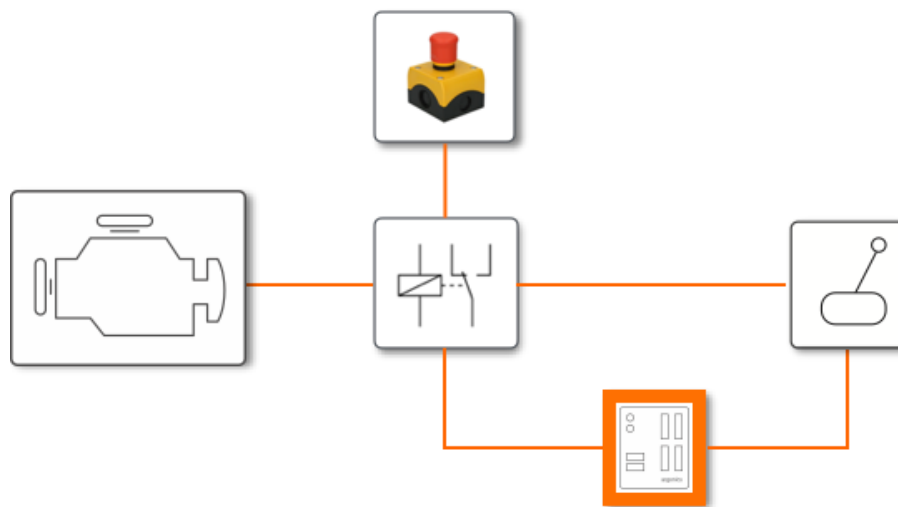


Abbildung 8 Ansteuerung der Hauptmaschine

8.2.4 Ansteuerung der Bugstrahlanlage

Die Ansteuerung der Bugstrahlanlage erfolgt über eine digitale Netzwerkschnittstelle über das Protokoll Modbus TCP. Über diese Schnittstelle können die Sollwerte für Ruderwinkel und Drehzahl geschrieben werden, die Istwerte von Ruderwinkel und Drehzahl ausgelesen werden, sowie die Stellung des Fahrhebels ausgelesen werden. Des Weiteren erfolgt eine Überwachung der Kommunikation über eine Watchdog-Variable und einen Nachrichtenzähler. Die Umschaltung zwischen dem Fahrhebel und externen Sollwerten erfolgt ebenfalls über die digitale Schnittstelle. Zusätzlich kann der Antriebsmotor des Bugstrahlruders über diese Schnittstelle gestartet und gestoppt werden. Warnungen und Alarmer können ebenfalls übertragen werden.

Wenn die Fernsteueranlage durch Betätigung des Notastasters deaktiviert wird, schickt die Fernsteueranlage den Umschaltbefehl über die digitale Schnittstelle auch zur Steueranlage des Bugstrahlruders, um die Steuerung über den Fahrhebel wieder zu aktivieren.

8.2.5 Autopilot und Bahnführung

Da der an Bord installierte Wendegeschwindigkeitsregler vom Typ Radio Holland Euro 500 nicht für den Einsatz einer Bahnführung geeignet ist, wurde die speicherprogrammierbare Steuerung im Steuerhaus mit Software und Hardware ausgestattet, die den Betrieb als zusätzlichen Wendegeschwindigkeitsregler mit einer Schnittstelle für die Fernsteuerung und die Bahnführung ermöglicht. Dazu wurden die Steuerventile der Ruderanlage wie in Kapitel 8.2.2 beschrieben mit der speicherprogrammierbaren Steuerung im Steuerstand verbunden. Zusätzlich wurde das Bahnführungssystem argoTrackPilot mit den Erweiterungen für die Fernsteuerung installiert.

8.2.6 Einlesen der Sensorik

Auf dem Versuchsschiff werden die folgenden Messwerte eingelesen und an den zentralen Datenserver der Fernsteuerung übertragen:

- Position, Nordwinkel und Geschwindigkeit über Grund über einen hochgenauen GNSS-Empfänger
- Wendegeschwindigkeit über den Wendegeschwindigkeitsanzeiger des Autopiloten und die Inertiale Messeinheit

- Ruderwinkel über den Ruderwinkelsensor des Autopiloten
- Motordrehzahl über den CAN-Bus des Bedienpanel des Motors
- Windgeschwindigkeit und Richtung über eine Wetterstation am Bug des Schiffes
- Wassertiefe über das Echolot
- Beladung des Schiffes über den Ladungsmesser
- Wellendrehzahl über zusätzlich montierte Drehzahlgeber an der Welle
- Moment und Schub an der Welle über Dehnungsmessstreifen auf der Welle
- Strömungsrichtung und -geschwindigkeit des Wassers vor dem Schiff über 2 2D-ADCP-Strömungssensoren im Bug
- Inertiale Messeinheit zur Messung von Drehraten, Beschleunigungen und Lagewinkeln

Abbildung 9 zeigt die an die Navigationsplattform angeschlossene Sensorik.

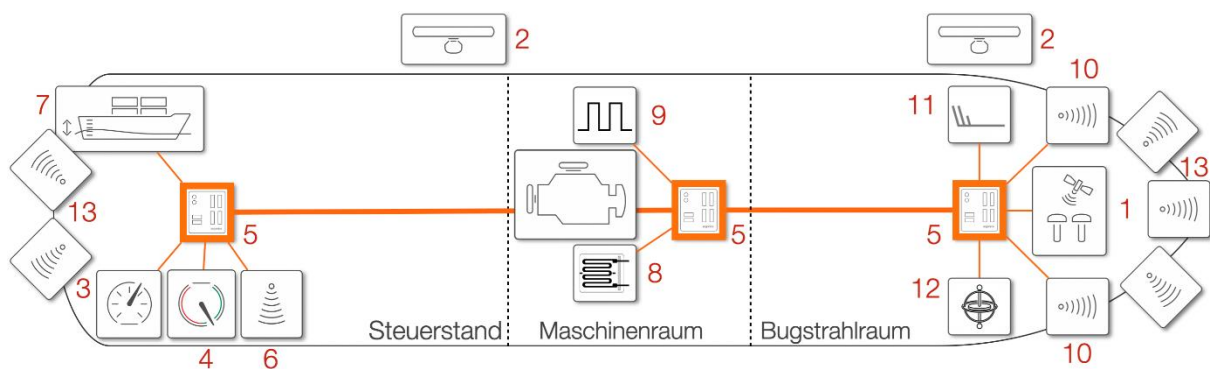


Abbildung 9 Einlesen der Sensorik: GNSS-Kompass (1), Radar (2), Wendeanzeiger (3), Ruderlagegeber (4), Navigationsplattform (5), Echolot (6), Ladungsmesser (7), Momenten- und Schubmessung an der Welle (8), Drehzahlgeber an der Welle (9), Strömungsmessung über ADCP (10), Windmessung (11)

8.2.7 Kameras

Konventionelle Schiffe verfügen auch bereits häufig über Kameras, welche beispielsweise bei Schleusenfahrten unterstützen sollen. An Bord der Ernst Kramer wurden darüber hinaus weitere Kameras installiert, um dem Operator verschiedene Blickwinkel zur Verfügung zu stellen. Abbildung 10 gibt eine Übersicht über die Positionierungen an Bord und die üblichen Blickwinkel. Bei den Kameras 3, 4, 5 und 8 handelt es sich um PTZ-Kameras, dies bedeutet, dass sie schwenk- und neigbar sind und über einen Zoom verfügen. Daher können hier die Blickwinkel in alle Richtungen verdreht werden.

Die Kameras 1 und 2 sind 180° Kameras, wobei sich das aufgenommene Bild auf einem Bildschirm darstellen lässt. Somit geben diese Kameras dem Operator eine Rundumsicht auf einen Blick. Durch die Verzerrung des Bildes sind Abstände jedoch nicht optimal einschätzbar, wodurch diese Kameras eher zur Einschätzung der allgemeinen Umgebungslage gedacht sind.

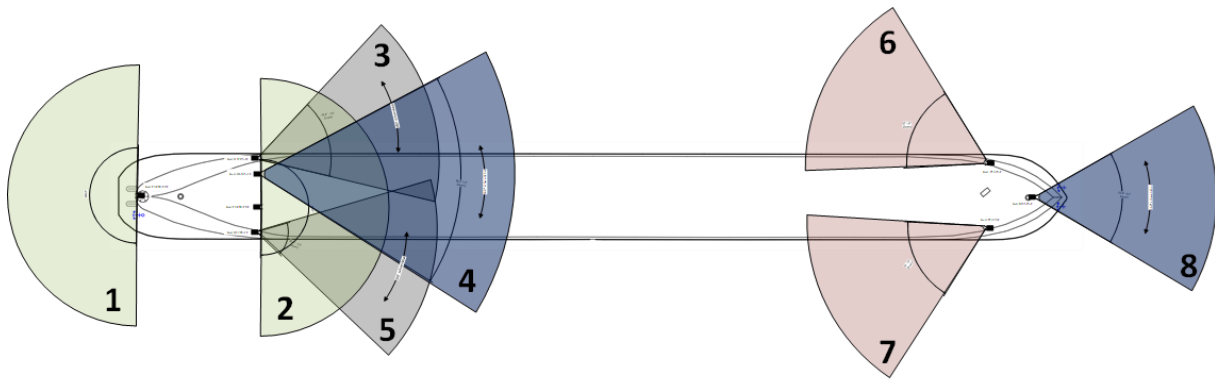


Abbildung 10 An Bord verbaute Kameras: rückwärtsgerichtete 180°-Kamera (1), vorausgerichtete 180°-Kamera (2), vorausgerichtete Gangbordkamera an Steuerbord und Backbord (3, 5), vorausgerichtete Steuerhauskamera (4), rückwärtsgerichtete Gangbordkameras (6, 7), vorausgerichtete Bugkamera (8)

Kamera 4 gibt nahezu den Blickwinkel des Schiffsführers an Bord wieder. Die Kamera ist lediglich leicht nach backbord versetzt, um die freie Sicht an Bord nicht zu behindern.

Kamera 3 und 5 sind neben dem Aufbau angebracht, nahezu auf Kopfhöhe. Sie liefern in der Standardansicht ein ähnliches Bild wie Kamera 4, jedoch ist eine Peilung über die Bordwand möglich, sodass es möglich ist zu erkennen, ob sich ein Hindernis oder anderes Schiff neben oder noch vor dem Schiff befindet. Auch bei Schleuseneinfahrten zeigen diese Kameras den Abstand zwischen Schiff und Schleusenwand. Diese beiden Kameras sind als PTZ-Kameras ausgeführt, somit kann jeweils der komplette Seitenbereich und auch der Heckbereich, beispielsweise beim Anlegen, überwacht werden oder weit entfernte Hinweisschilder oder Objekte herangezoomt werden zur besseren Erkennung.

Die Kameras 6 und 7 sind das Gegenstück am Bug zu diesen beiden Kameras, jedoch mit festem Blickwinkel, aber ebenfalls zoombar.

Um den Nahbereich vor dem Schiff einsehen zu können, ist Kamera 8 am Bug montiert. Diese Kamera ist wiederum schwenkbar, sodass beispielsweise bei engen Kurvenfahrten der Blickwinkel angepasst werden kann.

Bis auf die Kameras 1 und 2 verfügen alle installierten Kameras über eine FullHD-Auflösung (1920x1080 Pixel) und eine Bildrate von bis zu 30 FPS. Die beiden Kameras 1 und 2 können mit 5120x2560 Pixeln bei 25 FPS betrieben werden. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit von Schiffen im Vergleich zu Kraftfahrzeugen ist eine Bildwiederholrate von 15 FPS jedoch völlig ausreichend. Als Codec wird der Standard H.264/MPEG-4 AVC verwendet, da nicht alle Kameras über den Nachfolger H.265 HVEC verfügen.

8.2.8 Radaranlagen und Inland-ECDIS

Das Testschiff Ernst Kramer ist mit zwei für die Binnenschifffahrt zugelassenen Navigationsradaranlagen sowie einem Inland-AIS-System ausgestattet. Im spezifischen handelt es sich hierbei um eine Radar-Anlage des Typs Alphantron JMA-609 (Zulassungsnummer R-4-011), eine Radar-Anlage des Typs Alphantron JMA-610 (Zulassungsnummer R-4-015) sowie einen Inland-AIS-Transceiver vom Typ Nauticast Inland AIS (Zulassungsnummer R-4-203). Die Radarsignale dieser Anlagen werden rückwirkungsfrei über den Ausgang „Tochteranzeige“ an je ein zugelassenes Inland-ECDIS Navigationssystem vom Typ Argonav RADARpilot720° (Zulassungsnummer R-4-720) übergeben. Ebenso ist das AIS-Gerät über eine serielle Schnittstelle an eines der beiden RADARpilot-Systeme angeschlossen. Die beiden RADARpilot-Systeme sind in die Netzwerkstruktur des Testschiffs eingebunden. Die Radarsignale sowie AIS-Nachrichten (NMEA-Standard) werden über die Netzwerkstruktur an die Fernsteuerzentrale

übertragen. Dazu wird eine sogenannte „Server-Client-Architektur“ verwendet. Ein Radar-Server-Modul des RADARpilot-Systems an Bord der Ernst Kramer stellt dem Client-Modul des RADARpilot-Systems in der Fernsteuerzentrale die Radarsignale zur Verfügung. Für die AIS-Nachrichten wird ein Modul vom Typ Serial-Server verwendet. Diese Architektur wird bereits seit Jahren erfolgreich in vielen RADARpilot-Installationen eingesetzt, bei denen Radar/AIS-Antennen-System und Anzeige-System räumlich getrennt betrieben werden (u.a. Revierzentralen, Küsten- und Hafenüberwachung, Tochteranzeige-Systeme an Bord von WSP- und WSA-Fahrzeugen). Das RADARpilot-System in der Fernsteuerzentrale verfügt über Radar- sowie eine IENC-Anzeige. Da sämtliche Originalsignale rückwirkungsfrei an Bord erfasst werden, kann der Schiffsführer im Fernsteuerstand die Anzeigen nach seinen Bedürfnissen einrichten, ohne Einfluss auf die Anzeigen an Bord der Ernst Kramer zu nehmen. Der Funktions- und Bedienumfang sowie die Qualität der Radar- und Inland-ECDIS-Anzeige in der Fernsteuerzentrale ist identisch mit den entsprechenden Anzeigen an Bord. Beide Systeme können unabhängig voneinander bedient werden. Der Bandbreitenbedarf für die Übertragung der Radar- und AIS-Signale ist, verglichen mit dem Bedarf der Kamerabilder, gering. Das bedeutet, dass bei niedriger Übertragungsleistung zwischen Fernsteuerzentrale und Schiff als erstes die Qualität der Kamerabilder sinkt, Radar- und AIS-Signale werden weiter vollständig übertragen. Während der Testfahrten wurde dieses Verhalten von den Schiffsführern in der Fernsteuerzentrale positiv wahrgenommen. Der häufige Einsatz von Radaranlage und ECDIS in der modernen Binnenschifffahrt, auch bei Tag und guter Sicht, führt zu einem routinierten Umgang bei der Radarfahrt. In den Testfahrten hat sich gezeigt, dass dieser routinierte Umgang auch bei der ferngesteuerten Fahrt hilfreich ist und den Schiffsführern in der Fernsteuerzentrale eine gute Umgebungswahrnehmung sowie ein sicheres Gefühl bei der Navigation ermöglicht.

8.2.9 Laserscanner

Das Navigationsradar eines Binnenschiffs deckt einen Bereich von ca. 25 m bis zu mehreren Kilometern Entfernung zum Schiff ab. In der unmittelbaren Umgebung der Antenne kann es keine Objekte erfassen. Dies ist einerseits mit dem Messprinzip verbunden: Da nur eine Antenne zum Senden und Empfangen verwendet wird, kann erst ab dem Zeitpunkt gemessen werden, an dem der Puls die Antenne „verlassen“ hat. Zum anderen ist die Antenne oft deutlich über der Wasseroberfläche, sodass aufgrund der Strahlbündelung nur ein sehr schlechter Empfang aus dieser Richtung möglich ist. Für ein ferngesteuertes Schiff ist es, geboten, dem fernsteuernden Schiffsführer eine bestmögliche Darstellung der Umgebung des Schiffes zu bieten. Daher wurde an der Ernst Kramer ein System von insgesamt 5 Laserscannern installiert, die den Bereich um und vor dem Bug sowie rund um das Heck abdecken. Es wurden 2 verschiedene Scannertypen der Firma Sick eingesetzt. Beide Geräte sind für den Einsatz im Außenbereich ausgelegt und erfassen die Umgebung nicht nur in einer Ebene sondern nutzen mehrere Erfassungsebenen. Das erhöht die Erfassungsleistung wesentlich. Der Laserscanner des Typs MRS1000 kann einen Winkelbereich von maximal 270 Grad abdecken. Seine Reichweite beträgt maximal 64 m, in der Praxis werden ca. 30 m erreicht. Er arbeitet mit 4 Erfassungsebenen. Der Laserscanner des Typs MRS6000 hat eine Reichweite von maximal 200 m, in der Praxis werden ca. 70 m erreicht. Er kann in einem Winkelbereich von 120 Grad messen und tut das in insgesamt 24 Messebenen.

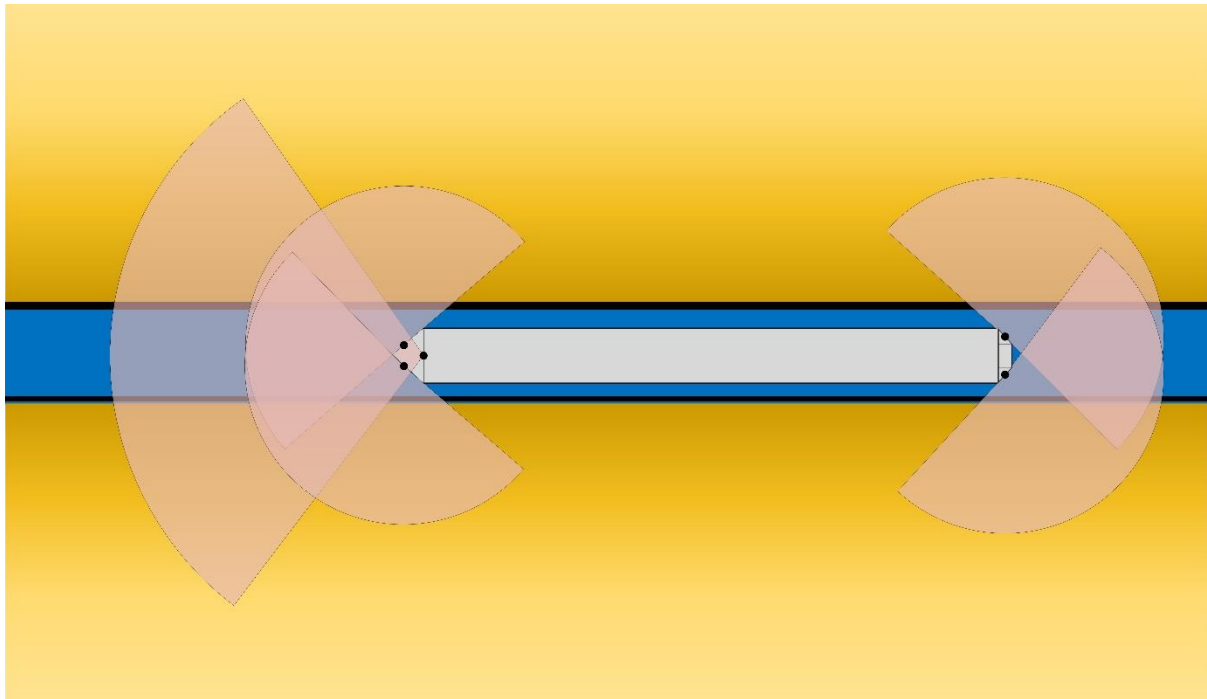


Abbildung 11 Abdeckungsbereiche der Laserscanner

Die Abbildung 11 zeigt die Abdeckungsbereiche der Laserscanner auf der “Ernst Kramer”. Die Darstellung orientiert sich an der Situation bei einer Schleusung.

Am Bug sind 2 Laserscanner des Typs MRS1000 installiert, die nach rechts und links orientiert sind. Aufgrund der gebogenen Schiffswand am Bug und ihres maximalen Winkelbereichs von 270 Grad, ergibt sich hier eine deutliche Überlappung im Bereich vor dem Schiff. Zusätzlich wird im Bugbereich ein Laserscanner des Typs MSR6000 eingesetzt, um einen größeren Bereich direkt vor dem Schiff abzudecken.

Im Heckbereich sind ebenfalls 2 Laserscanner des Typs MRS1000 installiert, die auch im Bereich der schrägen Schiffswand installiert sind und damit den Bereich rund um das Heck abdecken.

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die installierten Laserscanner am Bug und Heck der “Ernst Kramer”. Die Scanner des Typs MRS1000 sind in einem Bereich montiert, in dem auch die Taue zum Festmachen des Schiffs bewegt werden. Daher sind sie zusätzlich in speziellen Gehäusen mit Stahlplatten unter- und oberhalb des Sensors montiert. Der Laserscanner des Typs MRS6000 ist auch dem Querbalken unterhalb des Radars montiert und etwas nach unten geneigt, um die Wasseroberfläche vor dem Schiff zu erfassen.



Abbildung 12 Bugansicht der „Ernst Kramer“



Abbildung 13 Heckansicht der „Ernst Kramer“

8.2.10 Funkkommunikation

Im Steuerhaus der Ernst Kramer wurde ein Interface zur Abwicklung des Funkverkehrs über eine Internetverbindung installiert. Das Funkgerät der Ernst Kramer arbeitet sozusagen als Relaisstation für

den Operator, d. h. es ist die Schnittstelle zwischen der datenbasierten Sprachübertragung vom Fernsteuerstand zum Schiff und dem UKW Funkverkehr.

8.2.11 Navigationsplattform und Kommunikationsprotokoll

Auf einem Binnenschiff ist allgemein eine Vielzahl verschiedener Peripherie mit unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen installiert. Dies erschwert den Systementwurf erheblich, da verschiedenartige Kommunikationstechnologie beherrscht werden muss. Im Rahmen von AP 3200 wurde deshalb eine Navigationsplattform entwickelt, die eine standardisierte, einfache und sichere Schnittstelle zu Sensorik, Aktorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle bietet. Die Projektpartner konnten so innovative Systeme zur automatisierten Bahnführung entwickeln, ohne sich um technische Details bei der Anbindung der Peripherie kümmern zu müssen.

Für die Kommunikation über diese standardisierte Schnittstelle war ein Protokoll notwendig, das eine Reihe an Kriterien bezüglich

- Topologie
- Datenrate
- Ausdehnung
- Overhead
- Verfügbarkeit
- Verbreitung
- Latenz

zu erfüllen hat. Nachfolgend werden typische Kommunikationsprotokolle gegenübergestellt und bezüglich ihrer Eignung auf Basis der zuvor identifizierten Kriterien untersucht.

8.2.12 Topologie, Ausdehnung und Datenrate

Die untersuchten Protokolle sind in Tabelle 2 aufgeführt und können bezüglich des verwendeten Übertragungsverfahrens (Physical Layer, Schicht 1 bzw. 2 im OSI-Schichtenmodell) klassifiziert werden.

Tabelle 2: Untersuchte Übertragungsverfahren nach physikalischem Übertragungsweg

CAN	Ethernet	Seriell
CANopen	PROFINET	PROFIBUS
J1939	Modbus	
NMEA2000	EtherCAT	
	OPC-UA	

Durch das verwendete Übertragungsverfahren ergeben sich bereits deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Protokollklassen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich der Datenrate und maximaler Ausdehnung der Übertragungsverfahren

	CAN	Ethernet	Seriell
Topologie	Linie	Beliebig	Linie
Maximale Ausdehnung je Segment	bis 1100 m	bis 100 m (Kupfer)	bis 1200 m
Datenrate	bis 1 Mbit/s	bis 1 Gbit/s	bis 12 Mbit/s

Die maximale Ausdehnung der CAN-basierten und der seriellen Protokolle ist bemerkenswert, jedoch für den avisierten Verwendungszweck nicht relevant, da die Geräte durch den Kommunikationsring (vgl. Abbildung 4) in geringer Entfernung von den SPS platziert werden können. Die Ethernet-basierten Protokolle sind so gemäß Tabelle 3 zu favorisieren, da die maximale Datenrate um bis zu zwei Größenordnungen gegenüber den übrigen betrachteten Protokollen liegt. Es ist anzumerken, dass die aufgeführten Datenraten in Tabelle 3 generell Maximalwerte bei kurzen Ausdehnungen darstellen. Die mögliche Topologie bei CAN-Bus und seriellen Verbindungen stellt eine Beschränkung im Vergleich zu Ethernet dar, wo Geräte faktisch beliebig auf ein Netzwerk aufgeschaltet werden können.

8.2.13 Verfügbarkeit und Overhead

Ein großer Vorteil der Ethernet-basierten Protokolle (ausgenommen EtherCAT) ist die Verwendung von TCP/IP als Transport- und Vermittlungsschicht. Daten können damit über das Internet und herkömmliche Netzwerktechnik (und über Firewalls hinweg) übertragen werden und sind so weitreichend verfügbar. Ein Nachteil dieser Technik ist der große Daten-Overhead. So liegt bereits der Overhead aus der Transportschicht (TCP-Overhead) mit 40 Byte um den Faktor fünf über dem gesamten Overhead des CAN-basierten Protokolls J1939 (67 Bits) [ARG5] [ARG8]. Die zuvor genannte vielfach höhere Datenrate der Ethernet-basierten Protokolle kompensiert diesen Nachteil allerdings.

8.2.14 Verbreitung

Wichtige Punkte stellen auch die Verbreitung und die allgemeine Akzeptanz des Protokolls dar. Da die Ergebnisse nach Projektabschluss weitere Forschung ermöglichen und eine marktwirtschaftliche Verwertung begünstigen soll, ist die Verwendung eines weit verbreiteten Protokolls äußerst vorteilhaft. Hier sind generell die Ethernet-basierten Protokolle PROFINET, Modbus und OPC-UA im Vorteil, da diese den weit verbreiteten TCP/IP Standard nutzen. Das zuletzt genannte Protokoll OPC-UA wird außerdem häufig als wichtigstes Protokoll im Bereich IOT/Industrie 4.0 bewertet [ARG1] [ARG2].

8.2.15 Latenz

Zeitkritische Anwendungen stellen große Anforderungen an die maximal zulässige Latenz. Diese ist allerdings von vielen Faktoren abhängig und entsprechende Vergleiche müssen allgemein für jeden spezifischen Anwendungszweck gesondert durchgeführt werden. So lassen sich im Rahmen dieser Recherche keine quantitativen Aussagen über einzelne Protokolle treffen. Auch die einschlägige Literatur bietet wenig Anhaltspunkte für einen allgemeingültigen Vergleich der vorgestellten Protokolle. Es kann jedoch qualitativ den Protokollen Modbus und PROFIBUS eine mittlere Reaktionszeit bescheinigt werden [ARG7]. In der Klasse der Ethernet-basierten Protokolle besitzt PROFINET einen speziellen Modus für Echtzeitanwendungen (PROFINET RT) und auch OPC-UA bietet mit OPC-UA TSN eine entsprechende Funktionalität [ARG6]. EtherCAT zeichnet sich ebenfalls durch eine sehr geringe Latenz aus [ARG6].

8.2.16 Auswahl eines Protokolls

Unter Berücksichtigung aller zuvor genannten Faktoren wurde als Protokoll für die Navigationsplattform OPC-UA ausgewählt. Es lässt sich auf Basis von Ethernet und TCP/IP einfach in einem modernen Netzwerk umsetzen und ist auch über das Internet bzw. über Cloud-Anwendungen nutzbar. Es kann durch Client-Authentifizierung und 128/256 Bit Verschlüsselung sicher implementiert werden und ist über OPC-UA TSN und das Publisher/Subscriber-Prinzip echtzeitfähig. Es ist zudem plattformunabhängig und weit verbreitet [ARG4]. Nicht zuletzt lässt es eine semantische Beschreibung der Daten zu und ermöglicht so neuartige Optimierungsmöglichkeiten mit künstlicher Intelligenz [ARG3].

8.2.17 Auslegung der Netzwerkarchitektur und Tests

Die Verbindung der Knotenpunkte auf dem Testschiff wird über ein Ethernet-Netzwerk auf Basis von Managed Switches des Herstellers Planet realisiert. Die Netzwerkarchitektur ist in Abbildung 4 gezeigt.

Da die benötigte Leitungslänge für die Verbindung von Maschinenraum und Bugstrahlraum ($> 100\text{ m}$) die Verwendung von konventionellen Kupferleitungen (nach CAT-Spezifikation) nicht zulässt, wird auf einen Lichtwellenleiter zurückgegriffen.

Die benötigte Bandbreite ergibt sich zum großen Teil aus den Anforderungen der verwendeten Kameras. Zum Stand der Auslegung der Netzwerkarchitektur liegen hierfür keine definierten Anforderungen vor. Aus dem Datenblatt kann aber eine Kodierung nach h.264 entnommen werden. So wird die notwendige Bandbreite je Kamera mit max. 10 Mbit/s abgeschätzt. Einen weiteren signifikanten Anteil am Bandbreitenbedarf haben die verwendeten Laserscanner. In Ermangelung von definierten Anforderungen werden hier ebenfalls 10 Mbit/s pro Laserscanner geschätzt. Der geschätzte Bandbreitenbedarf des Gesamtsystems ergibt sich somit bei acht Kameras und fünf Laserscannern zu 130 Mbit/s .

Die Verbindung zwischen Netzwerk-Switches (Uplink) wird zum derzeitigen Stand der Technik im industriellen Bereich üblicherweise mit 10 Gbit/s realisiert. Für die identifizierten Anforderungen im Rahmen des Projekts FernBin ist dies entsprechend den obigen Ausführungen nicht notwendig und es wird stattdessen eine Bandbreite von 1 Gbit/s verwendet.

In Netzwerken mit einer größeren Anzahl an Teilnehmern ist die Verwendung von Link Aggregation (LAGG) vorteilhaft. Neben der möglichen höheren kumulierten Bandbreite erhöht LAGG auch die Verfügbarkeit des Netzwerks durch eine automatische Erkennung des Ausfalls eines physischen Links und dem Wechsel auf die verbleibende Schnittstelle (unter Verwendung des Link Aggregation Control Protocols: LACP). LAGG soll auch in der vorliegenden Netzwerkarchitektur Anwendung finden.

8.2.18 Test im Labor

Die vorgestellte Netzwerkarchitektur wurde vor der Installation auf dem Testschiff im Laborversuch erprobt. Dafür wurden an den Knotenpunkten Steuerstand und Bugstrahlraum Geräte angeschlossen, die mittels HELIOS LanTest [ARG9] miteinander kommunizieren (vgl. Abbildung 14). Das Endgerät am Knotenpunkt Bugstrahlraum dient als Server und erlaubt den Zugriff von zwei eigenständigen Endgeräten am Knotenpunkt Steuerstand. Der parallele Zugriff dieser zwei Geräte ist notwendig, damit LAGG des Lichtwellenleiters (rot) getestet werden kann. Die Verbindung der Endgeräte (grün) erfolgt über Kupferleitungen.

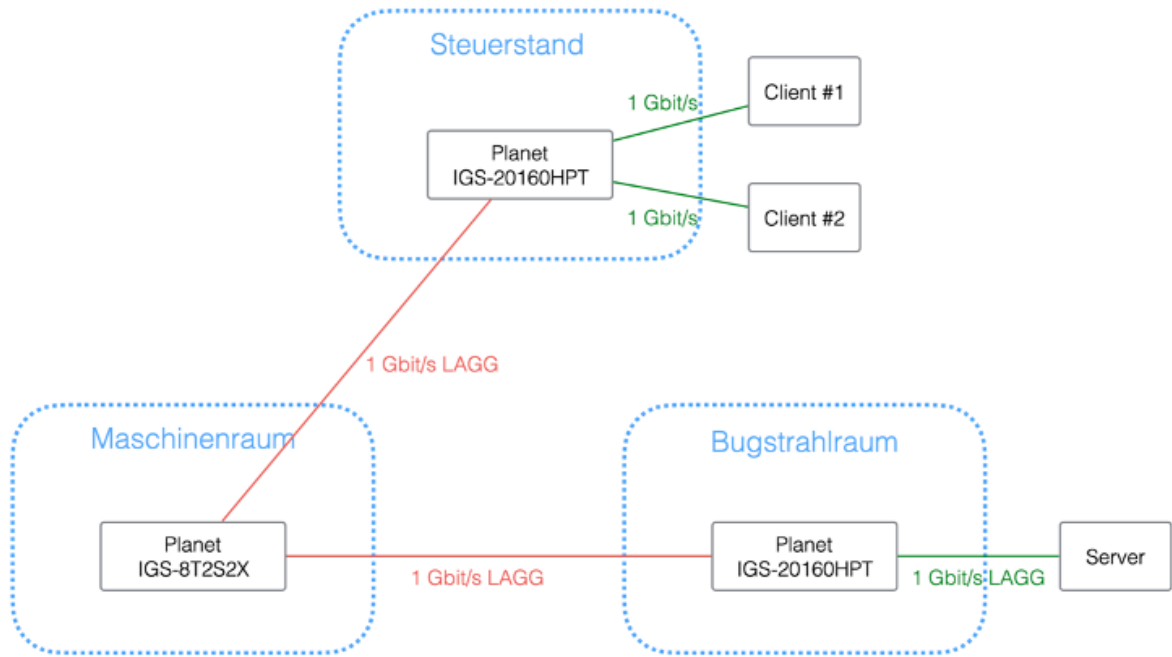


Abbildung 14 Testaufbau Netzwerk

Die relevanten Ergebnisse sind in Abbildung 15 („Bandbreiten für kontinuierliche Schreibzugriffe auf den Server für Testdateien mit 2000 MByte Größe“) dargestellt und zeigen, dass eine kumulierte Bandbreite von > 1 Gbit/s erzielt werden kann.

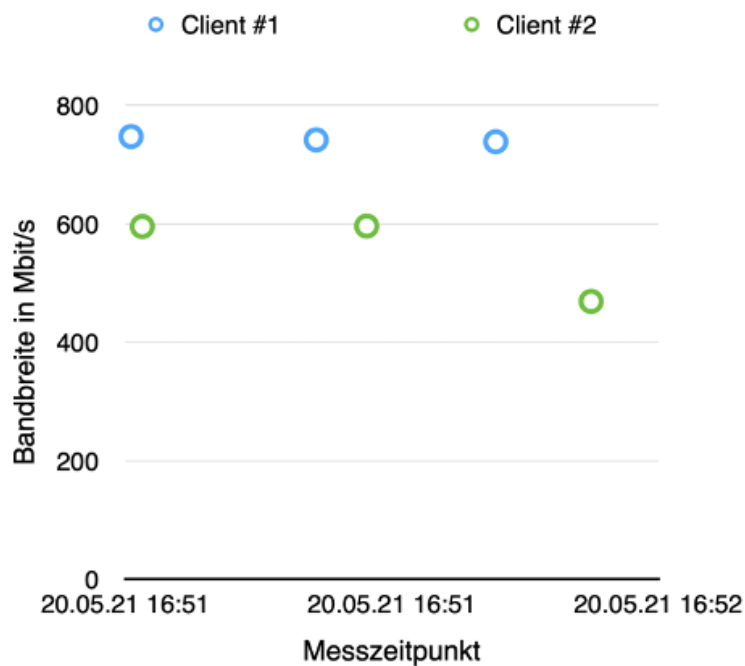


Abbildung 15 Bandbreiten für kontinuierliche Schreibzugriffe auf den Server für Testdateien mit 2000 MByte Größe

Neben der Demonstration der Funktionalität von LAGG, wird mit diesem Test auch die generelle Funktionalität des Uplinks getestet. Im Labor wird hierfür der Lichtwellenleiter verwendet, der später auf dem Testschiff installiert wird.

8.2.19 Installation, Kalibrierung und Inbetriebnahme der Sensorik für Navigationslösung

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

Tabelle 4: Übersicht der montierten Hardware

Pos.	Hardware	Anzahl	Beschreibung und Einsatzgebiet	Positionierung am Versuchsträger
1	GNSS / GPS-Antennen 	2	Die ausgewählten GNSS-Antennen empfangen die GPS- und Galileo-Signale, die durch einen GNSS-Empfänger zu Rohdaten für das Navigationsfilter verarbeitet werden können. Es wurden zwei gleichartige Antennen zur Realisierung eines Dual-Antennensystems beschafft, um das Navigationsfilter bei der Orientierungsschätzung zu unterstützen.	Im oberen Bugbereich des Versuchsträgers auf einem dafür vorgesehenen Sensorhalter
2	Dual-Antennen-GNSS-Empfänger 	1	Zusammen mit den oben genannten GNSS-Antennen stellt der Dual-Antennen-GNSS-Empfänger die Satellitennachrichten und eine (ungenau) Positionsbestimmung sowie andere relevante Daten für das Navigationsfilter zur Verfügung.	Im Technischschrank des Bugstrahlraums
3	9 DoF-MEMS-IMU 	1	Die inertielle Messeinheit (Inertial Measurement Unit – IMU) erfasst mittels eines Gyroskops und Beschleunigungssensoren die relative Bewegung des Schiffs, die als Teil des Navigationsfilters verarbeitet werden.	Im oberen Bugbereich des Versuchsträgers auf einem dafür vorgesehenen Sensorhalter
4	Echtzeit-Rechner Bachmann 	1	Auf diesem System werden das Navigationsfilter und die Schiffsregelung realisiert. Das Echtzeitsteuerungssystem ermöglicht eine sichere Ausführung der Software durch deterministische Echtzeit und Datenausgabe. Zudem steht bei diesem System eine effiziente Entwicklungsumgebung zur Verfügung, um die softwaretechnischen Funktionalitäten zu validieren.	Im Technischschrank des Bugstrahlraums
5	High-End-Industrierechner 	1	Mithilfe dieses High End Industrierechners werden Algorithmen, die eine große Rechenleistung benötigen, entwickelt und ausgeführt. Dazu zählen insbesondere die Trajektorienplanung und nichtlineare Optimierungen. Der Rechner dient zudem zur Datenerhebung während Messfahrten.	Im Technischschrank des Bugstrahlraums
6	Industrie-LTE-Mobilfunkrouter 	1	Ein industrieller LTE-Mobilfunkrouter mit zwei redundanten SIM-Karten wurde eingesetzt, um die Korrekturdaten von einem zentralen Navigationsdienst zu empfangen. Dadurch können signifikante Verbesserung der Navigationslösung im Navigationsfilter erreicht werden. Zusätzlich	Im Technischschrank des Bugstrahlraums

			steht dieser Router im Konsortium für die kabellose Kommunikation zwischen dem Schiff und der Landesseite zur Verfügung.	
7	Industrie-5G-Mobilfunkrouter 	1	Um eine Redundanz der Datenübertragung zwischen dem Testschiff und Steuerzentrum zum robusten Datenaustausch zu realisieren, wurde ein industrieller 5G-Mobilfunkrouter im Maschinenraum am Heckbereich eingesetzt.	Im Technischrank im Maschinenraum

Hardwareausrüstung: Tabelle 4 stellt eine Übersicht der im Projekt ausgewählten Hardware dar, die nach dem Systemkonzept zur Maximierung der Flexibilität und Wahrnehmungsqualität am Versuchsträger verteilt im Bugbereich und Heckbereich ausgerüstet wurden. Ein Leitungsplan für die Datenübertragung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern festgestellt. Dazu wurden eine Glasfaserleitung für das lokale Netzwerk und eine Koaxialleitung zwischen der Zweit-GNSS-Antenne im Heckbereich und dem GNSS-Empfänger im Bugbereich angelegt. Des Weiteren befinden sich alle anderen Sensoren (die Haupt-GNSS-Antenne und die inertielle Messeinheit) der RWTH im Bugbereich. Für die Mobilfunkrouter wurden Antennen mit passender Leitung sowohl im Bugbereich als auch im Heckbereich montiert. Abbildung 16 zeigt die Sensorausrüstung der RWTH. Das montierte Dual-Antennen-GNSS-System ermöglicht eine robuste Sensorauslegung, indem die zwei Antennen mit einem großen Hebelarm (ca. 93m) jeweils vorne und hinten am Versuchsträger montiert sind. Diese Antennenauslegung stellt eine redundante Architektur dar, um die Satellitensichtbarkeit zu erhöhen, wenn eine Antenne aufgrund der Brückendurchfahrt blockiert ist.

Im Gegensatz zu den Sensoren wurden die Rechenhardware und Netzwerkkomponenten in den Räumlichkeiten des Versuchsträgers montiert, siehe Abbildung 17. Die gesamte Konnektivität wurde mittels eines gemeinsamen Netzwerks vom Projektpartner argonics gestaltet, sodass eine direkte und latenzfreie Datenübertragung zwischen der verteilten RWTH-Hardware möglich ist.

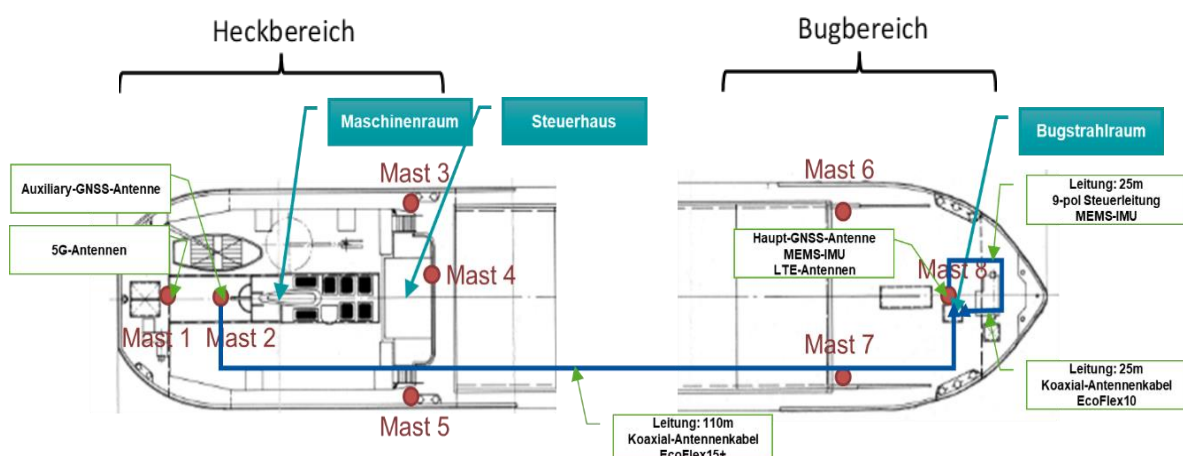


Abbildung 16 Draufsicht des Versuchsträgers mit Leitungsplan

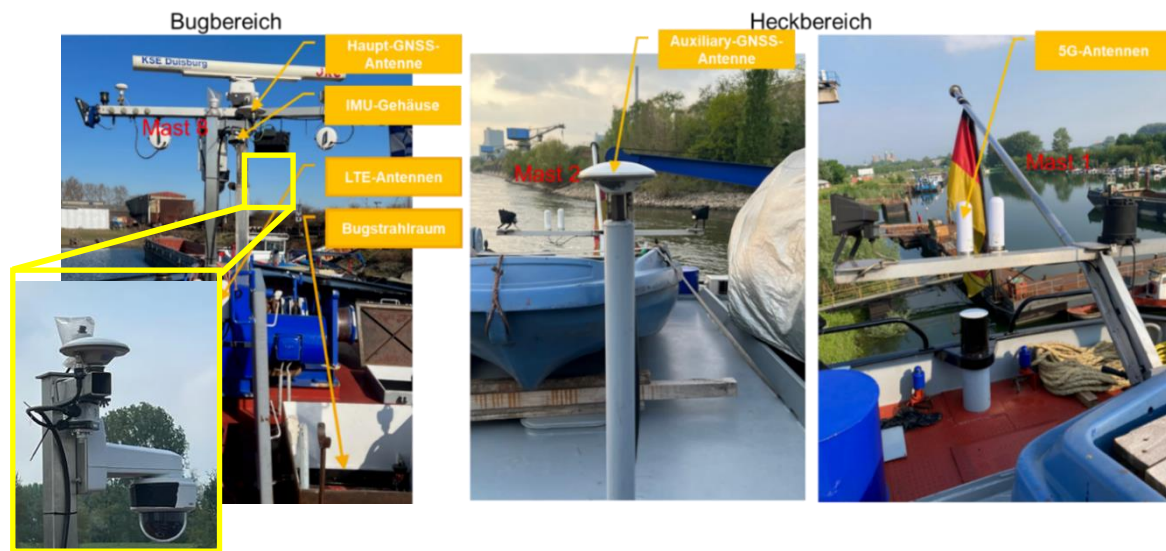


Abbildung 17 Sensorausrüstung

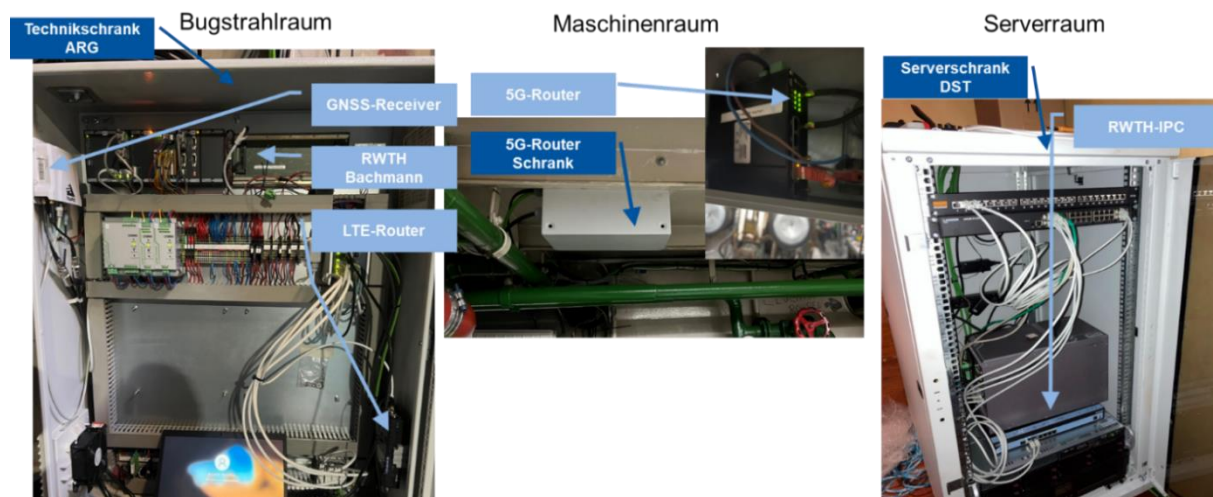


Abbildung 18 Ausrüstung der Rechenhardware und Netzwerkkomponenten

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

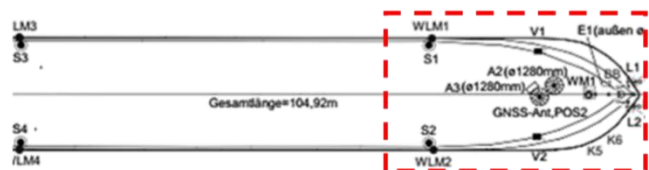


Abbildung 19 Fehlende Sensoren bei der extrinsischen Kalibrierung (markiert in rot)



Abbildung 20 Extrinsische Sensorkalibrierung mit der RWTH-Totalstation

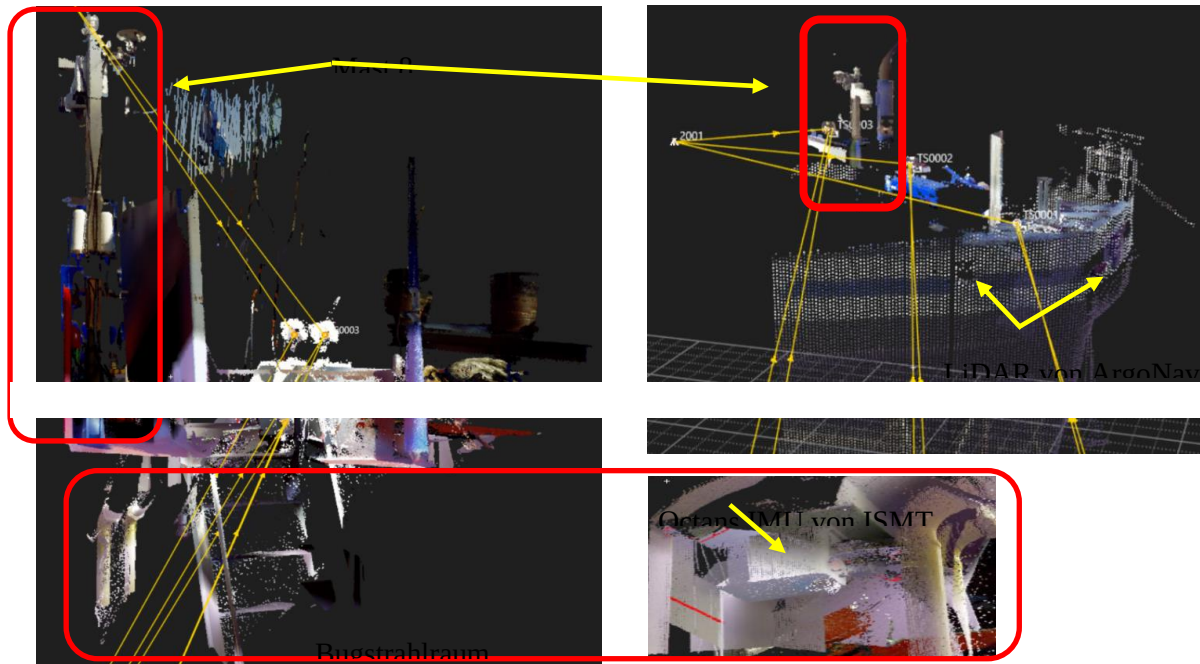


Abbildung 21 Vermessene Punktwolke zur Bestimmung der statischen Koordinatentransformationen der Sensoren

Hardwarekalibrierung: Um die extrinsischen Transformationen aller Sensoren der RWTH und der Projektpartner in einem lokalen Koordinatensystem zu bestimmen, wurde eine Vermessungsfirma nach der Hardwareausrüstung beauftragt. Allerdings kann diese Vermessung nicht die Transformationen aller Sensoren (z.B., zum Referenzsensor Octans) abdecken (siehe Abbildung 19). Zur Ergänzung der fehlenden extrinsischen Sensorparameter hat die RWTH mit der Totalstation eine Vermessung durchgeführt, siehe Abbildung 20. Mit Hilfe der vermessenen Punktwolke der Sensorausrüstung (Abbildung 21) lassen sich die unbekannten Transformationen bestimmen.

8.2.20 Installation auf dem Schiff

Bei einem Termin auf der Schiffswerft Braun in Speyer im Juni 2021 wurde die Installation der Schaltschränke und das Verlegen von Kabeln durchgeführt (siehe Abbildung 22). Die für die Installation der Strömungssensorik und der Lidarsensoren erforderlichen Schweißarbeiten wurden ebenfalls bei dieser Gelegenheit durchgeführt (siehe Abbildung 23). Zudem wurde die Lage und Ausrichtung der Sensoren genau vermessen, das Messprotokoll ist im Anhang 24.1.1 beigefügt. Des Weiteren erfolgte die Integration der Ruderanlage in die Navigationsplattform und die Installation der Bedienelemente für den Wendegeschwindigkeitsregler der Navigationsplattform.



Abbildung 22 Testschiff Ernst Kramer auf der Helling der Schiffswerft Braun in Speyer



Abbildung 23 Installation der ADCP-Strömungssensoren (Aqua Doppler Current Profiler)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Schaltschränke der Navigationsplattform im Maschinenraum, im Steuerstand und im Bugstrahlraum nach der Installation beim Werfttermin.



Abbildung 24
Schaltschrank der Navigationsplattform im Maschinenraum



Abbildung 25
Schaltschrank der Navigationsplattform im Steuerhaus

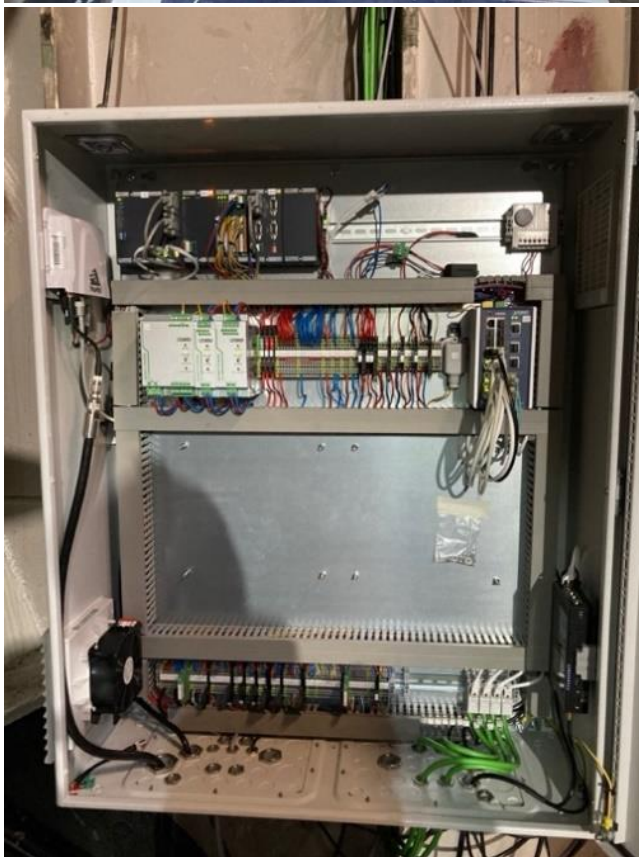


Abbildung 26
Schaltschrank der Navigationsplattform im Bugstrahlraum

8.2.21 Propeller- und Rudermessungen

Auf der Ernst Kramer wurde Sensorik für Schub- und Drehmoment-Messungen installiert. Hierzu wurden Berechnungen zur Vorhersage der zu erwartenden Messgrößen durchgeführt. Die Berechnungen basierten auf den vom DST durchgeführten Modellversuchen, während derer unter anderem Schub und Drehmoment am Modellpropeller gemessen wurden. Für die Vorhersage wurden diese Werte auf die Großausführung skaliert und daraus Dehnungen der Propellerwelle berechnet. Die Messung von Schub und Drehmoment an der Großausführung ist mit jeweils zwei Dehnungsmessstreifen (DMS)-Vollbrücken erfolgt. Da die prognostizierten Dehnungen für beide Größen klein sind, entstehen nur sehr kleine Messspannungen. Das ausgewählte Telemetrie System der Firma IMC weist eine sehr hohe Messauflösung auf. Um die Ausgangsspannung zu erhöhen, wurden Halbleiter-DMS ausgewählt, die für die Messung kleiner Verformungen prädestiniert sind. Diese besitzen einen k-Faktor in der Größenordnung von 100, gegenüber einem k-Faktor von 2 bei herkömmlichen DMS. Dadurch ist das Ausgangssignal der Halbleiter-Messbrücken um einen Faktor von 50 höher. Das Telemetrie System wurde so aufgebaut, dass die Spannungsversorgung durch Induktion und die Datenübertragung über Funk realisiert wurde. Abbildung 27 zeigt jeweils eine aus Dehnungsmessstreifen (DMS) bestehende Wheatstone'sche Vollbrücke für die Schub- und die Drehmomentmessung. Für die beiden o.g. Messgrößen wurden zwei um 180° versetzte DMS-Vollbrücken angebracht.



Abbildung 27 DMS auf der Antriebswelle der Ernst Kramer

Zur Sensorversorgung, Signalkonditionierung und -übertragung wurden zwei Telemetriemodule auf der Propellerwelle angebracht. Die Stromversorgung erfolgt induktiv. Abbildung 28 zeigt die vollständige Messtechnikinstallation auf der Antriebswelle mit Ummantelung zum Schutz vor Umgebungseinflüssen.



Abbildung 28 Komplettes Messsystem auf der Antriebswelle der Ernst Kramer

Die Signale wurden per Funk an eine Empfangseinheit übertragen, siehe Abbildung 29. Die Empfangseinheit transformiert die Messwerte in ± 10 V-Signale, die an die zentrale Datenerfassung des Projekts weitergeleitet werden. Die Messwerte wurden mit dem restlichen Datenstrom des Schiffes kontinuierlich an Land übertragen und gespeichert.



Abbildung 29 Telemetrie-Empfangseinheit

Da die Erfassung der Propeller- oder Maschinendrehzahl über die schiffsinternen Systeme (Bus der Hauptmaschine) nicht möglich war, wurde ein System zur Messung der Drehzahl der Antriebswelle beschafft und installiert. Hierfür wurden zwei induktive Sensoren im Bereich eines Flansches der Antriebswelle montiert, siehe Abbildung 30. Die Sensoren wurden so eingestellt, dass diese von zwei Schraubenköpfen an der Flanschverbindung ausgelöst werden. Da beide Sensoren zueinander versetzt angeordnet waren, konnten die Drehzahl sowie die Drehrichtung der Welle erfasst werden. Die Sensoren waren an das Datenerfassungssystem des Projektpartners Argonics angeschlossen und die Daten wurden über die Mobilfunkverbindung an den Server der BAW übertragen. Da neben dem Drehmoment nun auch die Drehzahl erfasst wurde, konnte die Antriebsleistung des Schiffes berechnet werden. Über den ebenfalls gemessenen Schub sind Vergleiche zur experimentell ermittelten Freifahrtkurve möglich. Im weiteren Verlauf wurden die Drehzahlsensoren noch durch einen Laser-Sensor ersetzt, der sich als resistenter gegenüber mechanischen Beanspruchungen zeigte.



Abbildung 30 Hall-Sonden zur Messung der Drehzahl und der Drehrichtung an der Antriebswelle

Des Weiteren wurde ein inkrementaler Drehgeber auf der Ernst Kramer installiert, um den Ruderwinkel mit einer hohen Frequenz ($> 100 \text{ Hz}$) und einer Genauigkeit von $0,1^\circ$ zu messen. Anhand der Messdaten konnte u.a. die Ruderlegegeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit berechnet werden.

Für die Manövrierversuche wurde ein zusätzlicher Messverstärker im Schiff installiert, so dass die Messsignale der Schub- und Drehzahlmessung, der Propellerdrehzahl und des Ruderwinkels mit einer Abtastrate von 100 Hz gespeichert werden können. Die Messwerterfassung für die Umsetzung der Fernsteuerung des Schiffes erfolgt für die meisten Größen mit einer Abtastrate von 1 Hz . Die parallele Abtastung einiger Sensoren mit einer höheren Frequenz erlaubte, das dynamische Verhalten des Schiffes genauer zu erfassen und die Parametrierung und Validierung des Manövriermodells erfolgreich durchzuführen.

8.2.22 Weitere Installationstermine und Tests

Im Rahmen verschiedener weiterer Installationstermine und Testfahrten wurden auf dem Testschiff Arbeiten, die beim ersten Werftermin nicht beendet werden konnten, abgeschlossen.

Die Schnittstelle zur Ansteuerung des Bugstrahlruders über Modbus-TCP wurde in die Software der Navigationsplattform integriert und Funktionstests durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde das Starten und Stoppen der Antriebsmaschine des Bugstrahlruders ebenfalls fernsteuerbar gemacht.

Die Verkabelung der Kameras wurde in den Schaltschränken und an den Kameras angeschlossen und die einzelnen Kameras getestet. Die Kameras werden über Power-Over-Ethernet über Netzkabel mit Spannung versorgt. In den Schaltschränken sind entsprechende Netzwerkschalter verbaut, die die Spannungsversorgung zur Verfügung stellen. Im Steuerstand wurde ein PC installiert, um die Kamerabilder den Schiffsführern an Bord zugänglich zu machen.

Eine Wetterstation zur Windmessung am Bug wurde installiert, die zugehörige Verkabelung der Energieversorgung und der Datenleitungen fertiggestellt. Die Funktion wurde geprüft.

Des Weiteren wurde ein zusätzlicher Mobilfunkrouter im Schaltschrank im Bugstrahlraum installiert, der für Fernwartungszwecke vorgesehen ist.

Um die hochgenaue Messung der Position, Lage und Geschwindigkeit des Schiffes zu ermöglichen wurde ein hochgenauer GNSS-Empfänger mit zwei Antennen im Bugstrahlraum installiert. Dieser stellt

seine Messdaten über eine Netzwerkschnittstelle zur Verfügung. Zusätzlich wurden für eine weitere Verbesserung der Messwerte zwei inertielle Messeinheiten im Bugstrahlraum installiert. Alle Geräte wurden in die Navigationsplattform eingebunden und nach der Installation getestet.

Eine speicherprogrammierbare Steuerung für die Umsetzung des Navigationsfilters wurde ebenfalls im Schaltschrank im Bugstrahlraum installiert.

Im Steuerstand wurde der Ladungsmesser und das Echolot über serielle Schnittstellen an die Navigationsplattform angeschlossen und getestet. Außerdem wurde der Wendegeschwindigkeitsregler sowie das Bahnführungssystem argoTrackPilot in die Navigationsplattform integriert und während einer Testfahrt parametrieren. Eine Schnittstelle zum elektronischen Kartensystem des Herstellers Periskal wurde installiert, um den Systemzustand und die Leitlinien des Bahnführungssystems anzeigen zu können.

Die fünf Lidarsensoren wurden in den dafür vorgesehenen Halterungen angebracht und die Stromversorgung sowie die Netzwerkverkabelung installiert. Im Steuerhaus wurde eine Anzeige für die Bildsignale der Lidarsensoren installiert, um die Informationen den Schiffsführern an Bord zur Verfügung zu stellen.

Es wurden zwei weitere PCs im Steuerhaus installiert, die der Erfassung von Front- und Heckradar dienen. Diese PCs reichen die Radarbilder über das Schiffsnetzwerk und die Mobilfunkverbindung in digitaler Form an den Fernsteuerstand weiter. Zusätzlich wurde ein elektronisches Kartensystem mit überlagelter Anzeige des Radarbildes im Steuerstand installiert.

Die Strömungssensoren (ADCP) im Bug wurden bei einem weiteren Werftaufenthalt zusätzlich mit Schutzblechen versehen, um die empfindliche Sensorik vor Beschädigungen durch Treibgut zu schützen.



Abbildung 31 Bedienpult für argoPilot und argoTrackPilot



Abbildung 32 Steuerstand mit RADARpilot720° Anzeige und Anzeige der Laserscannerbilder

9 Datenerfassung, -auswertung und -bereitstellung.

Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Daten wie Strömungs-, Mess- und Infrastrukturdaten erhoben. Diese Daten sollen sowohl den Projektpartnern als auch perspektivisch allen Interessierten im Sinne der Digitalisierung der Binnenschifffahrt digital und online zur Verfügung gestellt werden.

9.1 Spezifikationen für Datenerfassung, -formate und -ablage

Inhalt des Arbeitspaketes 4100 ist die Festlegung der Datenformate und die Definition der Anforderungen an den Datenserver und an die weiteren (Mess-) Daten, die von der BAW zur Verfügung gestellt werden sollen. Hierzu wurde mit den Projektpartnern ein Datenaustauschkonzept abgestimmt und daraus ein Anforderungskatalog für die Messdaten sowie für einen Datenbankserver abgeleitet. Dieser Anforderungskatalog bildet die Grundlage für alle Arbeiten im AP 4000.

Die Abstimmung mit den Projektpartnern bezog sich auf die benötigten Infrastrukturdaten, die Messdaten des Testschiffes sowie weiterer Testplattformen (Binnenschiffe) und die generierten Strömungsdaten. Abbildung 33 gibt einen Überblick über den Datenaustausch, wohingegen Tabelle 5 den vereinbarten Datenaustausch für die einzelnen Daten im Detail beschreibt. Abbildung 40 beschreibt das Konzept der Datenbereitstellung für einen eigens entwickelten Webserver im Einzelnen.

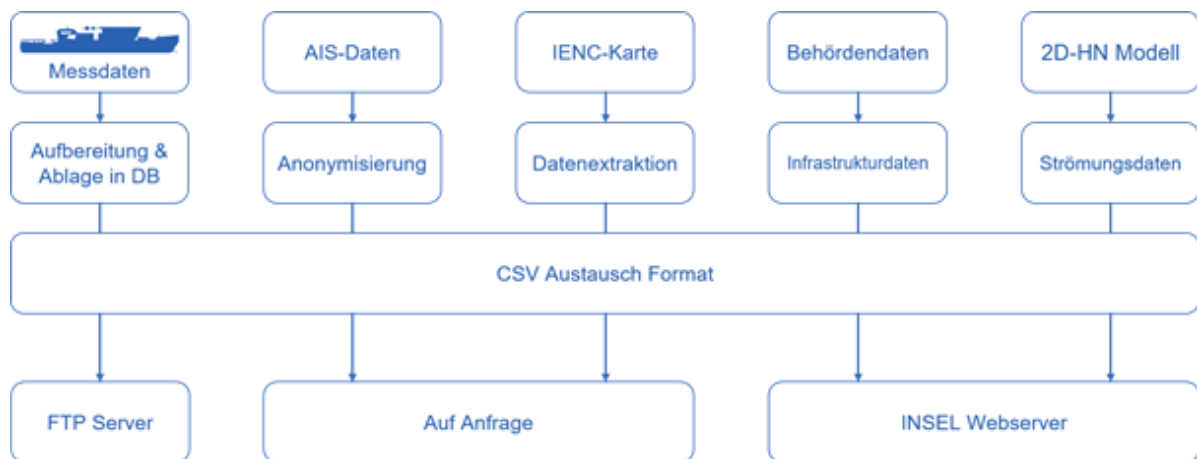


Abbildung 33 Konzept des Datenaustausches mit den Projektpartnern nach Art der Daten

9.2 Infrastrukturdaten und Strömungsdaten

Das Fahrverhalten von Binnenschiffen auf Binnenwasserstraßen wird insbesondere durch die hydraulischen Randbedingungen, Wassertiefe und Strömung sowie durch die Fahrrinnenlage, die Bauwerke und die örtlichen Verkehrsregeln bestimmt. In diesem Arbeitspaket 4200 sollen daher alle erforderlichen Infrastrukturdaten, für die im AP 2000 definierten Demonstrationsgebiete, bereitgestellt werden. Die Infrastrukturdaten umfassen statische und dynamische Gewässerdaten sowie Bauwerksdaten (z. B. Gewässerdaten, Lage der Fahrrinne etc.) und Strömungsdaten (Wassertiefen, Geschwindigkeiten und Wasserspiegellagen).

Die Strömungsdaten werden mit Hilfe von zweidimensionalen tiefengemittelten Strömungsmodellen, auch 2D-hydrunummerisches Modell (im Folgenden 2D-HN Modell) genannt, für eine Vielzahl (Fächer) von konstanten Wasserspiegellagen bei stationären Abflüssen generiert. Um die Genauigkeit der berechneten Strömungsdaten zu erhalten, müssen die Strömungsmodelle mit den aktuell verfügbaren hydrographischen Daten aktualisiert werden. Der Fächer der Strömungsdaten wird als Punktwolke (flussachsenorientiertes Raster) über eine API eines Webdienstes auf einem Server der BAW zur Verfügung gestellt. Zusammen mit der Angabe eines Wasserstandes bzw. Abflusses an einer Pegelstation (z. B. verfügbar über Pegelonline oder ELWIS) können die Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen entlang eines Schifffpfades räumlich und wasserstandsabhängig interpoliert werden.

Tabelle 5: Übersicht der Festlegung von Datenaustauschformate und die Bereitstellung

Daten	Austauschformat	besondere Anforderung	Plattform
Strömungsdaten als Datei (punktweise Daten)	csv-Datei mit Kopfzeile	auf Anfrage, solange bis der INSEL Webserver online ist.	geschützter Austausch per Cloud
Strömungsdaten über den INSEL Webserver (punktweise Daten)	Json und HTML Format, per API oder GUI		INSEL.baw.de Webserver
Strömungsdaten interpoliert	Json und HTML Format, API oder GUI		INSEL.baw.de Webserver
Messdaten Ernst-Kramer (EK) 10 Minuten Scheiben	csv-Datei mit Kopfzeile	Zugang benötigt	FTP-Server
Messdaten Ernst-Kramer (EK) Tagesscheiben	csv-Datei als Tagesscheibe mit 5 Kopfzeilen	Zugang benötigt	FTP-Server

Messdaten weitere Messplattformen	gleiches Format wie EK-Tagesscheiben	auf Anfrage	geschützter Austausch per Cloud
AIS-Daten	csv-Datei, als Tagesscheiben mit Kopfzeile	auf Anfrage anonymisiert und mit Nutzungsvereinbarung	geschützter Austausch per Cloud
Infrastrukturdaten:			
Pegelstationsinformationen	Json und HTML Format, API oder GUI		INSEL.baw.de Webserver
Abfluss Referenzwerte der Strömungssimulation	Json und HTML Format, API oder GUI		INSEL.baw.de Webserver
Wasserstände Referenzwerte der Strömungssimulation	Json und HTML Format, API oder GUI		INSEL.baw.de Webserver
IENC (alle Daten)	Json-Format		per Cloud

Weitere Gewässer- und Bauwerksdaten werden in statischer Form über die IENC zur Verfügung gestellt, für zukünftige Weiterentwicklungen der Kartendaten siehe auch Ausblick und Weiterentwicklungsmöglichkeiten des INSEL Webservers (<https://insel.baw.de>). Allerdings gilt der allgemeine Ansatz, dass Daten, die auf anderen Plattformen (IENC, WSV usw.) zur Verfügung gestellt werden, nicht doppelt bereitgestellt werden.

9.2.1 Beschreibung der Strömungsmodelle

Die 2D-HN Modellierung des frei fließenden Rheins besteht aus fünf Modellabschnitten. Für die Generierung der Rechengitter wurden die Digitalen Geländemodelle (DGM) von der VSW und den VSÄ für die Flussschlauch- und die Vorlandbereiche verwendet. Telemac-2D wird in der BAW als Standard 2D-HN Simulationssoftware eingesetzt und wurde für die Modelle Niederrhein, Mittelrhein und Oberrhein verwendet. Die Lückenschlussmodelle wurden mit DuMu^x simuliert. Der Modellaufbau umfasst sowohl die Erstellung des Rechengitters auf Basis verfügbarer Peildaten, Bauwerksdaten und Geländehöhen der Vorländer und Flussinseln als auch das Rauheitsmodell, das die ortsspezifische Zuordnung von Rauheitswerten im gesamten Modellgebiet entsprechend der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit ermöglicht.

Für die Generierung des Rechengitters werden neben den topographischen Daten, die als Punktwolken oder Rasterdaten vorliegen, Bruchkanten zur Beschreibung der Lage und Höhe von strömungsrelevanten Strukturen benötigt. Bruchkanten werden z. B. zur Darstellung von Bauwerken (Buhnen, Längsbauwerke etc.) oder Gradientenänderungen an Böschungskanten generiert und dürfen im Zuge der nachfolgenden Gittergenerierung und Optimierung nicht mehr verschoben werden.

Die Generierung des Rechengitters erfolgt ausgehend von den Bruchkanten unter Verwendung verschiedener Gitterverfeinerungskriterien (z. B. Kantenlängen- und Tiefenfehlerkriterium), die neben der Topologie des Rechengitters auch den Grad der Übereinstimmung der Sohl- und Geländehöhen innerhalb des Rechengitters mit den topographischen Daten bestimmen. Die Vorprozessierung erfolgte mit dem Softwarepaket Smile u. a. mit dem Gittergenerierungstool Janet der Smile consult GmbH (Christoph Lippert, 2002).

Die hydronumerischen Simulationen wurden mit Telemac-2D (Hervouet, 2007) als Teil der Telemac Open Source Suite durchgeführt. Telemac-2D löst die tiefgemittelten Flachwassergleichungen auf unstrukturierten Dreiecksgittern (Abbildung 34a). Die Ergebnisse an jedem Knoten eines Rechengitters sind unter anderem die Wassertiefe und die tiefgemittelten vektoriellen Fließgeschwindigkeiten. Die

turbulente Viskosität wird mit Hilfe des Elder-Modells (Wilson, Hervouet, & Bates, 2002) approximiert, das neben der Schubspannungsgeschwindigkeit die jeweilige Wassertiefe zur Berechnung der ortsspezifischen, tiefgemittelten turbulenten Viskosität verwendet.

Das Berechnungsverfahren DuMu^x basiert auf einem unstrukturierten, knoten- und elementbasierten Dreiecksnetz. Um ein mögliches Sägezahnmuster des Rechengitters im Böschungsbereich zu vermeiden, wurde mit Hilfe eines Trassierungsalgorithmus eine volumenneutrale Modifikation des Rechengitters in diesen Bereichen durchgeführt. Das Rechengitter selbst wurde dabei nicht verändert. Lediglich die Sägezähne im Böschungsbereich wurden durch Terrassen ersetzt. Das Rechengitter wurde mit Janet erstellt (Abbildung 34b).

Die für den Modellaufbau verwendeten Komponenten und die Prozessschritte zur Modellerstellung sind in Abbildung 8 als Flussdiagramm dargestellt. Es folgt die Berechnung der abflussbasierten Simulationsergebnisse und die Generierung der gerasterten Strömungsdaten, die auf dem INSEL Webserver zur Verfügung gestellt werden (siehe 9.2.5). Die Komponenten Kalibrierung und Validierung wurden zur Vereinfachung aus der Darstellung entfernt.

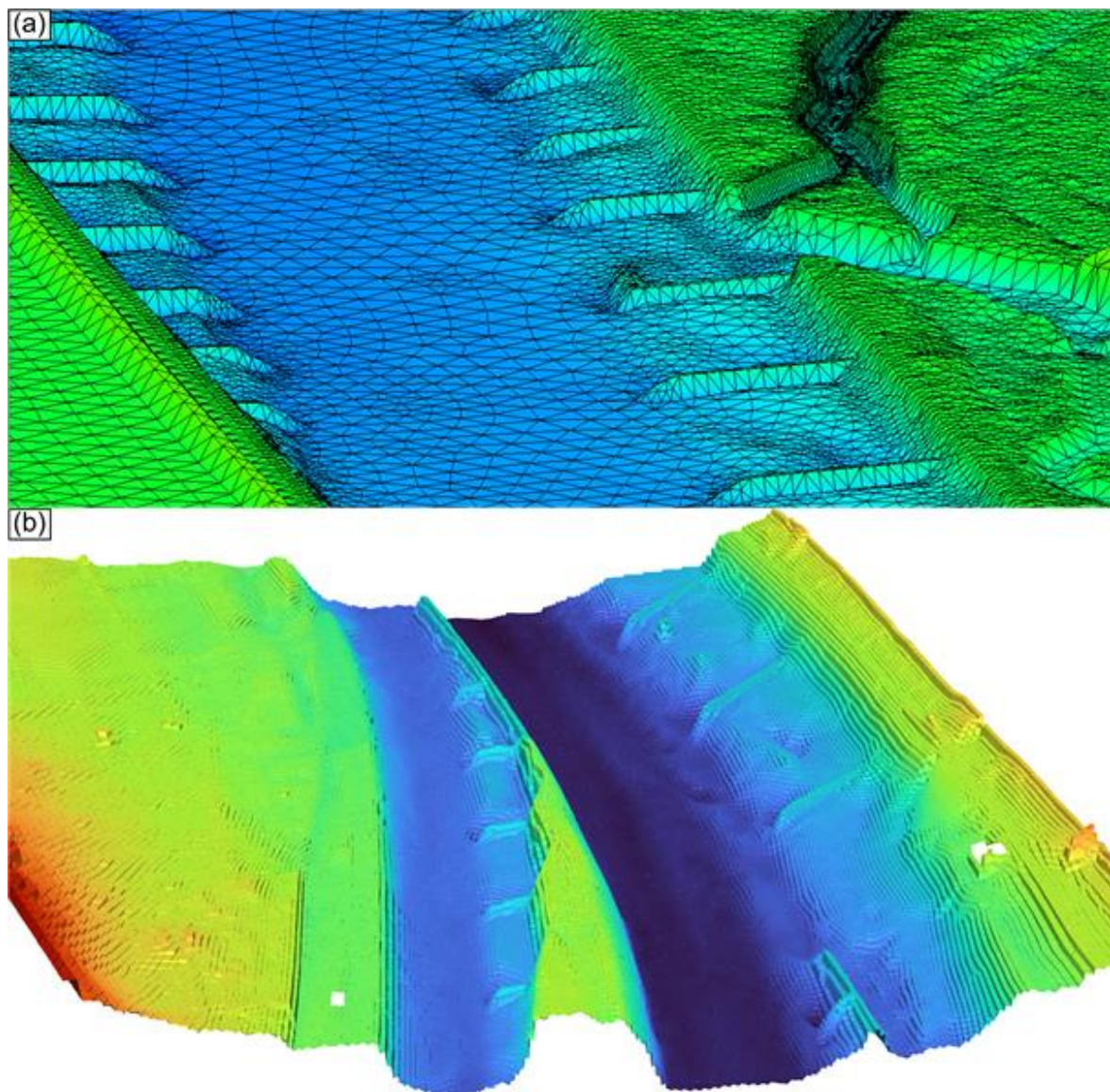


Abbildung 34 3D-Ansicht des knotenbasierten (a) und elementbasierten (b) Rechengitters (Modellausschnitt), das für die 2D-HN Simulation mit Telemac-2D (a) und DuMu^x (b) verwendet wurde.



Abbildung 35 Vereinfachte Darstellung des 2D-HN Modellaufbaus, Berechnung der abflussbasierten Simulationsergebnisse und Generierung der gerasterten Strömungsdaten zur Bereitstellung.

9.2.2 Generierung der Strömungsdaten

Die Strömungsdaten für alle 47 Abflüsse werden nacheinander in einem Simulationslauf generiert. Dabei wird eine Treppenfunktion mit 47 verschiedenen Anfangsbedingungen iteriert. Nach Konvergenz der Simulation und Auslesen der Strömungsdaten wird die nächste Anfangsbedingung eingestellt. Die vorgegebenen Abflüsse sind z. B. für Emmerich von 800 m³/s, 1000 m³/s bis 10000 m³/s in 200 m³/s Schritten gestaffelt. Das Modell wird jeweils mit einer Abflussganglinie am Einlauftrand und einer Abfluss-Wasserspiegellagen-Beziehung am Auslauftrand initialisiert. Die Abflussganglinie wird für alle Abflüsse durch die Abflussverteilung zwischen dem Rhein und seinen Nebenflüssen bestimmt, siehe Abbildung 35. Die Modellabschnitte werden innerhalb einer Treppenfunktion nacheinander von Unterstrom nach Oberstrom berechnet, wobei jeweils die Ergebnisse der Abfluss-Wasserspiegellagen-Beziehung am Einlauftrand des unterstromigen Modellabschnitts als Randbedingung an den Auslauf des oberstromigen Modellabschnitts übergeben werden, siehe Abbildung 35. Dadurch wird ein stetiger Übergang zwischen den Modellabschnitten erreicht. Jeder Abfluss in der Treppenfunktion wird für 10 Echtzeittage simuliert, so dass die Simulationen einen stationären Zustand erreichen. Für die kürzeren Modelle (Lückenschlussmodelle 1 und 2) sind 7 Echtzeittage ausreichend. Die Simulationsergebnisse werden am Ende jeder Abflussstufe als stationäres Ergebnis ausgelesen und die Simulation wird mit neuen Anfangsbedingungen fortgesetzt, bis das gesamte Abflussspektrum von NW bis HWMII (47 Abflussstufen) simuliert ist.

Da die zwei Modellabschnitte Sankt-Goar bis Andernach und Andernach bis Bonn im Höhenbezugsystem DHHN16 sind, ergibt sich bei der Übergabe der Randbedingung zu den umliegenden Modellen (DHHN 92) eine minimale Höhenverschiebung, in Bonn beträgt der Versatz 23 mm (DHHN16 zu DHHN92, das DHHN92 liegt an dieser Stelle tiefer) und in Sankt-Goar beträgt der Versatz -8 mm (DHHN16 zu DHHN92, das DHHN16 liegt an dieser Stelle tiefer).

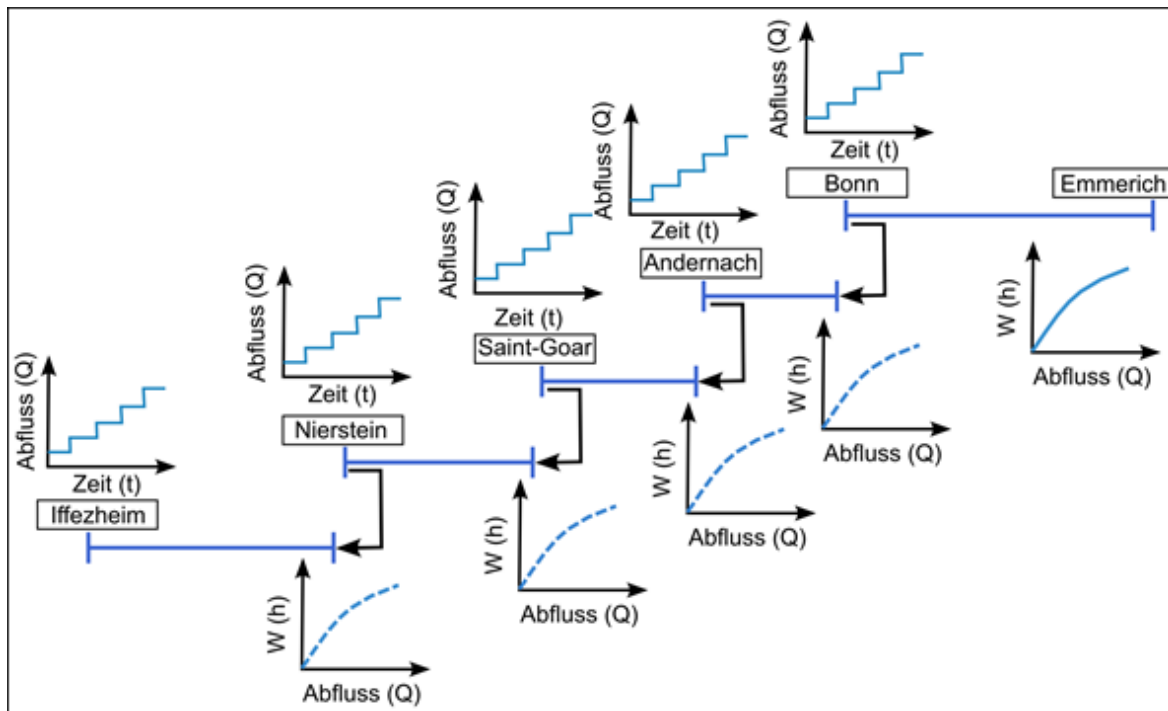


Abbildung 36 Modellkette der Simulation und deren Randbedingungen für die Generierung der Strömungsdaten. Die 2D-HN Simulation beginnt mit dem Niederrheinmodell (Bonn bis Emmerich), Leserichtung von rechts nach links. Die Ergebnisse der Abfluss-Wasserspiegellagen-Beziehung am Einlauf des unterstromigen Modellabschnitts werden als Randbedingung an den Auslauf des oberstromigen Modellabschnitts übergeben.

9.2.3 Modellkalibrierung und Validierung

Bei der Modellkalibrierung wird die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Wasserspiegellagen durch Anpassung der Rauheitsbeiwerte im 2D-HN Modell unter Berücksichtigung des vorgegebenen Abflusses minimiert. Bei der Kalibrierung des Modells von Andernach bis Bonn wurde für die Wasserspiegellagen eine maximale Abweichung von ± 10 cm festgelegt und darüber hinaus angestrebt, in möglichst großen Abschnitten Abweichungen von weniger als ± 5 cm zu erreichen. Bei Abweichungen kleiner als ± 5 cm ist jedoch zu beachten, dass die Messgenauigkeit der Wasserspiegelfixierungen in der gleichen Größenordnung liegt und mit ± 3 cm bis ± 5 cm angegeben wird (WSV, 2016). Für die Abflusswerte wurde im Rahmen der Kalibrierung eine maximale relative Abweichung von ± 5 % angestrebt. Die Messgenauigkeit für querschnittsgemittelte Abflüsse aus ADCP-Messungen liegt im Bereich von ± 3 % bis ± 5 % (WSV, 2016).

Die Genauigkeit der Modelle wird im Rahmen der Modellvalidierung abgeschätzt. Dabei werden Messdaten aus Wasserspiegel- und Geschwindigkeitsmessungen, die nicht für die Kalibrierung verwendet wurden, mit den Ergebnissen verglichen. Aus der Abweichung der gemessenen zu den berechneten Größen kann die Genauigkeit des Modells abgeschätzt werden. Die Abweichungen sind bei der Validierung in der Regel etwas größer als bei der Kalibrierung, da die Kalibrierparameter bei der Validierung nicht mehr angepasst werden.

Aus den fünf Modellabschnitten wurde beispielhaft die Vorgehensweise bei der Kalibrierung und Validierung für das Lückenschlussmodell 2 von Andernach bis Bonn beschrieben, siehe gleicher Abschnitt oben.

Für die Kalibrierung des Lückenschlussmodells 2 wurden eine Vielzahl von Wasserspiegellagen (Fixierungen) verwendet, welche Messergebnisse bei verschiedenen Abflussereignissen darstellen. Die Fixierungen decken Ereignisse von MNQ bis HWMII ab.

Für die vollständige Modellbeschreibung aller Modellabschnitte wird auf die entsprechenden Veröffentlichungen bzw. Berichte verwiesen. Dies sind für den Mittelrhein (BAW, 2019), den Niederrhein (BAW, 2017), das Lückenschlussmodell 1 (Sankt Goar - Andernach) (BAW, 2021a) und für Teile des Oberrheinmodells (BAW, 2021b).

In Abbildung 37 sind für das Ergebnis der Kalibrierung die Abweichungen der Wasserspiegellagen (oben) zwischen Berechnung und Messung und die zugehörigen Rauheitsbeiwerte des 2D-HN Modells im Flussschlauch (unten) dargestellt. Für das Abflussspektrum von 846 m³/s (entspricht etwa dem Abfluss bei GIW) bis 4100 m³/s (entspricht etwa dem Abfluss bei HWM I), bezogen auf den Pegel Andernach, sind die Abweichungen zwischen Messung und Berechnung kleiner als ± 10 cm und in weiten Bereichen kleiner als ± 5 cm. Diese Abweichung zwischen Simulation und Messung erfüllt die Anforderung von ± 10 cm Genauigkeit nach Kalibrierung. Für den Abfluss oberhalb HHW von 6300 m³/s bezogen auf den Pegel Andernach wurde ein höherer Rauheitsbeiwert im Flussschlauch des 2D-HN Modells von Rhein-km 612,6 bis 642,0 gewählt, da ohne diese Anpassung die Wasserspiegellagen im 2D-HN Modell größere Abweichungen zu den Messwerten aufweisen würden. Eine potentielle Ursache für die höhere Rauheit könnten Transportkörperstrukturen sein, die sich erst bei größeren Abflüssen ausbilden und eine zusätzliche Formrauheit darstellen. Die Abweichungen der Wasserspiegellagen liegen bei den untersuchten Abflüssen überwiegend unter ± 10 cm, lediglich im Abschnitt zwischen Rhein-km 637,0 und 641,0 treten teilweise auch größere Abweichungen auf.

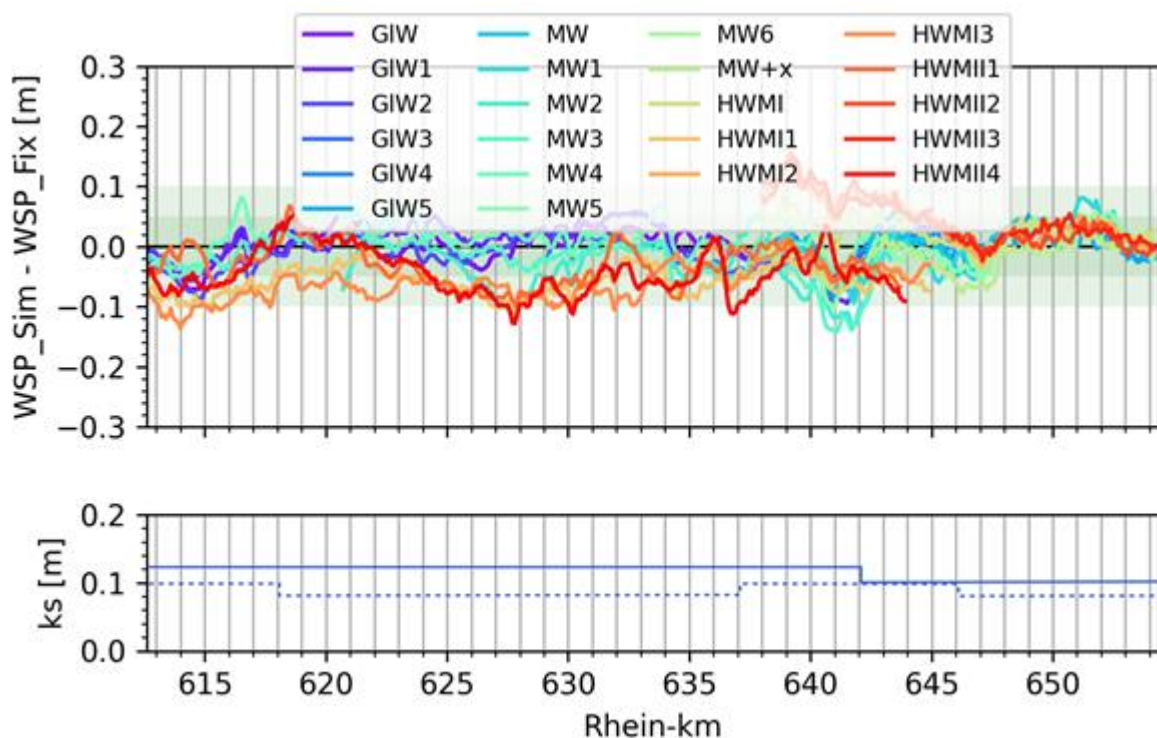


Abbildung 37 (a) Differenz der Wasserspiegellagen zwischen kalibriertem 2D-HN Modell und den zugehörigen Fixierungen. (b) Rauheitsbeiwerte im Flussschlauch (unten)

Gerasterte Strömungsdaten für den BAW INSEL Webserver

Die auf dem INSEL Webserver (BÖTT2024) bereitgestellten Strömungsdaten, siehe 9.2.8, basieren auf den Ergebnissen der stationären 2D-HN Simulation und bilden alle schiffbaren stationären

Abflussvarianten ab. Die Strömungsdaten sind für die Bereitstellung auf ein flussachsenorientiertes Raster (Punktwolke) mit einer Auflösung von 10 m × 10 m, bezogen auf den Flusskilometer und den Rechtswert, übertragen worden. Bei Telemac-Modellen bedeutet eine Übertragung, dass zwischen den drei Knoten des betreffenden Elementes interpoliert wird, bei DuMu^x bedeutet eine Übertragung, dass der Elementwert verwendet wird. Die Generierung des flussachsenorientierten Rasters (Punktwolke) wird auf Basis der Querprofile der Kilometrierung (DBWK2 Daten) vorgenommen. Der Kilometerwert ergibt sich aus dem anteiligen Abstand (zehntel) zwischen den Querprofilen (Hektometern), welche alle 100 m vorliegen. Der Rechtswert wird durch ein laterales Inkrement ausgehend von der Flussachse (Einteilungslinie) definiert, ein negativer Rechtswert bedeutet, dass der Punkt linksseitig der Flussachse ist, siehe Abbildung 38. Diese Bestimmung der Positionen wird als Stationierung (siehe 9.2.14) bezeichnet.

Die bereitgestellten Strömungsdaten sind zusammen mit den Geopositionen der zwei Koordinatensysteme UTM32e (ETRS89) und WGS84 und der flussachsenbezogenen Stationierung aufbereitet. Jeder Strömungsdatenpunkt enthält die folgenden Daten, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6 Beschreibung der Strömungsdaten, jeder Datenpunkt enthält folgende Informationen

Parameter	Beschreibung	Wertebereich (<i>kursiv gilt für den Rhein</i>)	Einheit
model_discharge	Modell ID, bezieht sich auf den Referenzabfluss an Pegel Emmerich	<i>800 – 10000</i>	m ³ /s
waterway_id	Bundeswasserstraßen Identifikationsnummer, Bezeichnung entsprechend der WSV	<i>3901</i>	
waterway_km	Wasserstraßen Kilometer (WWKM)	<i>334,1 – 852,0</i>	km
waterway_offset	Wasserstraßen Rechtswert, ausgehend von der Flussachse, linksseitig in WWKM negativ	<i>-930 – 990</i>	m
easting	Easting-Koordinate mit führender Zone, ETRS89 / UTM Zone 32N, EPSG:4647	31920782 – 33369825	m
northing	Northing-Koordinate, ETRS89 / UTM Zone 32N, EPSG:4647	3319207 – 8895057	m
longitude	Longitude-Koordinate, WGS84 EPSG:4326	3 – 18	°
latitude	Latitude-Koordinate, WGS84 EPSG:4326	30 – 80	°
bed_height	Sohlhöhe		m ü. NHN.
water_level	Wasserspiegellage, genauer als bed_height + water_depth		m ü. NHN.
water_depth	Wassertiefe		m
velocity_u	tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit <i>U</i> , in x-Koordinaten Richtung		m/s
velocity_v	tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit <i>V</i> , in y-Koordinaten Richtung		m/s

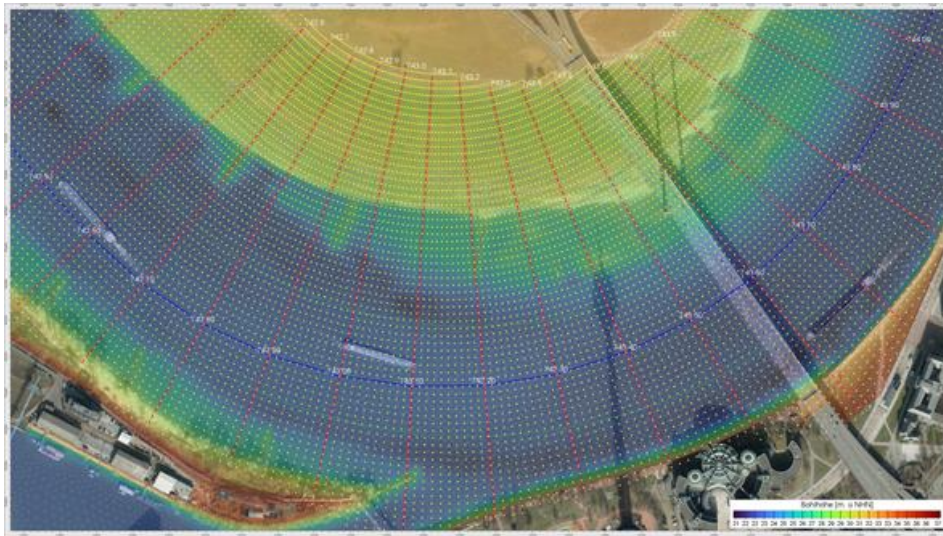


Abbildung 38 Beispiel einer Punktwolke (gelb) für die Übertragung von Strömungsdaten aus dem Modell in ein Gitter. Die roten, grünen und blauen Linien stellen die Hektometer, das linke/rechte Fahrwasser und die Flussachse dar. Luftbildquelle: © GeoBasis-DE / BKG

Rasterauflösung (Punktwolkenauflösung):

Die Entscheidung über die Rasterauflösung ist auf Basis der Rechengitterauflösung der Strömungsmodelle, durch die Abschätzung des zu erwartenden Fehlers und der resultierenden Datengröße, getroffen worden. Die durchschnittliche Rechengitterauflösung ist für alle fünf Modellstücke größer als 5 m Kantenlänge, wie in Abbildung 36 dargestellt. Das heißt eine Rasterauflösung kleiner als $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ würde nicht zu einer verbesserten Genauigkeit führen.

Die Genauigkeit bleibt bei einer Rasterauflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ weitgehend erhalten. Dies zeigt auch ein exemplarischer Vergleich in Abbildung 38. Vergleicht man die Ergebnisse mit einer Auflösung von 5 m und 10 m in Querrichtung, so bleiben die Geschwindigkeiten und Wassertiefen auch bei stark gekrümmter Strecke weitgehend gleich. Wie in Abbildung 38 dargestellt, kommt es durch eine Änderung der Rasterauflösung von $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ zu $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ nur an den Ufern zu erkennbaren Fehlern. In der Fahrrinne, dort wo es für die Schifffahrt relevant ist, kommt es zu keinen erkennbaren Ungenauigkeiten. Somit ist eine gewählte Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ausreichend. Ein weiteres Argument ist die resultierende Datenmenge, bei einer $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ Rasterauflösung wäre diese ungefähr viermal so groß.

9.2.4 Abflussverteilung im Rhein und Nebenflüsse

Im Rhein und seinen Nebenflüssen können eine Vielzahl unterschiedlicher Abflussereignisse natürlicherweise auftreten. Das wahrscheinlichste Szenario ist jedoch, dass im Rhein und seinen Nebenflüssen ein ähnliches Abflussereignis auftritt. Das bedeutet, dass bei einem mittleren Wasserstand im Rhein auch ein mittlerer Wasserstand in den Nebenflüssen zu erwarten ist. Als Referenz für das Abflussspektrum wird der Pegel Emmerich verwendet und die Abflüsse der Nebenflüsse werden auf Basis des Pegels Emmerich berechnet. Das in Abbildung 39 dargestellte Abflussspektrum reicht von einem minimalen Abfluss von $800\text{ m}^3/\text{s}$ bis zu einem maximalen schiffbaren Abfluss von $10000\text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Emmerich. Die Strömungssimulation wurde alle $200\text{ m}^3/\text{s}$ Abfluss am Pegel Emmerich durchgeführt. Das bedeutet, dass am Pegel Emmerich Abflüsse von $800\text{ m}^3/\text{s}$, $1000\text{ m}^3/\text{s}$, $1200\text{ m}^3/\text{s}$ usw. bis $10000\text{ m}^3/\text{s}$ berechnet wurden.

1. Die Modelle sind auf Basis von fester Sohle aufgebaut aber in der Natur die Gewässersohle ist beweglich, deswegen kann die Gewässersohle mit Zeit sich durch Sedimenttransportprozess (Erosion oder Sedimentation) ändern.
2. Die Flussbauwerke wie z. B. Buhnen und Längswerke werden im Laufe der Zeit umgebaut oder angepasst.

Aus diesen Gründen werden die 2D-HN Modelle mit neuen DGM-Daten aktualisiert. Datenaktualisierung für unterschiedliche Rheinabschnitte kann unterschiedliche Gründe haben z. B. am Oberrhein, Geschlebezugabe die führenden Gründe sein aber am Mittellrhein, die Engpassbeseitigung am Gebirgstrecke.

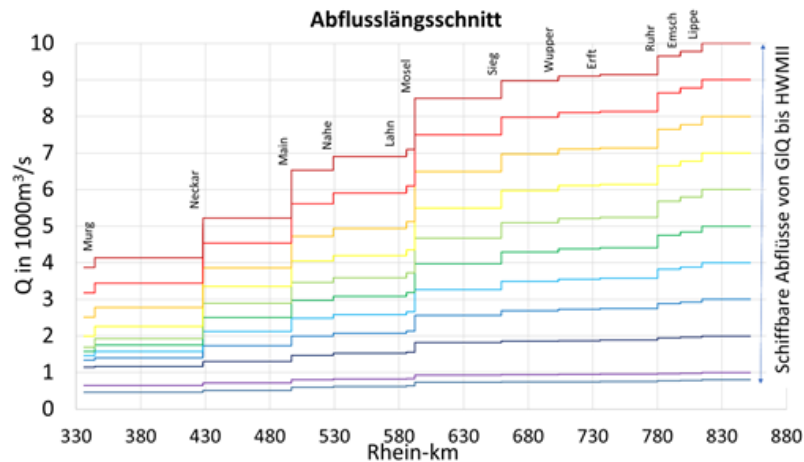


Abbildung 39 Kurvenschar der Abflüsse im Längsschnitt des frei fließenden Rheins (Pegel Iffezheim bis Pegel Emmerich). Die Abflüsse sind in dieser Abbildung für 800 m³/s und alle ganzen 1000er m³/s dargestellt.

Das langfristige Ziel der Bereitstellung von gerasterten Strömungsdaten ist die Verfügbarkeit von Strömungsdaten von allen Bundeswasserstraßen und für alle Nutzer. Das Projekt FernBin war der erste und wichtige Schritt in diese Richtung für die BAW. Die Erfahrung aus FernBin andeutet, dass ein einziges 2D-HN Modell für jede Bundeswasserstraße für dieses Ziel sehr Sinn ergibt und viel Zeit erspart. Im Moment wird für das Projekt RUBIN in BAW aus allen fünf Stücken von Rheinmodellen ein langes Modell aufgebaut. Das Modell sollte mit deutlichem weniger Aufwand und robuster Strömungsdaten liefern.

Die Gewässer- und Strömungsdaten wurden für die gesamte freifließende Rheinstrecke von Iffezheim bis Emmerich auf einer flussachsorientierten Punktwolke generiert und mit dem INSEL Webserver bereitgestellt. Dafür wurde die Simulationen der fünf 2D-HN Modelle verwendet. Die Simulationen sind mit einer Annahme der ähnliche Abflussereignisse im Rhein und seine Nebenflüsse durchgeführt. Das bedeutet bei einem MW-Abfluss im Rhein wurde auch ein MW-Abfluss für Nebenflüsse angenommen. Die Simulationsergebnisse wurde auf die 10 m x 10 m aufgelöste Punktwolke interpoliert. Die Daten beinhalten neben Gewässerdaten wie z. B. den Rhein-km und den Abstand zur Flussachse auch Strömungsparameter wie Wassertiefe, Wasserspiegellage, Geschwindigkeitskomponenten und Sohlhöhe.

9.2.5 Serveraufbau und Datenbereitstellung

Für das Projekt FernBin soll eine Möglichkeit geschaffen werden, den Projektpartnern viele und unterschiedliche Daten zur Verfügung zu stellen. Insbesondere große Datenmengen, wie z.B. die Strömungs- und Infrastrukturdaten, sollen permanent und performant zur Verfügung stehen und trotzdem einfach in der Bereitstellung zu handhaben sein. Anforderungen an den Webservice sind unter anderem, dass eine API-Schnittstelle für die Maschine-zu-Maschine (M2M) Kommunikation zur Verfügung gestellt wird, dass eine Dokumentation der Daten und der Schnittstelle vorhanden ist und dass bei

Berechnungsanfragen auch Daten gesendet werden können, die dann durch serverseitige Algorithmen verarbeitet werden können. Da bisher kein bestehender Webservice der BAW diese Anforderungen erfüllen konnte, muss ein neuer Server aufgesetzt und ein neuer Webservice entwickelt werden.

9.2.6 Entwicklung eines Django-Webservers

Für die Entwicklung dieses Internetdienstes wurde das Python-Framework Django gewählt. Es unterstützt die vorhandenen Strukturen und die notwendigen personellen Kompetenzen sind vorhanden. Das Django-Framework bietet die Möglichkeit der Anbindung an eine PSQL-Datenbank, ist in Python programmierbar, stellt einige vorkonfigurierte HTML-Seiten wie eine Administrationsoberfläche, Login-, Logout- oder Registrierungsseiten zur Verfügung und bietet darüber hinaus zahlreiche Open-Source-Erweiterungsmodule wie z. B. für eine REST-API oder eine Debug-Toolbar. Darüber hinaus existierten 2020 bereits einige weitere Django-Entwicklungsprojekte an der BAW.

Ein IT-Unternehmen (Biz Factory) wurde mit der Unterstützung bei der Implementierung des Erscheinungsbildes (Frontend-Layout), der Sicherheitskonfiguration der Webanwendung und der Einrichtung eines automatisierten Bereitstellungsprozesses, der unter anderem Sicherheitsüberprüfungen und automatisierte Tests umfasst, beauftragt. Ein weiteres IT-Unternehmen (Arxio) wurde mit der Überprüfung des Erscheinungsbildes beauftragt, um die Anforderungen der BAW an Internetauftritte zu erfüllen.

Die Webanwendung kann lokal mit dem Django eigenen Webhost gestartet (gehostet) werden. Für die Webanwendung im Internet wurde ein Apache HTTP Server eingerichtet. Es existiert ein Testserver-system mit Entwicklungswebserver und Testwebserver sowie ein separates und abgesichertes Produktivserversystem.

Der erstellte Webserver erhielt den Namen INSEL (Inland Navigation Service Library) (BÖTT2024), insel.baw.de. Der strukturelle Aufbau und die verwendeten Softwarekomponenten sind in Abbildung 40 dargestellt. Der INSEL Webserver besteht aus einer Webanwendung, die über einen HTTP Server im Internet zur Verfügung gestellt wird. Es gibt eine Webseite und eine Programmierschnittstelle, auf die über einen API Client zugegriffen werden kann. Die mit dem Django Framework erstellte Webanwendung kommuniziert mit der Datenbank und integriert weitere Softwarekomponenten.

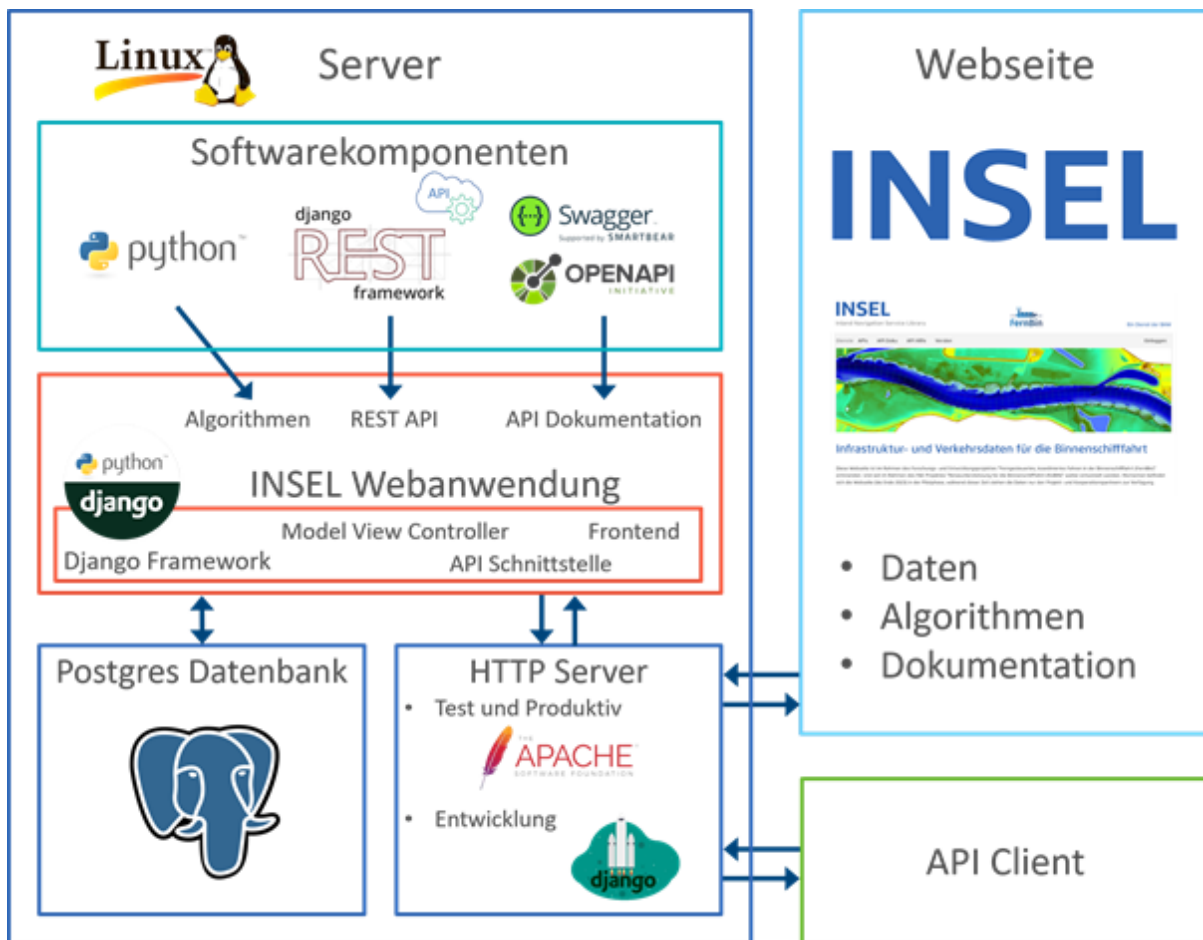


Abbildung 40 Struktureller Aufbau und verwendete Softwarekomponenten des INSEL Webservers

9.2.7 Datenbereitstellung über Webseite und API

Für alle bereitzustellenden Daten wurde jeweils ein Datenbankmodell erstellt. Für jedes Modell mussten anschließend eine Datenvalidierung, eine Ansicht (View) bzw. API-Ansicht, eine Dokumentation bestehend aus Einzelfeldbeschreibung und Funktionsbeschreibung, ein URL-Pfad, ein Kontrollfluss (interne Logik) und entsprechende Managementfunktionen für das Einlesen und Verarbeiten der Daten in der Datenbank erstellt werden.

Der INSEL Webserver stellt nun eine Vielzahl von HTML-Seiten zur Verfügung. Für die Pilotphase des Webservers, während der Projektlaufzeit, wurde der Zugang zu den Daten und Seiteninhalten durch Benutzerkonten und Nutzungsrechte eingeschränkt. Hierfür gibt es die Seiten „Anmelden“, „Abmelden“, „Benutzerprofil“ und „Passwort zurücksetzen“. Auch die Inhalte der Seiten „API“, „API Doku“, „API Hilfe“ und die Versionshistorie „Version“ sind ohne Authentifizierung nicht sichtbar. Derzeit ist nur die Startseite öffentlich zugänglich. Alle Projektpartner haben einen persönlichen Zugang erhalten.

Nach der Anmeldung können die Daten auf zwei verschiedene Arten abgefragt und angezeigt werden. Die Seite „API“, eine generische API-Ansicht, die vom Django-Rest-Framework (DRF) generiert wird, gibt auf der DRF-API-Startseite einen Überblick über die verfügbaren API-Endpunkte. Wählt man einen davon aus, gelangt man direkt zu allen Daten des entsprechenden Endpunkts, die im JSON- oder API-Format dargestellt werden. Jeder API-Endpunkt bietet auch die Möglichkeit, über einen Filter eine reduzierte Auswahl an Daten bereitzustellen.

Die zweite angebotene Möglichkeit befindet sich auf der Seite „API Doku“. Die API-Dokumentation wird mit Hilfe des Pakets „drf-yasg“ (yet another swagger generator) im Stil des Open-Source-

Werkzeuges Swagger erzeugt. Diese Art der Dokumentation folgt dem OpenAPI 3.0 Standard. Der Swagger-Generator erzeugt eine umfassende Dokumentation und stellt zudem eine Benutzeroberfläche für jeden einzelnen API-Endpunkt bereit. Der Generator erzeugt für jeden Endpunkt eine Beschreibung der Funktionalität, eine Beschreibung der einzelnen Parameter und für bestimmte Endpunkte eine Beschreibung der Daten bzw. der Datenverarbeitung. Außerdem erzeugt er einen Beispieldatensatz und die Beschreibung des zugehörigen Datenmodells. Über die bereitgestellte Benutzeroberfläche kann jeder API-Endpunkt bedient werden (aktivieren, Parameter ausfüllen und Anfrage absenden). Die Antwort wird dann direkt unterhalb der Eingabemaske dargestellt. Sie enthält nicht nur den Antwortdatensatz, sondern auch die Antwortkopfzeile (response headers), sowie den Aufruf als curl-Kommando und als URL-Anfrage. Antworten mit Fehlermeldungen werden ebenfalls dargestellt.

Derzeit gibt es zwei Arten von API-Endpunkten. Zum einen gibt es die Endpunkte, die die Daten eines Datenbankmodells bereitstellen. Dabei können einzelne, eine Teilmenge oder alle Datenpunkte abgefragt werden. Einen solchen API-Endpunkt haben die Daten der Strömungssimulation, die Abfluss- und Wasserstandsreferenz der Simulation und die Daten der Pegelstation. Auf der anderen Seite gibt es Endpunkte, die eine Dateneingabe erwarten und Daten zurückgeben, die mit Hilfe eines internen Algorithmus berechnet wurden. Stationierung, Rückstationierung und Interpolation von Strömungsdaten sind solche API-Endpunkte. Der Webserver bietet noch weitere Daten an, die jedoch nicht für den Standardbenutzer, sondern derzeit nur für Mitarbeiter und interne Algorithmen verfügbar sind. Bei diesen Daten handelt es sich um Wasserstraßeninformationen und Wasserstraßenprofile.

Die API-Endpunkte, die Dateneingaben erwarten, sind in der generischen DRF-API-Ansicht nicht benutzerfreundlich, da man die URL mit den Parametern (Schlüssel und Wert) selbst ergänzen muss, um sie zu bedienen.

9.2.8 Relevanz für Forschung und Entwicklung

Für die BAW ist der INSEL Webserver (BÖTT2024) der erste Internetdienst, der eine API zur Verfügung stellt. Von der Idee bis zur Veröffentlichung dieses Webserver waren daher auch intern einige technische und organisatorische Hürden zu überwinden. Für die IT-Abteilung der BAW erforderte dieser selbstentwickelte Webserver eine neue Form der Bereitstellung und Unterstützung, da die bisherigen Internetdienste überwiegend extern entwickelt wurden. Die IT-Abteilung schuf daher teilweise neue Strukturen, Prozesse und Vorgaben für die Bereitstellung der IT-Infrastruktur, um bei der Bereitstellung weiterer Webserver auf Erfahrungen und Standards aus diesem Prozess zurückgreifen zu können. Dies führte dazu, dass die Bereitstellung mehr als eineinhalb Jahre in Anspruch nahm. Zur Gewährleistung der IT-Sicherheit wurde die Kompetenz des IT-Unternehmens Biz Factory eingekauft.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur ferngesteuerten und automatisierten Binnenschifffahrt sind auf diesen und vergleichbare Internetdatenserver angewiesen. Da nur die Behörden die Strömungs- und Infrastrukturdaten sowie weitere Daten und Berechnungen kostenlos und zuverlässig zur Verfügung stellen können, diese aber mit der Menge der Anfragen schnell überfordert sind, sind solche Internetdienste dringend notwendig, um die Innovation auf den Wasserstraßen zu stärken. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass Webservices mit APIs eine M2M-Kommunikation ermöglichen. So können Forschung und Anwendungen entwickelt und betrieben werden, ohne zuvor eine eigene Datenstruktur aufbauen zu müssen.

9.2.9 Ausblick und Weiterentwicklungsmöglichkeiten des INSEL Webserver

Der INSEL Webserver leistet mit seinem derzeitigen Entwicklungsstand einen entscheidenden Beitrag zur automatisierbaren Datenbereitstellung für die Binnenschifffahrt. Um den Anforderungen der Binnenschifffahrtforschung und -industrie gerecht zu werden, sind jedoch noch erhebliche Erweiterungen und Verbesserungen notwendig.

Ein offener Punkt ist die Ergänzung noch fehlender Daten, die für die Schifffahrt von großer Bedeutung sind. Zu diesen Daten gehören insbesondere Brückendurchfahrtspolygone, Liegestellenpolygone, Pegelstände, Fahrrinnenpolygone und Schleuseninformationen, deren Integration in den Webserver noch aussteht. Die Entwicklung und Implementierung entsprechender Algorithmen zur Erfassung und Bereitstellung dieser Informationen stellt eine wesentliche Weiterentwicklung des INSEL Webserver dar.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt betrifft die Benutzerfreundlichkeit und die Visualisierung der bereitgestellten Daten auf dem Webserver. Bisher fehlt eine Bedienoberfläche mit grafischen Darstellungen, Kartenansichten sowie Live-Kartendarstellungen. Die übersichtliche Bereitstellung vieler Daten auf einmal wäre insbesondere für Nutzer wie Schiffsbesatzungen und Logistikplaner von unschätzbarem Wert. Die Integration einer benutzerfreundlichen grafischen Oberfläche zur Interaktion mit den Datensätzen sowie die Implementierung von Echtzeit-Kartenvisualisierungen sind daher wichtige Entwicklungsziele.

Eine Weiterentwicklung des INSEL Webserver ist auch für die internen Berechnungen und Algorithmen erforderlich, die auf vielen aktuellen und/oder nicht öffentlichen Daten basieren. Insbesondere werden Algorithmen benötigt, welche relevante Informationen über Infrastruktur- und Schleusendaten liefern, wie beispielsweise aktuelle Brückendurchfahrtshöhen oder Schleuseninformationen, die von Pegelständen oder Schleusenbelegungen abhängen und entlang einer bestimmten Route berechnet werden müssen.

Ebenso müssen Algorithmen entwickelt werden, die auf sensible Daten zugreifen, die nicht veröffentlicht werden dürfen, deren berechnete Ergebnisse aber der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden können. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist die Verkehrsprognose auf der Basis von AIS- und Strömungsdaten, die einen entscheidenden Beitrag zur Schiffslogistik und zur optimalen Auslastung der Wasserstraßen leisten kann.

Im Projekt "Reiseunterstützung für die Binnenschifffahrt (RUBIN)" soll der INSEL Webserver um die oben beschriebene Verkehrsprognose erweitert werden, was eine wesentliche Weiterentwicklung und Integration zusätzlicher Funktionalitäten erfordert. Diese Entwicklungen zielen darauf ab, den INSEL Webserver zu einem umfassenden und unentbehrlichen Werkzeug für die Binnenschifffahrt zu machen, indem er präzise Informationen, fortschrittliche Visualisierungen und relevante Prognosen für die Binnenschifffahrt bereitstellt.

9.2.10 Algorithmen und Datenerzeugung

Für die Generierung und Aufbereitung der Daten wurde eine Vielzahl von Python-Skripten entwickelt. Drei große Softwareprojekte wurden bereits an anderer Stelle beschrieben, die Strömungssimulation einschließlich ihrer Aufbereitung zu Rasterdaten (siehe 9.2), der INSEL Webserver (siehe 9.2.7) und das Anonymisierungstool (siehe 10.1.1).

In diesem Unterkapitel werden einige weitere Skripte und Algorithmen vorgestellt.

9.2.11 Die Bundeswasserstraßen-Kilometrierung der BAW

„Als Kilometrierung bezeichnet man eine fortlaufende Meter- und Kilometer-Zählung entlang eines Verkehrsweges, beispielsweise einer Straße, eines Schienenwegs oder eines Flusses. Als Verkehrsachse wird dabei die Mittellinie verwendet. Mit Hilfe der Kilometrierung ist es möglich, einen beliebigen Punkt an einer Strecke eindeutig zu benennen, [...]“ (Wikipedia – Die freie Enzyklopädie., 2023)

Die Kilometrierung der Bundeswasserstraßen definiert zusätzlich zu dieser Kilometerzählung, die jeweilige Wasserstraßenkennung und einen Rechtswert in Metern.

Die Kilometrierung wird aus Wasserstraßenprofilen, bestehend aus linken und rechten Hektometerpunkten und der Verkehrsachse (verschiedene Datengrundlagen möglich: Einteilungslinie / Flussachse / Verkehrsachse) generiert.

Die Bundeswasserstraßen-Kilometrierung wurde für den Rhein aus DBWK2-Wasserstraßenprofilen generiert. Bei den DBWK2-Wasserstraßenprofilen handelt es sich um die Kilometrierung der GDWS, die der BAW in Form von *.d50-Dateien* (Hektometerpositionen) und *.dat-Dateien* (Einteilungslinie) zur Verfügung gestellt wurden. Für alle anderen Gewässer wurden senkrecht stehende Profile auf Basis der Verkehrsnetzlinie der WSV generiert. Die Kilometrierung wurde mit den Skripten zur Generierung von Wasserstraßenprofilen erzeugt und für dieses Projekt profilweise auf alle 20 m interpoliert.

9.2.12 Der Stationierungsalgorithmus der BAW

Ein Stationierungsalgorithmus stellt die Beziehung zwischen Geokoordinaten (Positionen) und einer Kilometrierung her. Der Stationierungsalgorithmus der BAW verwendet als Datengrundlage die oben beschriebene Bundeswasserstraßen-Kilometrierung (siehe 9.2.13). Das Stationierungsergebnis der BAW setzt sich aus dem Tripel Wasserstraßen-ID, Wasserstraßenkilometer und Rechtswert zusammen. Die Stationierungsberechnung des Kilometers ist durch die Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2601 (WSV, 2021) vorgegeben und im Stationierungsalgorithmus umgesetzt. Zusätzlich wird der Rechtswert als Abstand von der Einteilungslinie bei gleichem Kilometerwert berechnet. Die Stationierung funktioniert für die Gewässer, für die eine Datengrundlage (Wasserstraßenkilometrierung) generiert wurde, das sind derzeit alle Bundeswasserstraßen in Deutschland.

Der Stationierungsalgorithmus wurde während der Projektlaufzeit überarbeitet. Er ist nun mit den Hektometerprofilen aus AP 4200 kompatibel, dieser wird nun unter anderem als Grundlage zur Auswertung von AIS-Daten in diesem Projekt verwendet.

Der Stationierungsalgorithmus wird in der "stationing" API auf dem INSEL Webserver zur Verfügung gestellt. Die API unterstützt die Koordinatensysteme WGS84 und UTM32e (ETRS89). Mehrere Koordinatenpaare können in einer API-Anfrage gesendet werden, jedoch immer nur in einem Koordinatensystem gleichzeitig.

Der Stationierungsalgorithmus der BAW enthält die folgenden Kernelemente:

- Ein binärer Suchbaum sucht die nächstgelegenen Gewässerachsenpunkte (alle 20 m verfügbar).
- Identifikation der umgebenden Wasserstraßenprofile unter Berücksichtigung der Wasserstraßen-ID.
- Die Stationierung (Kilometer und Rechtswert) wird getrennt für gerade und gekrümmte Abschnitte berechnet.
- Im Gegensatz zum BundesWasserstraßenLocator der WSV verwendet der Stationierungsalgorithmus der BAW-Wasserstraßenprofile und Einteilungslinien (Bundeswasserstraßen-Kilometrierung) statt nur einer Einteilungslinie (aus Verkehrsnetzlinie), daher kann es zu Abweichungen gegenüber dem BundesWasserstraßenLocator kommen.

Der Stationierungsalgorithmus der BAW ist für den Rhein besonders genau, da als Kilometrierung die DBWK2-Wasserstraßenprofile und die Einteilungslinie der GDWS verwendet werden. Sowohl die Kilometrierung als auch die Stationierungsergebnisse stimmen mit den amtlichen Karten und den GDWS-Hektometerprofilen überein.

9.2.13 Rückstationierung

Der Rückstationierungsalgorithmus stellt die Beziehung zwischen einer Wasserstraßenkilometrierung und einer Geokoordinate (Position) her. Dies entspricht der Umkehrung des Stationierungsalgorithmus. Die Rückstationierung funktioniert für Gewässer, für die Wasserstraßenprofile (Kilometrierung) verfügbar sind. Die Geoposition wird durch Interpolation der umgebenden Wasserstraßenprofile unter Berücksichtigung der Gewässerachse ermittelt.

Der Algorithmus für die Rückstationierung wird in der "reverse_stationing" API auf dem INSEL Webserver zur Verfügung gestellt. Dabei wird die gleiche Kilometrierung wie bei der Stationierung verwendet. Daraus folgt, dass die beiden Algorithmen eindeutig ineinander umkehrbar sind, vorausgesetzt, dass die angeforderten Positionen innerhalb der Wasserstraßenprofilendpunkte liegen.

9.2.14 Interpolation der Strömungsdaten

Der Algorithmus zur stationären Interpolation von Strömungsdaten greift auf die gerasterten Strömungsdaten zu und berechnet (interpoliert) Strömungsdaten zwischen den räumlichen und den wasserstandsabhängigen Daten für beliebige Positionen und Wasserstände.

Der Algorithmus stationiert die angeforderte Position und sucht für die Wasserstraßen-ID und den Wasserstraßenkilometer eine zugehörige Pegelstation (Bezugspegel(-station)). Der Wasserstand wird anhand des standardmäßig zugeordneten Bezugspegels interpretiert, dieses Verhalten kann durch die benutzerspezifische Angabe eines Bezugspegels geändert werden.

Als nächstes werden in Abhängigkeit vom Wasserstand geeignete Simulationsergebnisse ausgewählt. Anschließend werden die umliegenden Rasterpunkte der ausgewählten Simulationsergebnisse aus der Datenbank abgefragt. Zuletzt werden die Strömungsdaten der Zielposition durch trilineare Interpolation ermittelt.

Die Interpolation der Strömungsdaten wird in der "flow_data_steady_state_interpolated" API auf dem INSEL Webserver zur Verfügung gestellt. Interpolierte Strömungsdaten werden durch die Angabe einer Geokoordinate und eines Wasserstandes angefordert, wobei UTM32e (ETRS89) oder WGS84 Koordinaten für die Position und Abfluss- oder Pegelwerte für den Wasserstand zulässig sind.

9.2.15 Zerlegung von Zeitreihen (AIS-Daten)

Es wurde ein Algorithmus zur Identifikation von Ereignissen in Zeitreihen (AIS-Daten) entwickelt. Mit Hilfe dieses Algorithmus können Zeitreihen einzelner Schiffe in "Fahrten" aufgeteilt werden. Der Algorithmus markiert identifizierte Ereignisse im Zeitreihendatensatz, wobei zusätzlich eine Zustandsüberwachung für alternierende Ereignisse (Anlegen und Ablegen) integriert wurde. Für jeden Ereignistyp werden separate Marker gesetzt. In einem zweiten Schritt werden alle Marker zusammengeführt, wobei eine weitere zeitliche Bedingung das Setzen des nächsten Markers einschränkt.

Bisher sind Marker für räumliche und zeitliche Ausdehnung, Anlegen, Ablegen und Wenden möglich. Jeder Markertyp hat seine eigenen Parameter, um die Identifikation so flexibel wie möglich zu gestalten. Das Ergebnis kann auf unterschiedliche Weise weiterverarbeitet werden. Beispielsweise können einzelne Zeitreihen zwischen den Markern gelöscht oder separat weiterverarbeitet werden. Oder das Ergebnis kann dazu verwendet werden, eine zusätzliche Identifikation für die gesamte Zeitreihe zu erzeugen, indem die Marker dazu verwendet werden die Daten in Abschnitte einzuteilen, so dass jeder Abschnitt eine eindeutige Identifikation erhält.

10 AIS-Daten

Inhalt des Arbeitspaketes ist die Aufbereitung, Weitergabe und die Auswertung der von der GDWS zur Verfügung gestellten AIS-Daten. Für die datenschutzkonforme Weitergabe an die Projektpartner müssen die AIS-Daten anonymisiert werden, wofür eine spezielle Aufbereitung erforderlich ist.

Für die verschiedenen Analysen zum Fahrverhalten der Binnenschifffahrt (AP 8000) und für statistische Auswertungen müssen die AIS-Daten ebenfalls aufbereitet werden. Hierfür sind AIS-Daten in den Demonstrationsgebieten Ober-, Mittel- und Niederrhein sowie im westdeutschen Kanalnetz vorgesehen.

Für die Datenaufbereitung wurde zunächst eine Serverstruktur und ein Verfahren zur automatisierten Verarbeitung der AIS-Daten fertiggestellt und in Betrieb genommen, so dass diese effizient dekodiert, ergänzt, gefiltert, gespeichert und wieder abgerufen werden können (LANG & BECK, 2024).

10.1.1 Anonymisierung der AIS-Daten

Um den wissenschaftlichen Teil des Arbeitspaketes bearbeiten zu können, mussten zu Beginn der Projektlaufzeit rechtliche Fragen zwischen der BAW und der GDWS sowie zwischen der BAW und den einzelnen Projektpartnern geklärt werden. Die daraus resultierende Verwaltungsvereinbarung mit der GDWS und die Nutzungsvereinbarungen mit den einzelnen Projektpartnern klären den rechtlichen Rahmen, die Zuständigkeiten und die Datenweitergabe. Darüber hinaus wurde ein Stufenkonzept zur Anonymisierung der AIS-Daten für die Bereitstellung an die Projekt- und Kooperationspartner erarbeitet. Mit diesem Stufenkonzept wurde der notwendige Anonymisierungsgrad für die jeweiligen Projektpartner und den Anwendungsfall definiert (Dr. SCHR & BÖTT, 2019). Ziel des Anonymisierungskonzeptes ist es, die AIS-Daten so aufzubereiten, dass eine nachträgliche, praktikable Identifikation einzelner Schiffe und Personen nicht möglich ist. Daten ab Anonymisierungsstufe 3 können in begrenztem Umfang Dritten zugänglich gemacht werden.

Die Stufen des Anonymisierungskonzeptes

- Stufe 1 sieht die Ersetzung der Schiffsnummer durch eine zufällige Schiffsnummer und die Löschung aller schiffsidentifizierenden Daten vor.
- In Stufe 2 wird zusätzlich zu den Maßnahmen in Stufe 1 jede zusammenhängende (Schiffs-)Fahrt zu einer separaten Fahrt mit einer Fahrtnummer anstelle der Schiffsnummer.
- In Stufe 3 wird zusätzlich zu den Maßnahmen der Stufen 1 und 2 der Zeitraum durch einen relativen Zeitbezug ersetzt.

Softwaremodul für die Anonymisierung

Die Datenaufbereitung und Anonymisierung wurde gemäß dem Anonymisierungskonzept in einem Python-Programm (Anonymisierungstool) umgesetzt. Das Programm ist in der Lage, die AIS-Daten über eine Schnittstelle aus der AIS-Datenbank der GDWS zu exportieren und gemäß den Anforderungen der Projektpartner in Verbindung mit den Vorgaben des Anonymisierungskonzeptes zu anonymisieren. Dabei löscht das Programm alle nicht relevanten bzw. personenbezogenen Daten. Den Daten können Pegelwerte (Zeitreihe) und Abflusswerte (Zeitreihe) einer beliebigen Pegelstation hinzugefügt werden. Ebenso kann den Daten eine Stationierung hinzugefügt werden (siehe 9.2.14). Die Anonymisierungsroutine führt dann die notwendigen Unterrouتين aus, um den gewünschten Anonymisierungsgrad zu erreichen. Es wurden Unterrouتين für die Verschiebung von Zeitstempeln, die Zerlegung von Zeitreihen (siehe 9.2.15), das Verrauschen bzw. Runden von Wertereihen und das Ersetzen von Wertereihen implementiert. Die Kombination dieser Unterrouتين ergibt die einzelnen Stufen des Anonymisierungskonzeptes.

Datenweitergabe an die Projektpartner

Nachdem das Softwaremodul fertiggestellt war, wurden die angeforderten Datensätze, zusammen mit der Dokumentation und den Metadaten den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Nach der Bearbeitung aller Datenanfragen wurde das Arbeitspaket 4300 Ende 2021 abgeschlossen, es bestand jedoch während der gesamten Projektlaufzeit die Möglichkeit, weitere anonymisierte AIS-Datensätze zu erhalten.

10.1.2 Analyse zum Fahrverhalten

Für die Analyse des Fahrverhaltens wurden die AIS-Daten durch eine Vorverarbeitung aufbereitet, die teilweise der Aufbereitung für die Anonymisierung entspricht. Für die Aufbereitung wurden unter anderem Filter implementiert, fehlende Datenpunkte interpoliert, die Daten mit Metadaten angereichert und die Daten mit Infrastrukturdaten erweitert. Anschließend wurden die AIS-Daten stationiert und um Wasserstands- und Strömungsdaten erweitert.

Darüber hinaus wurden eigenständige Routinen zur Auswertung und Analyse der AIS-Daten entwickelt. Diese ermöglichen statistische Auswertungen wie die Flottenstruktur und einzelne Aspekte des Flottenverhaltens sowie Analysen der Verkehrsströme. Diese Analysen wurden in den Arbeiten des AP 8000 wiederverwendet. Für die Projektpartner bestand kein Bedarf an solchen Analysen. Die Aufbereitungen und Analysen liegen üblicherweise als Methoden- und Codebausteine vor, für einen neuen Anwendungsfall müssen diese Bausteine in der Regel neu zu einem Softwareprogramm (Skript) zusammengestellt werden.

10.1.3 AIS-Benchmark-Datensatz

Um die Leistungsfähigkeit der verschiedenen KI-Ansätze der BAW und der Projektpartner zu analysieren und eine spätere Zusammenführung der Vorhersagemodelle vorzubereiten, wurde ein AIS-Benchmark-Datensatz erstellt. Er umfasst aus AIS-Daten extrahierte Fahrten von Schiffen im Jahr 2021 auf drei ca. 6–10 km langen Rheinabschnitten (WW-km 556–562, 570–579, 598–608) mit und ohne Kurven. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, Fährstrecken, Häfen, Fahrrinnenverzweigungen und nach Karminke (2004) empfohlene Richtungswechsel zu vermeiden. Damit sollten zu komplexe Situationen vermieden werden, für die ggf. spezifischere Modelle trainiert werden müssten. Um verschiedene, noch schiffbare Wasserstände abzudecken, wurden Daten aus den Monaten März, Mai, Juli und November ausgewählt, siehe Abbildung 41.

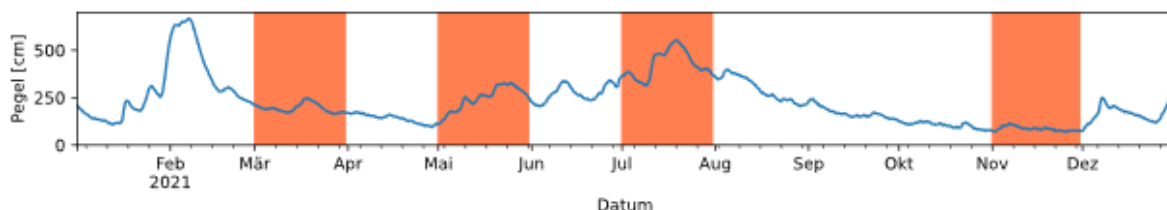


Abbildung 41 Pegelganglinie in cm im Jahr 2021. Die für den Benchmark ausgewählten Zeiträume sind rot markiert.

Die Aufbereitung beinhaltet die Anonymisierung, Stationierung, Aufteilen in Fahrten, Interpolation, und das Hinzufügen von Wasserstand und Fahrrinnenrand-Abstand. Durch kubisch-hermitesche Interpolation wurde eine einheitliche Zeitschrittgröße von 5 s zwischen AIS-Signalen hergestellt. Fahrten mit einer Dauer von weniger als 15 min und unterbrochene Fahrten wurden nicht berücksichtigt, da die Entwicklung von Trajektorienprognosemodellen für Vorhersagen von 10 min basierend auf beobachteten Trajektorien von 5 min ermöglicht werden sollte.

Zur Analyse der Performanz von Trajektorienprognosemodellen in Begegnungssituationen wurden zu den Daten der Fahrt eines (Ziel-)Schiffes die Daten von Schiffen in dessen Umgebung hinzugefügt. Die berücksichtigte Umgebung des Zielschiffs wurde zu jedem Zeitschritt und fahrtrichtungsabhängig definiert. Die ungefähr in der Hälfte des (Mindest-)Zeitumfangs einer Fahrt von 15 min zurücklegbare Strecke wurde vor dem Zielschiff berücksichtigt. Für zu Berg fahrende Schiffe wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 10 km/h angenommen, und somit all jene Schiffe flussaufwärts berücksichtigt, die eine maximale Distanz von 1,25 (Rhein-)km zum Zielschiff aufweisen. Der hinter dem Schiff berücksichtigte Bereich (bei Bergfahrt also flussabwärts liegend) wurde auf die Hälfte des vor dem Schiff liegenden Bereichs eingegrenzt, siehe auch Abbildung 42.

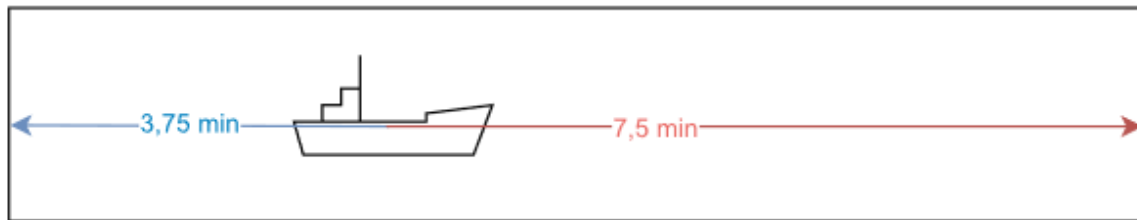


Abbildung 42 Visualisierung der Vorgehensweise zur Berechnung des berücksichtigten Bereichs um die Position des Zielschiffs.

10.1.4 Verkehrsprognose

Zur Optimierung der KI-gestützten Trajektorienprädiktionsmodelle zur Vorhersage von Schiffsbewegungen in Interaktion, wurde die AIS-Trainingsdaten-Grundlage weiterbearbeitet. Filterungsmöglichkeiten nach Anzahl von Schiffen während einer Begegnungssituation wurden implementiert. Ein optimiertes Selektieren von signifikanten Begegnungssituationen, d. h. solchen, in denen Schiffe zur Kollisionsvermeidung tatsächlich ihr Fahrverhalten anpassen müssen, ist angestrebt.

10.1.5 Ausblick

Da es eine Vielzahl relevanter statistischer Auswertungen gibt, die im Rahmen dieses Projektes nicht alle durchgeführt werden konnten, besteht weiterer Auswertungsbedarf. (Zu den durchgeführten statistischen Auswertungen sei hier auf Abschnitt 16.1 verwiesen.) Meist konnten nur kleine Bereiche detailliert analysiert werden. Insbesondere im Zusammenhang mit der Verkehrsprognose durch maschinelles Lernen werden in Zukunft vermutlich weitere Analysen an Problemstellen notwendig sein, um eine zuverlässige Verkehrsprognose zu erhalten.

11 Messdaten der Schiffe

Die Messdaten der Messschiffe wurden gesammelt und per FTP-Server an die Projektpartner verteilt. Für die aufgezeichneten Daten wurden Auswerteroutinen geschrieben, mit denen die Ergebnisse ausgewertet und in grafischer Form dargestellt werden können.

Um die Strömungsgeschwindigkeiten aus den Messungen der ADCP mit den Geschwindigkeiten vergleichen zu können, muss die 2DHN-gemittelten Daten des insel.baw.de-servers auf die Tiefe des ADCP bezogen dargestellt werden. Dies ist nötig, da sich die Strömungsgeschwindigkeiten im Flussprofil nicht homogen über den Querschnitt verteilen, sondern gerade im oberen Bereich der Flussmitte, in dem die Schifffahrt stattfindet, erhebliche Übergeschwindigkeiten vorliegen. Die Messwerte der ADCP wurden verwendet, um die Daten des insel-Servers zu validieren.

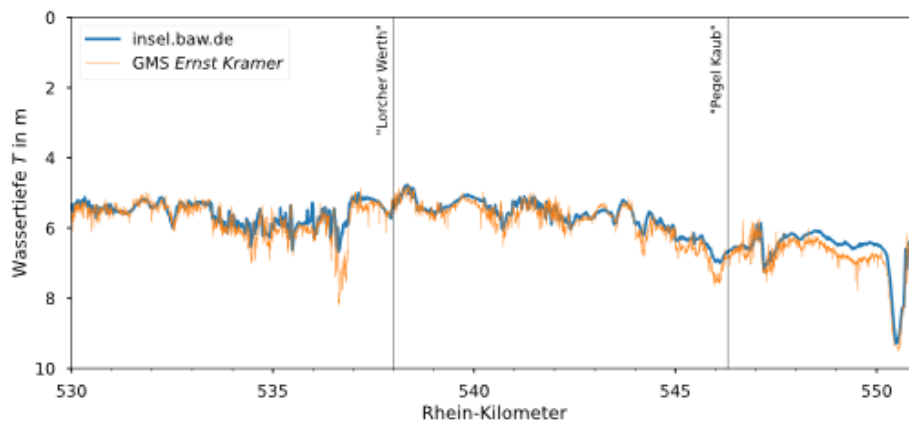


Abbildung 43 Vom Echolot der Ernst Kramer aufgenommene Wassertiefe im Rhein zwischen den Kilometern 530 und 556, verglichen mit der Wassertiefe die vom insel.baw.de-Server bei gleichem Pegel zur Verfügung gestellt wird.

In Abbildung 43 kann das Ergebnis der Peilung, die durch das zum Messschiff ausgerüstete Testschiff *Ernst Kramer* im Mittelrhein durchgeführt wurden, sehen.

Einige Messdaten werden redundant gespeichert, was eine Überprüfung bzw. Kreuzvalidierung dieser Parameter ermöglicht. So können z. B. die gemessenen Kurswinkel des GNSS-Empfängers mit der von der UDE (INAM) installierten IMU oder der Trimm mit den gemessenen Tiefgängen des Schiffes an Bug und Heck verglichen werden. Ein beispielhafter Auszug aus den Validierungsarbeiten der Messdaten unterschiedlicher Datenquellen ist in Abbildung 44 dargestellt.

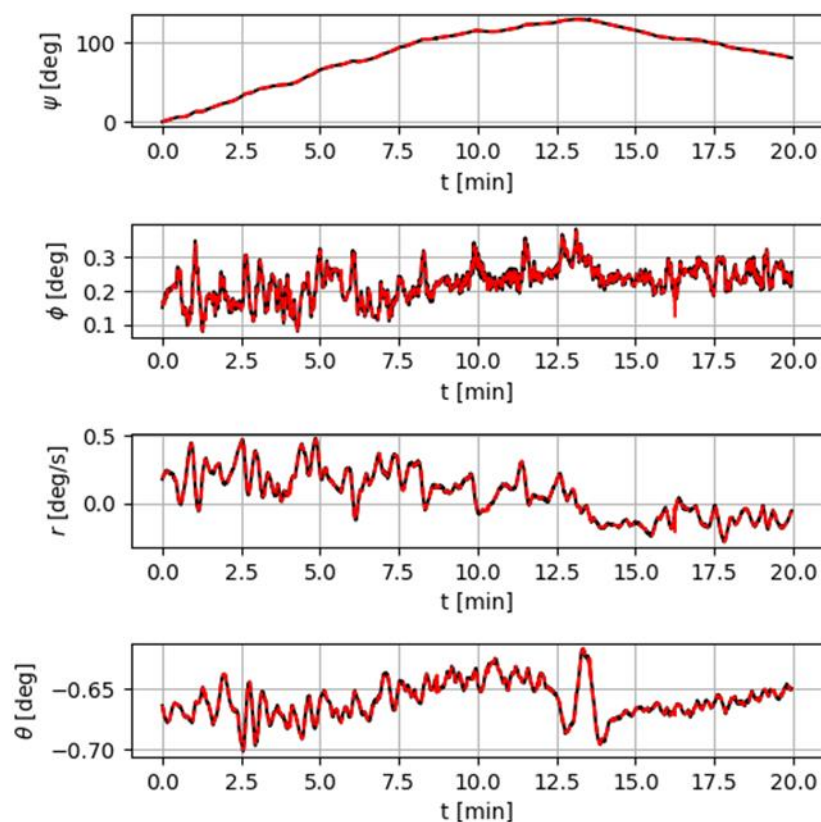


Abbildung 44 Auszugsweiser Vergleich der Messgrößen Kurswinkel ψ (oben), Rollwinkel ϕ (2. v. oben), Drehrate r (3. v. oben) und Stampfwinkel θ (unten) aus unterschiedlichen Datenquellen; Schwarz: Daten des GNSS-Empfängers; Rot: Daten der IMU

Darüber hinaus wurden an der UDE (INAM) Routinen entwickelt, um weitere Überprüfungen der Daten durchzuführen. Für diese Berechnungen war es unter anderem nötig, die Positionsdaten aus dem WGS84 Koordinatensystem in ein kartesisches Koordinatensystem zu überführen. Die Längen- und Breitengrade wurden in UTM-Koordinaten umgerechnet und die resultierenden Positionen mit dem Kurswinkel transformiert. Da der GNSS-Empfänger am Bug des Schiffes platziert ist und für das Manövriermodell die Position mittschiffs bekannt sein muss, war eine zusätzliche Transformation nötig. Als Randbedingung für Darstellungen wurde das Schiff zu Beginn einer Trajektorie längs zur x-Achse und an den Ursprung des Koordinatensystems gesetzt. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 45 dargestellt.

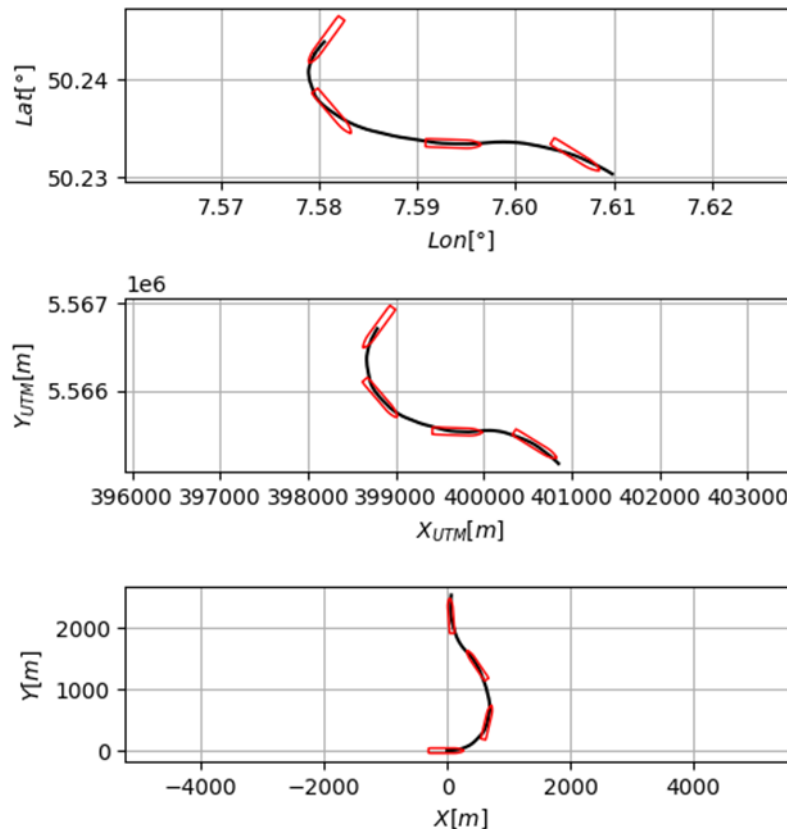


Abbildung 45 Darstellung der Umrechnung der Trajektorie der Ernst Kramer für einen Zeitraum von 20 Minuten. Oben: Rohdaten in WGS84-Koordinaten. Mitte: Daten in UTM. Unten: Daten in vereinfachtem Koordinatensystem

Durch Integration über die Zeit können außerdem aus den von der IMU gemessenen Beschleunigungen die Geschwindigkeiten und aus den Geschwindigkeiten die Positionen bzw. Winkel berechnet werden. Analog können aus den Positionen und Winkeln durch Differenzieren die Geschwindigkeiten bzw. aus den Geschwindigkeiten die Beschleunigungen berechnet werden. Abbildung 46 zeigt einen Vergleich der Schiffsbewegungen, die auf Basis der unterschiedlichen Sensordaten durch Integration und Differentiation berechnet wurden. Es ist zwischen den berechneten Werten und den Messwerten eine leichte Abweichung zu erkennen. Diese Abweichung steigt mit fortschreitender Zeit an, sodass hier von einem Driften ausgegangen werden kann. Die Abweichungen können durch Anpassung der Integrationsmethode verringert werden, wenn die Berechnungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt und die Randbedingungen für die Integration angepasst werden. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass die Messdaten der Sensoren plausibel und für weitere Analysen nutzbar sind.

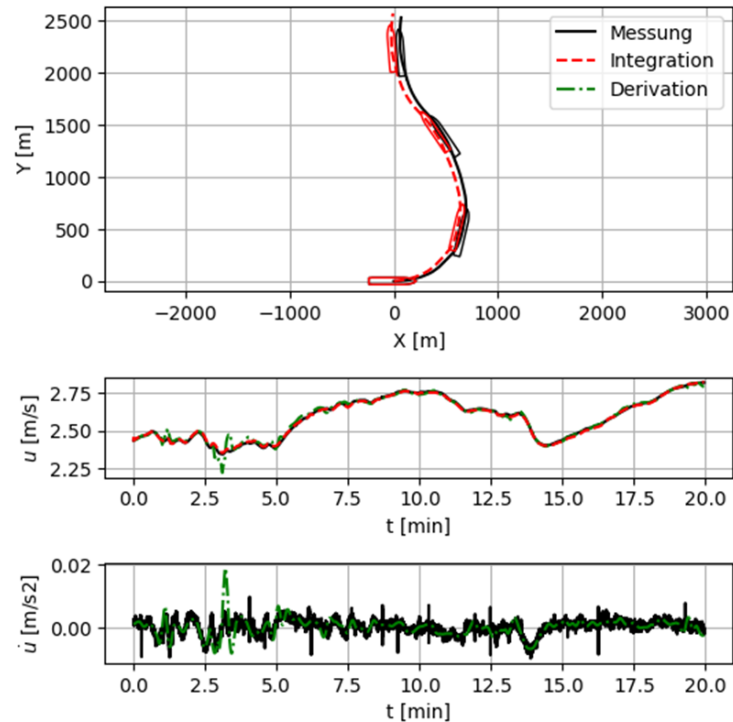


Abbildung 46 Vergleich direkt gemessener Größen für Position (oben), Längsgeschwindigkeit und -beschleunigung mit berechneten Werten anderer Sensoren. Schwarz: Direkte Messdaten; Grün: Werte infolge der Differenziation anderer Messwerte; Rot: Werte infolge der Integration anderer Messwerte.

12 Fernsteuerung

12.1 Konzeptionierung des Steuerstands

Um die Fernsteuerung eines Binnenschiffs zu verwirklichen, wird ein Konzept für den Fernsteuerstand entwickelt, welches vor allem die einfache Handhabung durch Schiffsführer zum Ziel hat.

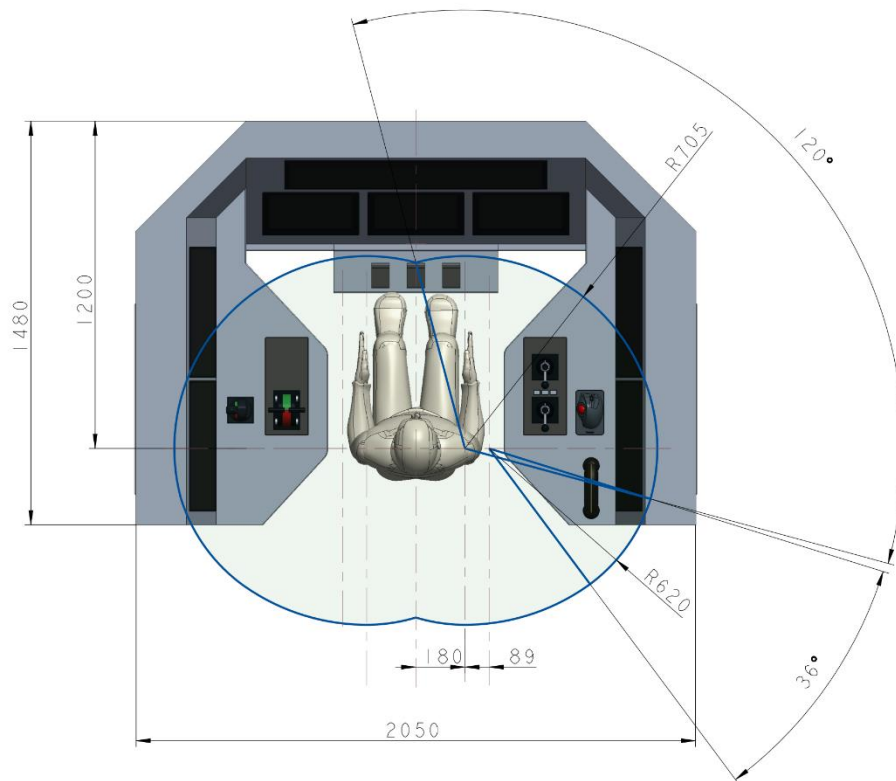


Abbildung 47 Ergonomisches Grundkonzept des Fernsteuerstands

Um die Fernsteuerung hierbei so intuitiv wie möglich zu gestalten, orientiert sich das Konzept an dem Aufbau einer realen Schiffsbrücke. Um auch ergonomischen Anforderungen gerecht zu werden, wurde die Norm DIN EN 1864: „Fahrzeuge der Binnenschifffahrt – Steuerhaus – Ergonomische und sicherheitstechnische Anforderungen“ herangezogen. Anhand der Spezifikationen in der Norm ist ein ergonomisches Grundkonzept für den Fernsteuerstand erarbeitet worden. Die Abbildung 47 stellt den Greifbereich einer 1,60 m großen Person dar, hierdurch wird die gute Erreichbarkeit der Bedienelemente, vor allem der Fahrhebel, bestätigt.

12.2 Realisierung des Steuerstands

Ein zentrales Element für die ferngesteuerte, koordinierte Binnenschifffahrt stellt der Fernsteuerstand dar, von welchem aus der entfernte Schiffsführer das Schiff kontrollieren kann. Die Realisierung dieses Steuerstands wird nachfolgend dargestellt. Abschließend wird die Validierung dieses Steuerstands im Rahmen mehrerer Probandenstudien sowie in Praxistests behandelt. In Abbildung 48 ist der Fernsteuerstand an der Universität Duisburg-Essen dargestellt, Abbildung 49 zeigt den entsprechenden Steuerstand am DST.



Abbildung 48 Fernsteuerstand an der Universität Duisburg-Essen



Abbildung 49 Steuerstand im VeLABi (DST)

12.2.1 Physische Bedienelemente

Entsprechend der Konzeptionierung des Fernsteuerstands existieren zum Kontrollieren der Antriebsorgane des Schiffes insgesamt drei Bedienelemente.

Für die Bedienung der Hauptmaschinen ist ein Doppelfahrhebel (LF90DM) der Firma lilaas links des Schiffsführers installiert. Während das Testschiff „Ernst Kramer“ nur eine Hauptmaschine besitzt, ist mit diesem Fahrhebel eine Übertragung des Systems auf Schiffe mit doppeltem Antriebsstrang möglich. Um im Falle von nur einer Hauptmaschine die Bedienung zu erleichtern, wird ein Verbindungsstück genutzt, mithilfe dessen der Doppelfahrhebel zu einem Einzelfahrhebel gewandelt werden kann (vgl. Abbildung 50).

In der Standard-Konfiguration ist die Nullstellung der jeweiligen Fahrhebel durch eine Rastung gekennzeichnet, sodass der Schiffsführer diesen Nullpunkt sicher treffen kann und haptisches Feedback über das Erreichen der Hebelstellung erhält. Ein weiterer wichtiger Punkt im Verlauf der Drehzahlvorgabe ist der Kupplungspunkt, also die Hebelstellung, bei welcher die Hauptmaschine eingekuppelt wird und die Kraftübertragung auf die Propeller beginnt. An Bord eines Schiffes kann der Einkuppelvorgang durch Vibrationen und Bewegungen des Schiffes haptisch erfasst werden. Der fernsteuernde Schiffsführer hat diese Möglichkeit jedoch nicht. Hier kann das Einkuppeln lediglich durch ein leichtes Abfallen der Drehzahl der Hauptmaschine beziehungsweise über eine Kupplungs-Status-Anzeige erkannt werden. Um die Bedienung der Hauptmaschine zu erleichtern, wurden deshalb zwei weitere Rastpunkte in den Hebeln realisiert – einer jeweils für das Einkuppeln voraus beziehungsweise das Einkuppeln bei Fahrt rückwärts. Hierzu wurden die Hebel mechanisch bearbeitet, um analog zu der serienmäßigen Nullpunkts-Arretierung zwei weitere Nuten zum Einrasten der Hebelmechanik bereitzustellen. Software-technisch wurden diese Rastpunkte auf die Drehzahlvorgabe eingestellt, welche zum Einkuppeln benötigt wird, sodass die Schiffsführer auch in dem Fernsteuerstand ein haptisches Feedback zum Einkuppeln erhalten.

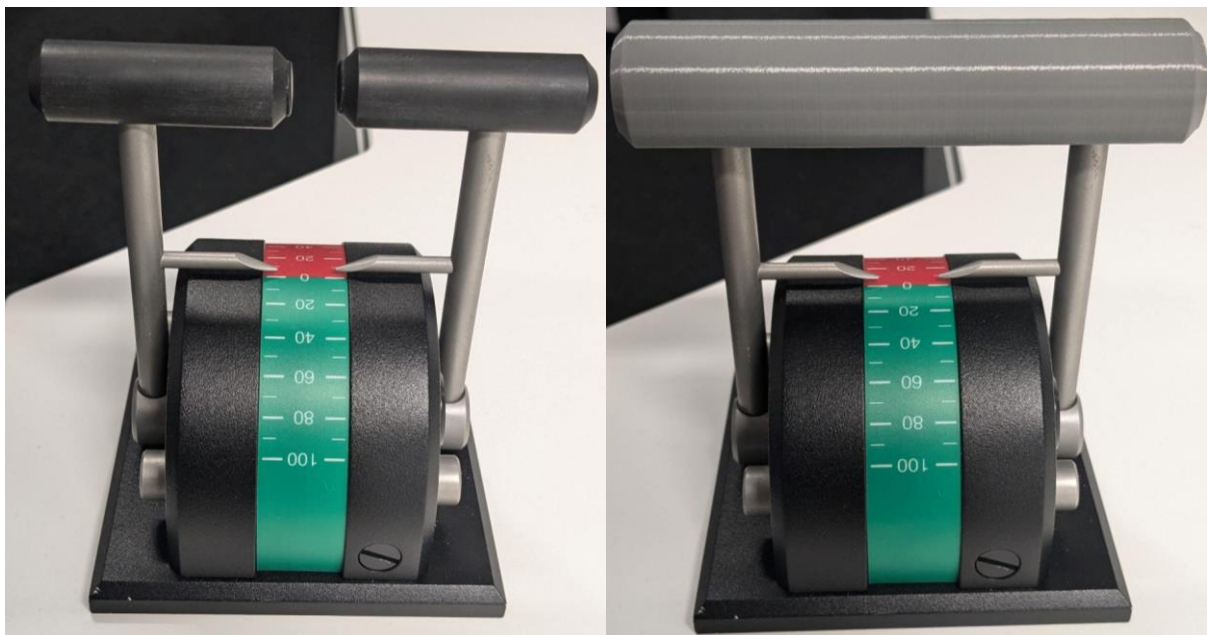


Abbildung 50 Fahrhebel des Fernsteuerstands

Neben dem Doppelfahrhebel befindet sich das Bedienelement für das Bugstrahlruder. Es handelt sich um einen zweiachsigen Azimuth-Hebel (LF70LM) der Firma *lilaas*. Dieser erlaubt einerseits mithilfe des Hebels die Einstellung der Höhe des Schubs und andererseits durch Drehen des Bedienelements die Richtung des Schubs einzustellen.

Die Rudersteuerung erfolgt über einen Ruderhebel der Firma Gessmann auf der rechten Seite des Steuerstands. Dieser Hebel weist zugleich zwei Knöpfe für weitere Funktionalitäten auf, etwa für die

Funkbedienung. Der Ruderhebel sowie das Bedienelement zur Ansteuerung des Bugstrahlers sind in Abbildung 51 dargestellt.

Alle drei Bedienelemente sind aktulierbar, hierdurch lassen sich die Hebel etwa automatisiert in eine gewünschte Position verfahren (beispielsweise um die aktuelle Position auf dem Schiff zu synchronisieren). Auch für haptisches Feedback in Form von Vibrationen oder einer Widerstandsänderung beim Legen des Hebels lassen sich diese Funktionen verwenden.

Weiterhin existieren 3 Fußpedale der Firma Marquardt, welchen Funktionen wie das Schallsignalgeben und Funkinteraktionen zugeordnet werden können.

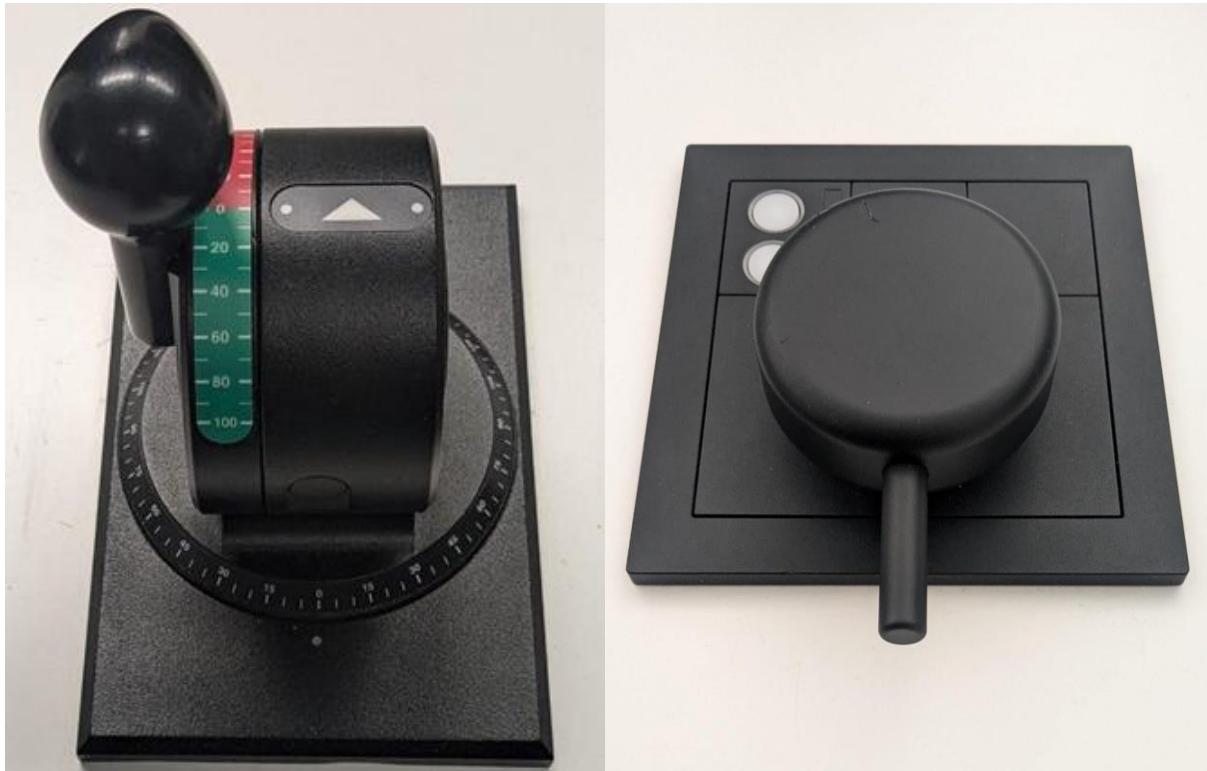


Abbildung 51 Bugstrahler-Hebel und Ruderhebel des Fernsteuerstands

Diese in diesem Kapitel genannten physischen Bedienelemente werden über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des Typs „Bachmann MC 206“ ausgelesen bzw. angesteuert. Hierbei besitzen der Doppelfahrhebel und der Hebel für die Bugstrahlersteuerung Potentiometer, um die aktuellen Stellwerte messbar zu machen. Diese Potentiometer sind direkt mit den Eingängen der SPS verbunden und werden von dieser analog-digital gewandelt und ausgewertet. Die Aktuierung dieser Hebel erfolgt über Gleichstrom-Motoren sowie Kupplungen, welche über Relais wiederum mit den Ausgängen der SPS gesteuert werden können. Die Fußtaster sind ebenfalls direkt mit den Eingängen der SPS verbunden und können entsprechend ausgewertet werden.

Der Ruderhebel hat einen eingebauten Mikroprozessor. Über eine serielle Schnittstelle kommuniziert dieser mit der SPS – so können der aktuelle Status ausgelesen werden beziehungsweise der gewünschte Status gesetzt werden. Abbildung 52 stellt die SPS mit ihren zugehörigen Ein-/ Ausgangsmodulen, den Relais und den Kabelklemmen dar.



Abbildung 52 SPS-Schaltschrank zur Ansteuerung der physischen Bedienelemente SPS-Schaltschrank zur Ansteuerung der physischen Bedienelemente

Die SPS ist über das lokale Netzwerk mit dem OPC UA-Server auf dem Schiff verbunden und übermittelt auf diesem Weg die aktuellen Werte der physischen Bedieneinrichtungen des Fernsteuerstands an die Systeme an Bord des Schiffs.

12.2.2 Visualisierungselemente

Innerhalb des Steuerstands sind insgesamt fünf Monitore verbaut, auf welchen dem Schiffsführer Informationen angezeigt werden können. Der zentrale Monitor vor dem Schiffsführer ist mit 43 Zoll der größte verbaute Bildschirm und für die Anzeige von Radarbildern sowie des ECDIS vorgesehen. Dieser Bildschirm ist zudem ein reines Anzeigeelement, während die übrigen vier Monitore per Touchscreen-Funktionalität auch Steuermöglichkeiten bieten. Diese vier Monitore haben jeweils eine Bildschirmdiagonale von 21,5 Zoll und dienen unter anderem zur Anzeige von Interaktionskomponenten zur Steuerung von Systemen oder von Videobildern vom Schiff.

Die Hauptvisualisierung der Videostreams vom Schiff findet jedoch losgelöst vom eigentlichen Steuerstand statt. Während die bisher beschriebenen Elemente baugleich in den Steuerständen der Universität Duisburg-Essen und des DST sind, unterscheiden sich die sonstigen Visualisierungselemente deutlich. Der Steuerstand des DST ist in der VeLABi-Infrastruktur platziert. Hierdurch existiert für die Anzeige eine 360°-Projektionsfläche rund um den Steuerstand, auf welcher die Videostreams beliebig platziert werden können (vgl. Abbildung 49). Der Steuerstand der Universität hingegen verwendet vier Monitore. Diese waren ursprünglich in einer Gruppe aus drei nach vorne und einem Monitor nach hinten ausgerichtet, um die Möglichkeit der 360°-Darstellung wie im VeLABi bestmöglich nachzubilden. Feedback der Schiffsführer zeigte jedoch, dass der rückwärtige Monitor nur schwer zu betrachten war. Dieser wurde somit aus ergonomischen Gründen ähnlich einem Rückspiegel vorne über die anderen Bildschirme gesetzt (vgl. Abbildung 48).

12.2.3 Video-Visualisierung

Besonders entscheidend für die Umgebungswahrnehmung der Schiffsführer am Fernsteuerstand ist die Videoübertragung. Entsprechend werden verschiedene Anforderungen an die Visualisierung der Videoübertragung vom Schiff gestellt:

- Die Darstellung erfolgt möglichst latenzarm, um die aktuelle Situation des Schiffes darzustellen.
- Die Visualisierung funktioniert sowohl im VeLABi-Simulator des DST als auch am Schiffsführungssimulator der Universität Duisburg-Essen.
- Es können mehrere Videoübertragungen je Anzeigeelement (Monitor oder Projektor) abgespielt werden.
- Die Schiffsführer können die Visualisierung individuell können, etwa die Anordnung der Bildwiedergaben ändern oder verschiedene Kamerawinkel tauschen. Dies ist auch während der Fahrt möglich.

Um diese Anforderungen umzusetzen, wurde eine eigene Anwendung auf Basis der Spiel-Engine Unity und dem Open-Source Multimedia-Softwareprojekt FFmpeg entwickelt. Innerhalb der 3D-Umgebung der Spiel-Engine werden bewegliche virtuelle Flächen definiert. Auf diese Flächen werden die einzelnen Videoübertragungen gerendert.

Die virtuellen Flächen können hierbei kreisförmig um den Koordinatenursprung der Spiel-Engine bewegt werden und sind dabei immer auf diesen ausgerichtet, die Größe der Flächen kann stufenlos angepasst werden. Der Abstand der Flächen zu dem Koordinatenursprung (Radius der kreisförmigen Bewegungslinie) kann ebenfalls geändert werden, sodass einzelne Videoübertragungen ähnlich einem Bild-im-Bild-Effekt in den Vordergrund gerückt werden können.

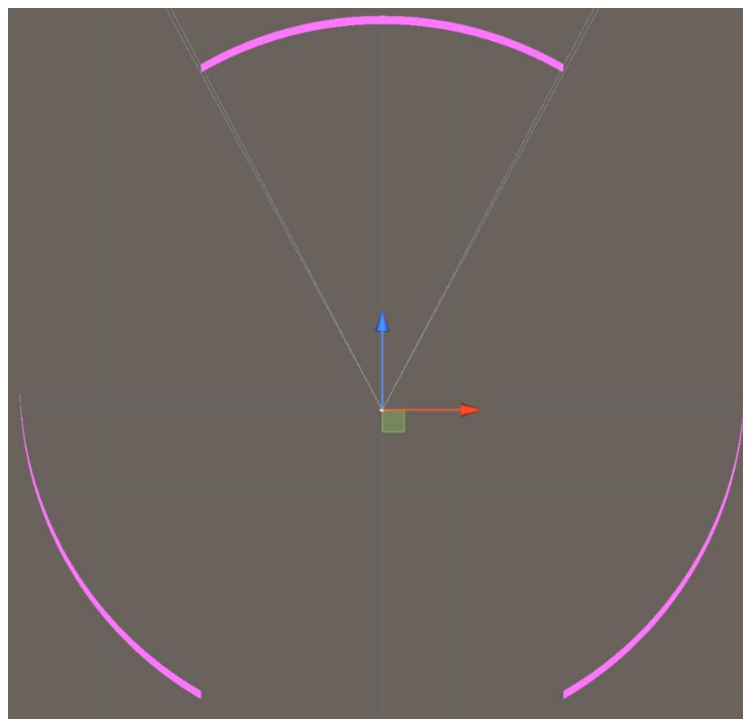


Abbildung 53 Draufsicht auf die Visualisierungsumgebung innerhalb der Spiel-Engine

Jedes Visualisierungsgerät (Projektoren im VeLABi und Bildschirme an der Universität) des Steuerstands kann einen Teilbereich der 360°-Umgebung aus der Spiel-Engine darstellen. Hierzu wird eine Kamera im Koordinatenursprung der Spiel-Engine genutzt, welche um die Hochachse entsprechend

dem Sichtbereich des jeweiligen Visualisierungsgeräts gedreht wird. So entspricht der vordere Bildschirm des Universitäts-Steuerstands einer Rotation von 0° , der Bildschirm für die rückwärtige Sicht demnach 180° . Aufgrund der nur partiellen Abdeckung mit Bildschirmen an diesem Steuerstand können hier auch nur bestimmte Winkelbereiche in der Spiel-Engine gezeigt werden. Das 360° -Projektionssystem im VeLABi jedoch ist in der Lage, die gesamte Spiel-Engine-Umgebung darzustellen.

Die Spiel-Engine-Umgebung ist in Abbildung 53 dargestellt. Hier sind drei virtuelle Flächen zu erkennen, welche jeweils eine Videoübertragung rendern können. Die Kamera ist in dieser Abbildung um 0° rotiert und würde die gesamte vordere Fläche darstellen. Dies stellt die Standardkonfiguration für den vorderen Bildschirm des Universitäts-Steuerstands dar. Generell wird an diesem Simulator standardmäßig eine einzelne Videoübertragung pro Bildschirm genutzt, technisch bietet das Programm die Option mehrere Übertragungen pro Bildschirm darzustellen. Das Videobild wird dabei jeweils ausfüllend auf den Bildschirmen platziert.

Das VeLABi wiederum besitzt keine Bildschirme, sondern ein Projektionssystem mit 19 Projektoren. Jeder einzelne Projektor ist als eigenes Visualisierungsgerät zu betrachten, welches jeweils ein schmales Sichtfeld abdeckt. Aufgrund dieser schmalen Sichtfelder müssen hier mehrere nebeneinander liegende Visualisierungsgeräte genutzt werden, um das Videobild in seiner vollständigen Breite und einer angemessenen Größe abbilden zu können. Während das entwickelte Visualisierungsprogramm dies umsetzen kann, ergibt sich mit der Nutzung mehrerer Visualisierungsgeräte je Videoübertragung das Problem der Mehrfachübertragung (jedes Gerät ruft die Übertragung ab). Durch die Nutzung des landseitigen Video-Servers wird jedoch nicht die begrenzte Mobilfunkverbindung belastet, der Datenverkehr findet ausschließlich im lokalen Steuerstandnetzwerk mit ausreichend Bandbreite statt.

Für den Empfang, das Dekodieren und Verarbeiten der Videoübertragungen wird die Software-Bibliothek FFmpeg verwendet. Bei der Programmierung wird darauf geachtet den Videoabruf sowie das Dekodieren der einzelnen Bilder so effizient und latenzarm wie möglich zu gestalten. So wird auf das Puffern der Videodaten weitgehend verzichtet, sollten mehrere Bilder zeitgleich dekodiert worden sein, wird nur das aktuelle angezeigt.

Manche der an Bord verwendeten Kameras besitzen ein größeres Sichtfeld, verzerren dadurch allerdings das Bild. Betroffen davon sind die 180° -Kameras nach vorne und achtern. Um die Umgebungswahrnehmung für die Schiffsführer zu erleichtern, wurde ein simpler, parameterbasierter Ansatz implementiert, um diese Verzerrung beim Rendern der Videobilder zu eliminieren. Die Parametrierung muss einmalig für jede zu entzerrende Kamera ermittelt werden und hängt von der Ausrichtung der Kameras ab. Zukünftig könnte mithilfe der Kameralinsencharakteristiken die Entzerrung ohne manuelle Parametrierung und mit erhöhter Genauigkeit durchgeführt werden. In der Abbildung 54 ist der Unterschied zwischen dem Originalbild und dem final entzerrtem Bild anhand der 180° -Achterkamera gezeigt. Aufgrund der Umsetzung der Entzerrung beim Rendern, welche jedoch Limitationen hinsichtlich der Komplexität des Programms mit sich bringt, ist mit keiner bzw. einer sehr geringen Latenzerhöhung zu rechnen – ein Entzerren in einer vorgeschalteten, dafür komplexeren Applikation wiederum würde die Latenz aufgrund des Datentransfers mehr erhöhen. Generell bietet die Verwendung der Spiel-Engine einfache Möglichkeiten, um das Videobild nachzubearbeiten.

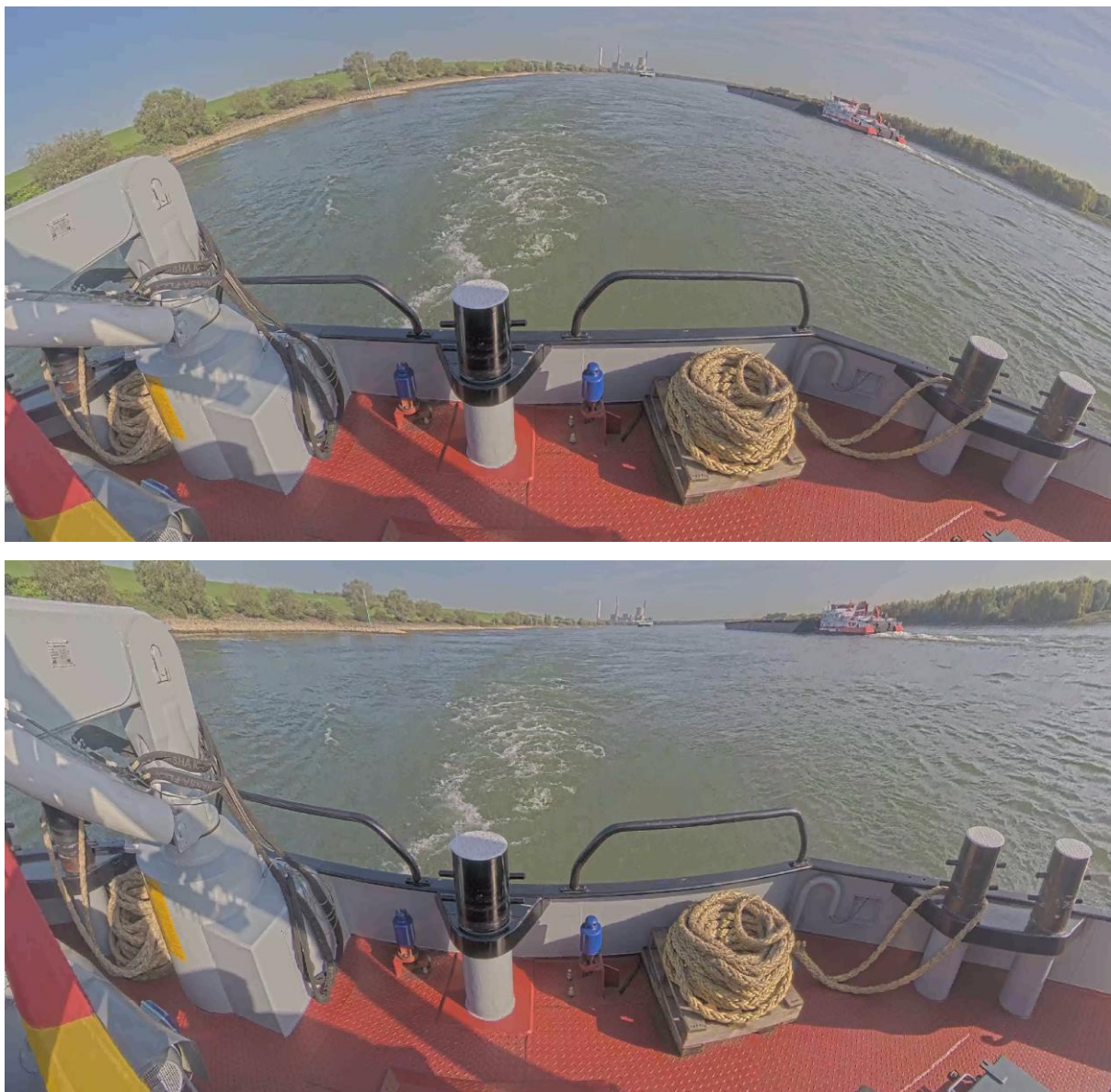


Abbildung 54 Beispielbild der Achterkamera. Oben: Originalbild. Unten: Horizont-begradigtes Bild

12.2.4 Digitale Bedien- und Anzeigeelemente

Neben den zuvor beschriebenen Umgebungsvisualisierung sowie den physischen Bedienelementen sind weitere Bedienungs- und Anzeigeelemente für die Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. *human machine interface*, HMI) im Steuerstand integriert. In der Tabelle 7 ist eine Übersicht über die verschiedenen, auf den Bildschirmen anzutreffenden Elementen gegeben. Die Bildschirme des Steuerstands sind in Abbildung 55 dargestellt.

Der zentrale Monitor wird hierbei von den Projektpartnern ArgoNav und Argonics bespielt. Hier findet sich die Anwendung RadarPilot von ArgoNav in Kombination mit einem von Argonics implementierten Anzeigeband für Navigationsanzeigen. In Abbildung 56 ist die Anzeige dargestellt. Die Anwendung RadarPilot stellt zwei Radaranzeigen bereit, zusätzlich wird eine ECDIS-Oberfläche angezeigt. In dem Anzeigeband sind die folgenden Elemente zu finden: Windmesser, Ruderwinkellage, Wendeanzeiger, Tiefenmesser sowie die Maschinendrehzahlen der Hauptmaschine und des Bugstrahlruders. Die Werte für diese Elemente werden über den OPC UA-Server geteilt. Zusätzlich existiert eine Statusanzeige für den ArgoTrackpilot.

Die hochkant installierten Monitore links und rechts des zentralen Bildschirms werden für die Wiedergabe von Videobildern genutzt. Durch die Ausrichtung der Bildschirme eignen sich hier vor allem auch Kamerabilder im Hochkant-Format.

Im Gegensatz zu den anderen Monitoren besitzen die äußeren Monitore Bedienelemente, welche über die Touch-Funktionalität ansprechbar sind. Auf dem linken Bildschirm werden einerseits das Steuerpanel für den ArgoTrackPilot angezeigt, mit welchem das Bahnführungs-Automatisierungssystem des Schiffs aus dem Fernsteuerstand bedient werden kann. Andererseits findet man daneben das eigens für die Fernsteuerung entwickelte Steuerpanel für die Videowiedergabe. Hierüber können die verschiedenen Kameras an Bord aus- bzw. ausgewählt werden und auf dem Visualisierungssystem bzw. den Hochkant-Monitoren (um-)platziert werden. Zudem können hierüber auch Videoanordnungen gespeichert und diese wieder aufgerufen werden, um gängige Video-Einstellungen schnell abrufbar zu machen.

Der rechte äußere Monitor enthält das Steuerpanel für die Fernsteuerung, welches vom Projektpartner Argonics als Web-Visualisierung implementiert wurde. Hier werden die aktuellen Zustände der Antriebsorgane an Bord sowie die Positionen der Fahrhebel im Steuerstand dargestellt. Über dieses Panel wird zugleich die Übernahme der Fernsteuerung umgesetzt. Zusätzliche Funktionen stellen die Bedienung der blauen Tafel sowie das An- bzw. Abschalten der Bugstrahlrudermaschine dar. Neben diesem Steuerpanel ist ein weiteres Panel für die Funksteuerung zu finden. Hierbei wird die kommerzielle Software „SoftRadio“ des Herstellers Mimer verwendet, um Funkkanäle wählen zu können und am Funkverkehr teilnehmen zu können.

Tabelle 7: Bedien- und Anzeigeelemente je Steuerstand-Bildschirm

Bildschirm	Bedien- und Anzeigeelemente
1	ArgoTrackPilot-Steuerpanel Videobild-Steuerpanel
2	Anzeigefläche Video
3	Radar ECDIS Navigationsanzeigen
4	Anzeigefläche Video
5	Fernsteuer-Übernahme-Panel Funk-Panel



Abbildung 55 HMI-Elemente Steuerstand in der Draufsicht in der Draufsicht

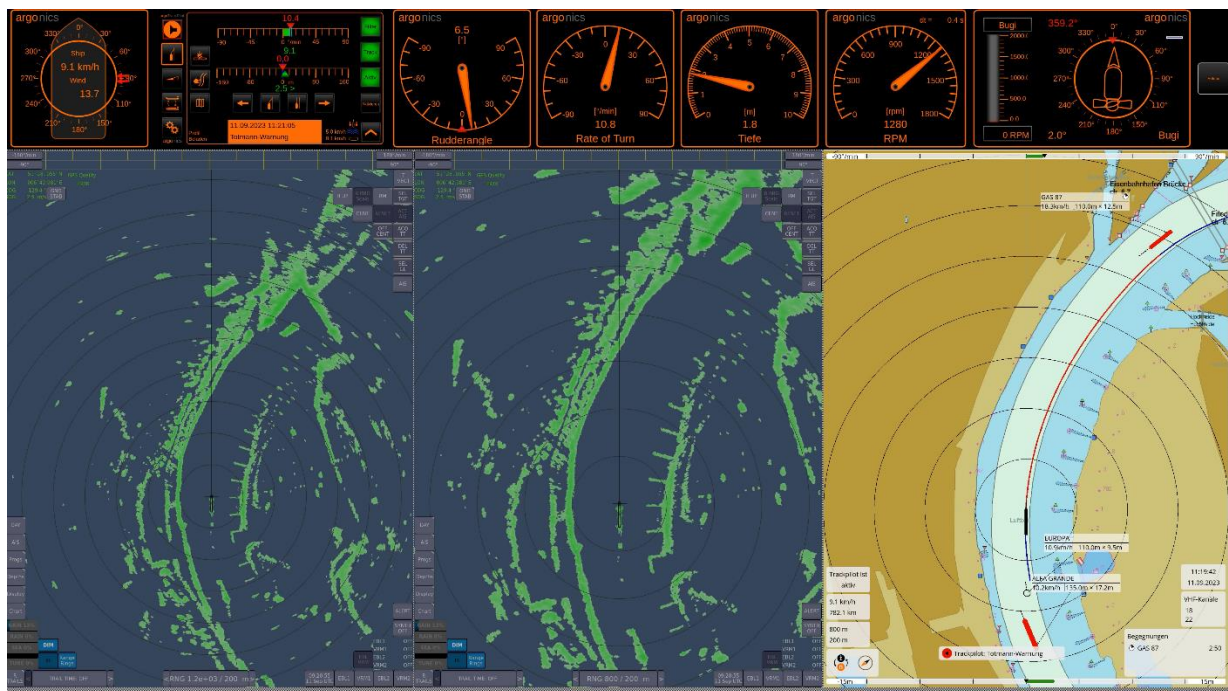


Abbildung 56 Anzeige von Radar, ECDIS und Navigationselementen auf dem zentralen Monitor

12.2.5 Netzwerkstruktur Fernsteuerstand

Der Fernsteuerstand besteht aus einem eigenen lokalen Netzwerk. In diesem Netzwerk befinden sich ausschließlich Geräte, welche für den Betrieb des Steuerstands benötigt werden. Dies sind die PCs, welche zur Visualisierung der Videostreams und der Bedienelemente auf den Bildschirmen des Steuerstands verwendet werden. Weitere Netzwerkkomponenten sind die SPS für die Ansteuerung der physischen Bedienelemente, ein Router der Firma PepLink zur Verbindung zum Schiff, ein Server für das Hosten des Videoservers und des lokalen OPC UA-Servers.

Das Netzwerk ist in Abbildung 57 schematisch dargestellt. Während für die Anzeigen des Visualisierungssystems gilt, dass jede Anzeige von einem eigenen Rechenggerät bespielt wird, sind die vier

Touchscreen-Monitore des Steuerstands an einem einzigen Rechner angeschlossen. Der mittlere Bildschirm des Steuerstands mit der Radar- und ECDIS-Anzeige ist wiederum mit einem gesonderten Rechner verbunden. Der Video-Server wie auch der OPC UA-Server sind als virtuelle Maschinen auf einem weiteren Rechner installiert und über eine Netzwerkbücke mit dem Netzwerk verbunden, sodass jeder Server eine einzigartige IP-Adresse besitzt. Der Router des Typs „PepLink MAX Transit Duo Pro“ an der Universität Duisburg-Essen sowie ein „PepLink Balance“ am DST bauen eine VPN-Kommunikation mit dem Schiff auf (vgl. Kapitel 13). Der Router ist als Gateway zu den IP-Adress-Bereichen des Schiffes eingetragen, um die Kommunikation aller Netzwerkteilnehmer zum Schiff zu ermöglichen.

Die Netzwerke sind nach außen hin durch Firewalls abgesichert, innerhalb des Netzwerks wird mithilfe von Access Control Lists (Zugriffskontrolllisten, ACLs) und VLANs (Virtual Local Area Network) die Kommunikation zum Schiff auf die Geräte beschränkt, welche den Zugriff benötigen.

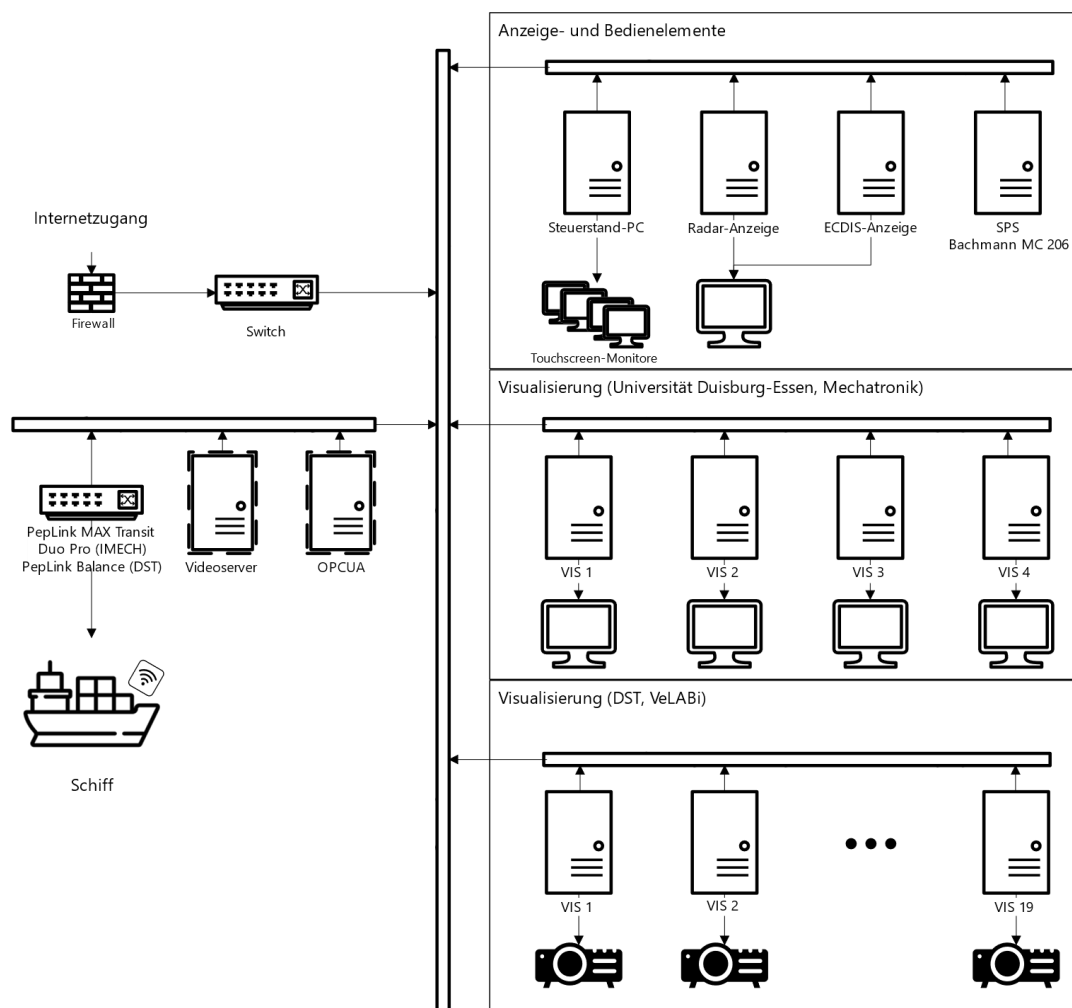


Abbildung 57 Netzwerkinfrastruktur Fernsteuerstand

13 Entwicklung der Kommunikationsschnittstelle

13.1 Analyse der Datenübertragung

Im Rahmen der Analyse der Datenübertragung wurden die Daten der Mobilfunkmodems herangezogen. Im Rahmen der Analyse wurden folgende Aspekte als wesentlich identifiziert:

- Die Signalstärke und -qualität erweisen sich als besonders kritische Faktoren für die zuverlässige Fernsteuerung von Binnenschiffen.
- Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Analyse der Datenübertragungsraten. Dies ist von entscheidender Bedeutung für die Echtzeitübertragung von Steuerungsbefehlen und Sensordaten.
- Ein weiterer wesentlicher Aspekt sind die Latenzzeiten. Sie müssen minimal sein, um eine schnelle Reaktion des ferngesteuerten Schiffs zu gewährleisten.
- Die Analyse der Netzwerkabdeckung entlang der Wasserstraßen erlaubt die Identifikation von Bereichen mit unzureichender Verfügbarkeit.

Die Erfassung von Metriken wie Technologie, Latenz und Signalstärke ermöglichte die Identifikation von Engpässen. Allerdings standen verschiedene Daten, beispielsweise die verfügbare Bandbreite der einzelnen Funkzellen, nicht zur Verfügung.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Daten der Versuchsfahrt vom 22.02.2024 vom Vinckekanal im Duisburger Hafen bis durch die Schleuse Oberhausen und zurück präsentiert.

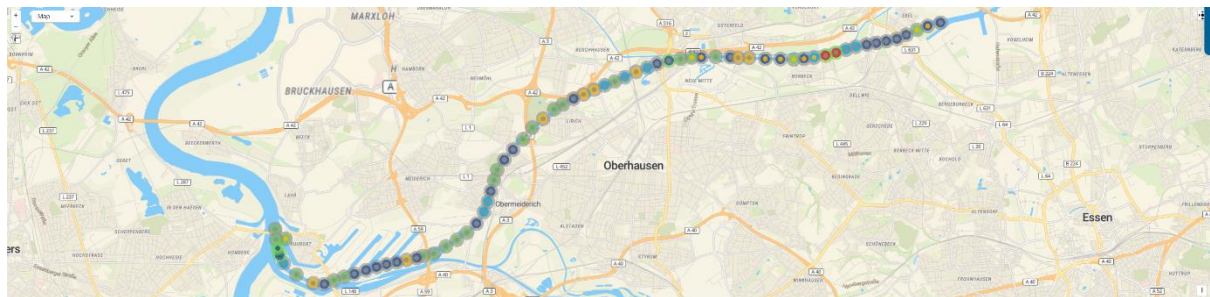


Abbildung 58 Abbildung Mobilfunk Vodafone am 22.02.2024

Die auf der Karte in Abbildung 58 dargestellten Punkte symbolisieren – von außen nach innen – Latenz, Signalstärke und Signalqualität an den Positionen.

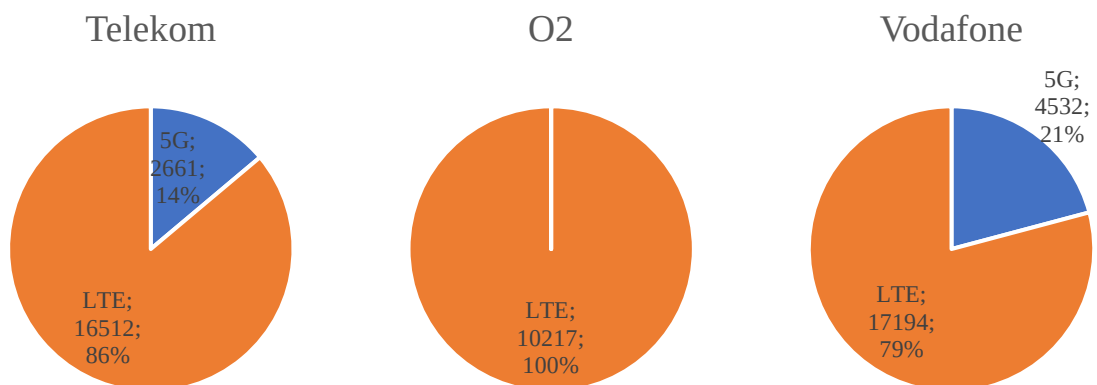


Abbildung 59 Technologieverteilung 22.02.2024

Die in Abbildung 59 dargestellten Verbindungen zu den einzelnen Providern sowie die Technologieverteilung lassen eine geringe 5G-Abdeckung im Bereich der gefahrenen Strecke erkennen.

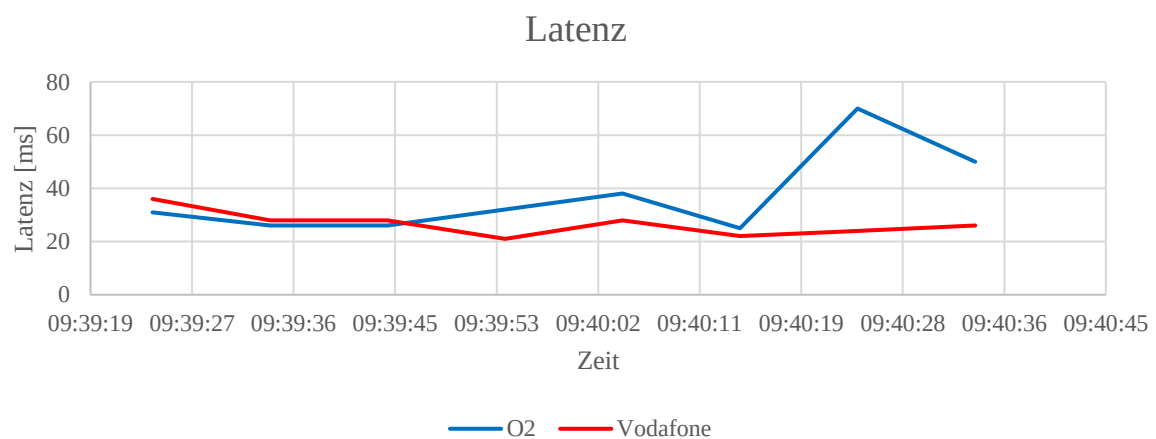
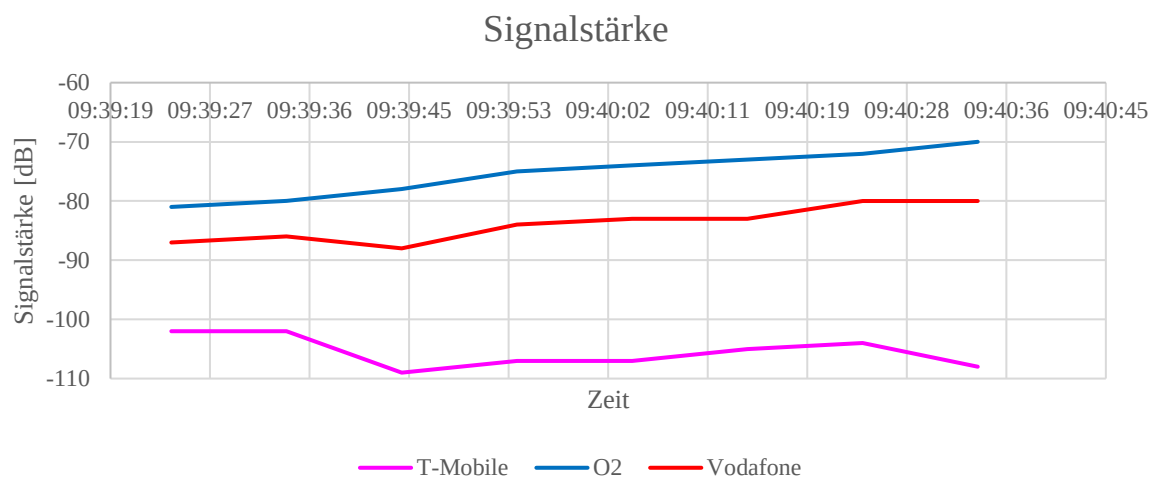
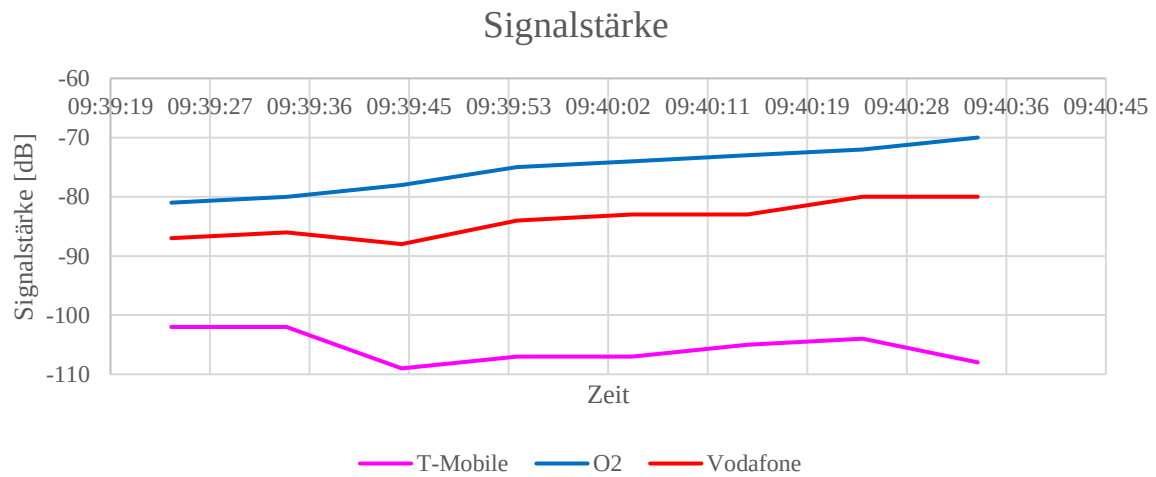


Abbildung 60: Signalstärke, Signalqualität und Latenz am Punkt 51° 28' 30.065" N 006° 48' 33.71" O

Die Abbildung 60 präsentiert eine exemplarische Analyse der Messdaten der Mobilfunkverbindungen für die Position 51° 28' 30.065" N 006° 48' 33.71" O. Es lässt sich eine klare Trennung der verfügbaren Signalstärke der drei Provider erkennen. Das Signal der Telekom ist an dieser Position jedoch so schwach, dass eine Latenzmessung nicht mehr möglich war.

13.2 Kommunikationsprotokoll mit Eigenschiff

Die Kommunikation des Steuerstands mit dem Schiff erfolgt entsprechend der Systemarchitektur über eine VPN-Verbindung. Hierfür wird eine Lösung der Firma *PepLink* genutzt, sowohl an Bord als auch in den Steuerständen ist jeweils ein *PepLink*-Router verbaut, zwischen welchen eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut werden kann. Hauptfunktion des *PepLink*-Routers an Bord des Schiffs ist die Bündelung von verschiedenen Mobilfunkanbietern und die intelligente Aufteilung der anstehenden Datenübertragung auf die jeweils vorhandenen Kapazitäten in den Mobilfunknetzen. Zur Nutzung weiterer Synergien wird das „SpeedFusion VPN“ des Herstellers *PepLink* zum Aufbau des virtuellen Netzwerks mit den Teilnehmern Schiff, Fernsteuerstand und Steuerzentrale verwendet. Die IP-Adressbereiche der Steuerstände untereinander als auch zum Schiff unterscheiden sich dabei, um Adresskonflikte zu vermeiden und den administrativen Aufwand zu minimieren. Über die VPN-Verbindung sind alle verbundenen Geräte an Bord und im Steuerstand in der Lage, Informationen auszutauschen.

Wie in der Systemarchitektur beschrieben, soll die Mehrfachübertragung von Videostreams zwischen Schiff und dem Fernsteuerstand vermieden werden, da die verfügbare Bandbreite begrenzt ist. Aus diesem Grund ist ein Videoserver im Steuerstand installiert, welcher die Videostreams einmalig vom Schiff abrufen und diese dann lokal den anderen Anwendungen bereitstellt. Landseitige Anwendungen können die Videos somit ohne zusätzliche Belastung der eingeschränkten Mobilfunkverbindung zum Schiff anfordern. Dies spielt vor allem aufgrund der Multi-Beamer-Projektionsanlage im VeLABi-Simulator des DST eine entscheidende Rolle, welche im nachfolgenden Kapitel 12.2.3 erläutert wird. Ebenso werden die Radarbilder nur einmalig vom Schiff abgerufen, dies erfolgt über den „RadarProxy“ des Projektpartners Argonav. Von dem RadarProxy aus können Anwendungen landseitig die Radarbilder erhalten.

Zur Übertragung der Videostreams zwischen Schiff und Anwendung wird das Netzwerkprotokoll RTSP verwendet. Die Videos werden hierbei in H.264 kodiert. Die Kodierung in H.265 wurde aufgrund der größeren Kompression und somit geringeren, benötigten Bandbreite getestet. Mit der Nutzung von H.265 gibt es jedoch zwei Probleme: Zum einen unterstützen die meisten an Bord installierten Kameras diese Kodierung nicht. Somit ist ein Umkodieren auf einem Server an Bord notwendig, wodurch weitere Latenzen bei der Übertragung zustande kommen. Zum anderen sind aufgrund der höheren Kompression mehr Informationen über das anzuzeigende Bild pro Datenpaket enthalten. Bei Paketverlust fehlen somit auch mehr Informationen, was sich in stark fragmentierten Bildern bemerkbar macht. Aufgrund der Verwendung von Mobilfunk und gerade in Gebieten mit schlechter Mobilfunkanbindung ist Paketverlust häufiger zu beobachten, wodurch sich die Bildübertragung mit H.265 Kompression als deutlich fehleranfälliger als bei Verwendung von H.264 herausstellte.

Die Kommunikation für die Steuerbefehle zwischen Fernsteuerstand und ferngesteuertem Schiff erfolgt über OPC UA. Hierbei ist der Server auf dem Schiff platziert, damit die Geräte an Bord auch bei einem Verbindungsabbruch Zugriff auf diesen Server haben. Auf dem Server hat jeder Projektpartner einen eigenen Bereich, in welchem die benötigten Daten abgelegt werden können.

13.3 Kommunikation zwischen Leitstelle und Schiffen

Zur Bearbeitung des AP 6300 wurde eine Literaturstudie zur Kommunikation im Binnenschiffsverkehr durch UKW-Funk und Schifffahrt durchgeführt, um den aktuell praktizierten Kommunikationsweg und Standardnachrichten in der Binnenschifffahrt hinsichtlich möglicher Übertragbarkeiten zu untersuchen. Hier zeigte sich, dass in der aktuellen Situation unter der Berücksichtigung der technischen Ausstattung der Flotte für die Kommunikation mit Fremdschiffen nur über analogen UKW-Funk erfolgen kann. Hierfür können analog zu dem aktuellen, standardisierten Sprechfunk die notwendigen Informationen

zwischen Leitstelle und Schiffen ausgetauscht werden. Ein eigenes Kommunikationsprotokoll hierfür kann durch die entsprechenden Gremien festgelegt werden.

Das Eigenschiff hingegen kann aufgrund seiner guten technischen Ausstattung auch durch elektronische Nachrichten erreicht werden.

Im Rahmen eines Projekttreffens wurde entschieden, das FernBin AP 6300 zweigeteilt zu bearbeiten. Hier wird unterschieden zwischen

- der Kommunikation zwischen Leitstelle und Eigenschiff (Bearbeitung durch DST)
- der Kommunikation zwischen Leitstelle und Fremdschiff (Bearbeitung durch ibk)

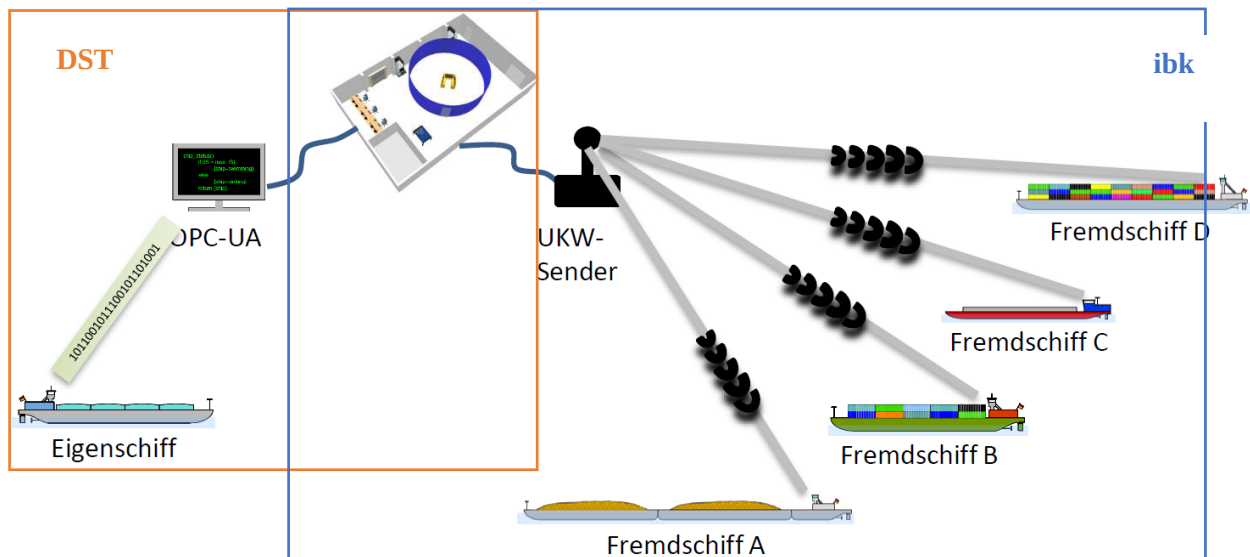


Abbildung 61: Skizzierung der Aufteilung des FernBin AP 6300

Für die Kommunikation mit Fremdschiffen wurden Entscheidungsbäume für verschiedene Situationen, die eine Kommunikation von der Leitstelle notwendig machen, erstellt. Ein Überblick über die identifizierten, relevanten Situationen gibt Abbildung 62.

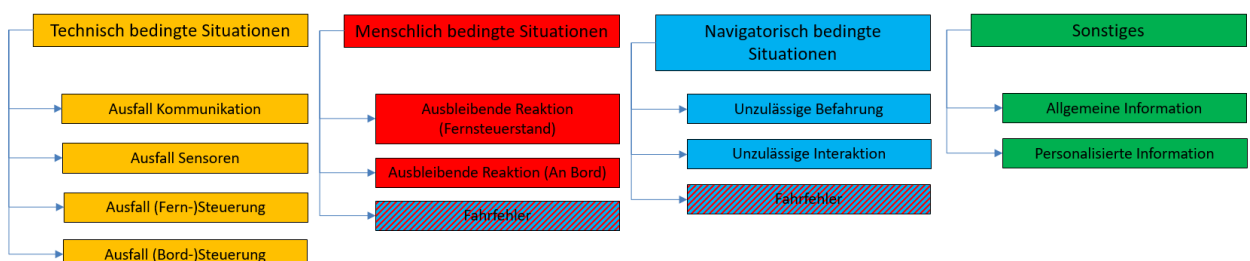


Abbildung 62: Relevante Situation für die Kommunikation von der Leitstelle

13.4 Kommunikation mit anderen Schiffen

Zur Bearbeitung des AP 6400 wurden im Rahmen einer Literaturstudie zu AP 6300 bereits erste Anhaltspunkte für die Bearbeitung gesammelt. Da zudem, wie auch bei der Kommunikation von Leitstelle zu den Fremdschiffen, die Verbindung über UKW-Sprechfunk erfolgen muss, können auch hier bekannte Protokolle aus dem Binnenschiffahrtfunk übernommen und angepasst werden. Auf diese Weise kann eine sternförmige Verteilung (siehe Abbildung 63) an andere Verkehrsteilnehmer erfolgen, was vor allem in sicherheitsrelevanten Fällen von hoher Bedeutung ist.

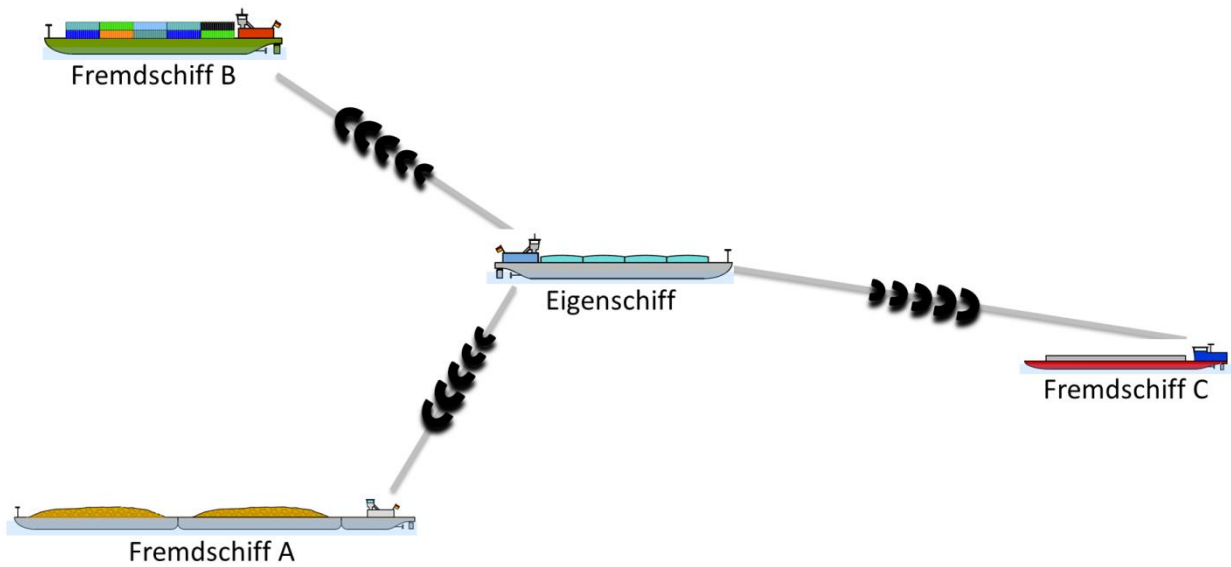


Abbildung 63: Kommunikationsweg vom Eigenschiff zu Fremdschiffen

Neben der Übertragung von Informationen über Sprechfunk, ist es möglich, per UKW-Funk Informationen über AIS-Telegramme zu versenden. So ist in Message-Type 14 ein Parameter „sparm“ („Safety Related Broadcast Message“) enthalten, der für zukünftige Nutzung vorgesehen ist, aber aktuell nicht genutzt wird. Hier könnte ein Flag für den jeweiligen Steuerungsmodus gesetzt werden, beispielsweise

1. Manuell an Bord
2. Manuell per Remote
3. (Teil-)Automatisiert
4. Ohne Steuerung (Ausfall)

14 Leitstelle

14.1 Softwarearchitektur der Leitstelle

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde durch die Firma in-innovative navigation GmbH (IN) und weitere Projektpartner eine Leitstelle für die Schiffsfernsteuerung konzipiert und aufgebaut. Der IN-Anteil der Leitstelle dient in der Art eines VTS-Systems der Überwachung des Schiffsverkehrs entlang der Teststrecke und kann koordinierende Aufgaben erfüllen. In der Leitstelle laufen alle Informationen über den Verkehr auf der betreffenden Wasserstraße zusammen. Zusätzlich kann die Leitstelle unterschiedliche Informationen aus externen Systemen und Modulen darstellen, wie z. B. eine prognostizierte Verkehrssituation oder Warnmeldungen und Alarmer. Dazu wurden generische Schnittstellen geschaffen, über die Daten in das VTS-System eingespielt und dort verwaltet und dargestellt werden können.

Über einen integrierten Schiffssimulator ist die Leitstelle auch in der Lage, als Testdatengenerator zum Einsatz zu kommen. Der Simulator bildet das Testschiff und einen Großteil der Onboard-Sensorik, wie Radar, AIS, GPS, Wendeanzeiger und Laserscanner nach. Mit dem Simulator können beliebige Verkehrsszenarien erstellt werden, um z. B. Konfliktsituationen gefahrlos untersuchen zu können.

Die Verkehrslageanzeige der Leitstelle hat folgende Systemarchitektur:

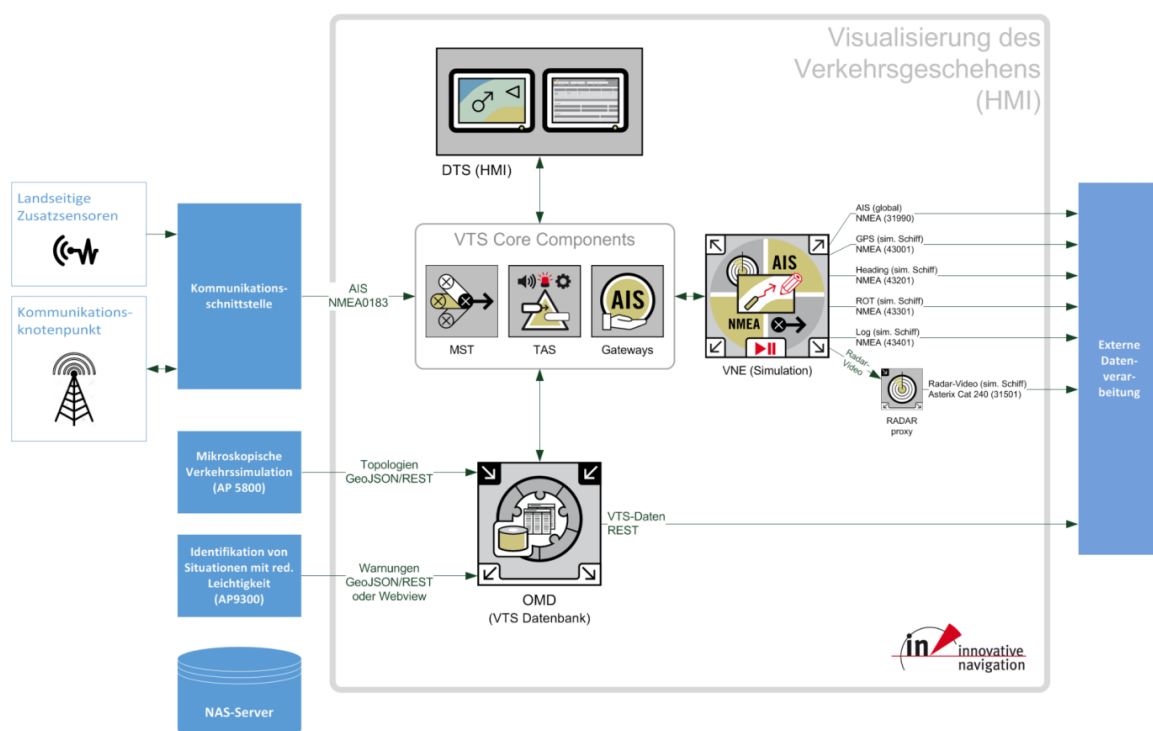


Abbildung 64 Softwarearchitektur und Schnittstellen der Leitstelle (IN-Anteile)

Zusammengefasst besitzt die Leitstelle folgende Funktionen:

- Enthält die wichtigsten Grundkomponenten eines modernen VTS-Systems
- Darstellung der Verkehrslage auf einer modernen VTS-Anzeige
- REST-Schnittstellen zum Zugriff auf aktuelle und historische VTS-Daten
- REST-Schnittstellen zur Visualisierung von externen Topologien und Routen
- REST-Schnittstelle Einspeisung von Alarmen

- interaktives Erstellen von VTS-Prüfszenarien unter Nutzung verschiedener Bibliotheken (Verkehrsgebiete, Verkehrsobjekte, Routen)
- Möglichkeit zur Nachbildung komplexer Verkehrsabläufe durch Automatismen (Routenfolger, Objektfolger, Skripte)
- Bereitstellung von simulierten VTS-Daten zu Testzwecken (Radarvideo, Track-Daten, NMEA-Daten, AIS-Daten)

Die Leitstelle besteht aus einem Kern von Software-Modulen, wie sie auch in anderen VTS-Systemen der Firma IN zum Einsatz kommen. Diese dienen der Erfassung von Messdaten, deren Verarbeitung (insbesondere Multisensor-Tracking), der Erkennung von Verkehrskonflikten und der Bereitstellung der Daten für andere Komponenten (Datenbank, Anzeige, externe Systeme).

Die VTS-Datenbank OMD speichert die vorverarbeiteten Messdaten und bietet diverse REST-Schnittstellen zum Zugriff auf die VTS-Datenlage.

Die VTS-Datenanzeige DTS dient als eigentliches HMI zur Darstellung der Verkehrslage (siehe folgende Abbildung).

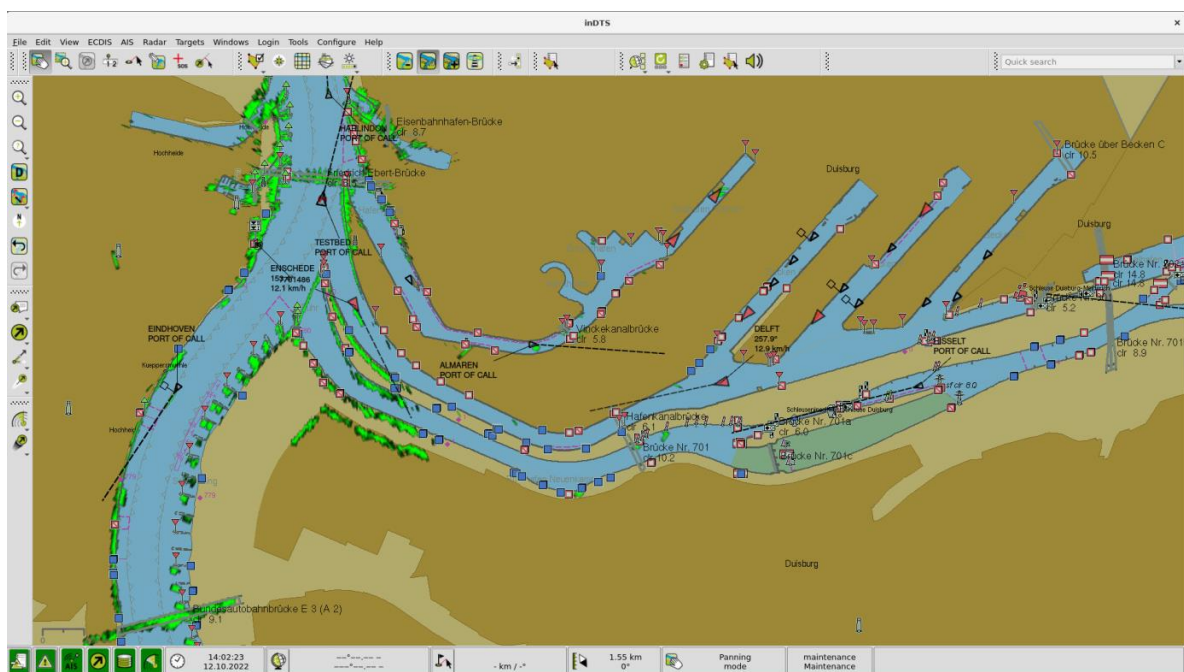


Abbildung 65 Software der Leitstelle: Verkehrslageanzeige DTS

Für Testzwecke können die Messdaten, insbesondere Radarvideo, GPS und AIS, auch durch einen Simulator (VNE) bereitgestellt und als Datenquelle für den Test externer Komponenten verwendet werden (siehe folgende Abbildung).

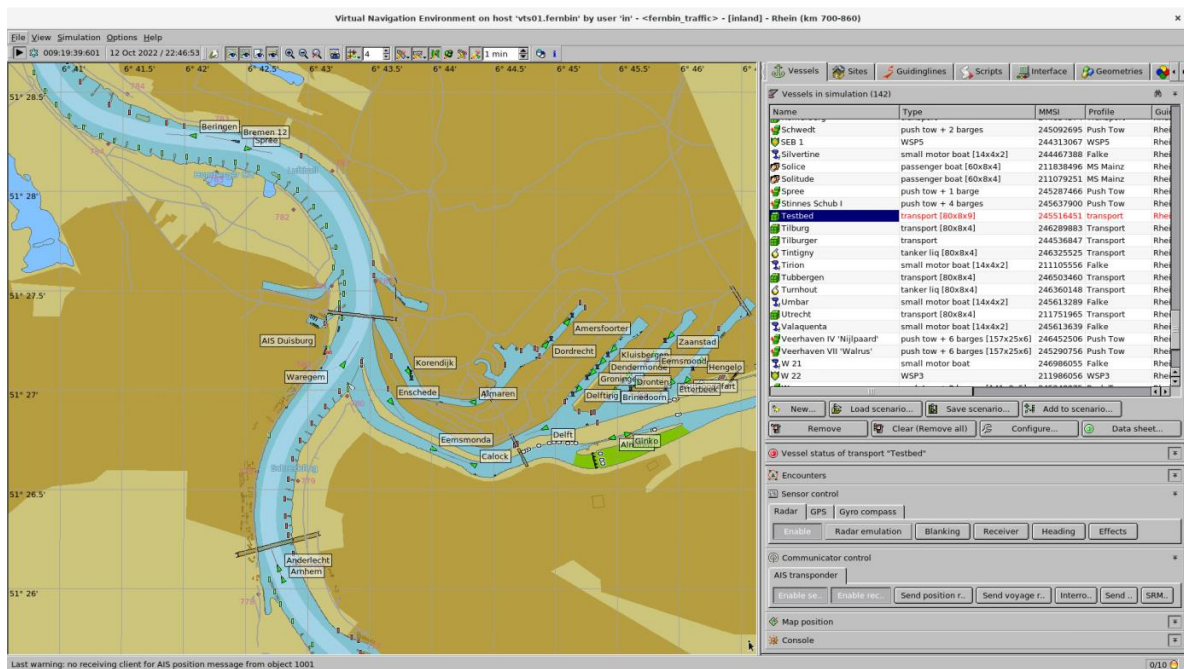


Abbildung 66 Software der Leitstelle: Simulationsumgebung VNE

Sämtliche Komponenten der Verkehrslageanzeige sind kompakt auf einer Workstation untergebracht. Die Darstellung erfolgt auf zwei Monitoren.

Die Nutzerschnittstelle besteht aus:

- DTS (Display for Traffic Surveillance): VTS-Verkehrslagedarstellung
- VNE (Virtual Navigation Environment): VTS-Verkehrssimulator und Datengenerator

Der VTS-Kern besteht aus:

- MST (Multisensor-Tracker): erzeugt aus verschiedenen Sensordaten ein einheitliches Verkehrslagebild durch Kalmanfilterbasierte Sensordatenfusion
- OMD (Object Management and Distribution): VTS-Datenbank
- TAS (Traffic Analysis System): dient zur Analyse von Verkehrssituationen zum Zweck der Konflikterkennung und Nutzerwarnung

Der VNE-Simulator nutzt diverse vorkonfigurierte Daten, wie Karten und Übungsgebiete, Routen, Simulationsobjekte (z. B. Schiffsmodelle) und erlaubt es, Szenarien zu erstellen und abzulegen. Realistische Schiffsbewegungen können durch unterschiedliche Methoden erzeugt werden. Dazu gehören modellbasierte Verfahren, Routenfolger und Skripte aber auch Aufzeichnungen realer Szenarien und das Einspielen von aktuellen AIS-Daten (siehe [inVNE-UM]).

Weitere Schnittstellen dienen zur Bereitstellung von Simulationsdaten an externe Prozesse:

- digitales Radarvideo im Format ASTERIX Cat 240 [Ast2020],
- ASTERIX Cat 10 und Cat 62 für Trackdaten [Ast2020],
- NMEA 0183 TTM/TLL für Trackdaten [IEC61162],
- NMEA 0183 VDM für AIS-Daten [ITU1371].

Zusätzlich stellt die Leitzentrale REST-Schnittstellen für die Projektpartner bereit. Über diese Schnittstellen können georeferenzierte Grafiken (zum Beispiel Trajektorien) sowie Warnungen und Alarmer in die Leitzentrale eingespielt und dort visualisiert werden. Diese Schnittstellen werden in den nächsten Abschnitten beschrieben.

14.2 Schnittstelle zur Darstellung geo-referenzierter trackbezogener Topologien

Die Leitzentrale stellt eine generische Datenschnittstelle zur Definition und Visualisierung von Schiffstrajektorien, Verkehrskorridoren, Begegnungszonen und sonstigen Gefahrenbereichen zur Verfügung. Diese topologischen Objekte werden nicht in relativen, sondern in absoluten Koordinaten also geo-referenziert angegeben. Die Daten zu den Topologien werden nicht zentral verwaltet, sondern immer einem Schiff (bzw. allg. einem Track) zugeordnet und mit diesem in der VTS-Datenbank verwaltet. Die trackbezogenen Topologien haben einen temporären Charakter, d. h. sie gelten nur maximal für die Lebenszeit des Tracks und werden auch nur bei Sichtbarkeit des Tracks dargestellt.

Ganz allgemein können also über diese Schnittstelle externe Anwendungen in die Darstellung des Traffic-Displays eingreifen und diese mit Visualisierungen eigener Berechnungen ergänzen. Die Schnittstelle wurde bewusst so allgemein realisiert, dass auch zukünftige Module diese nutzen können. Als grafische Objekte stehen Linien und Polygonzüge in beliebiger Farbe, Flächen (auch mit Füllmuster), Symbole und Text zur Verfügung. Bei Bedarf kann eine unterschiedliche Darstellung bei Tag- und Nacht-Anwendungen gewählt werden.

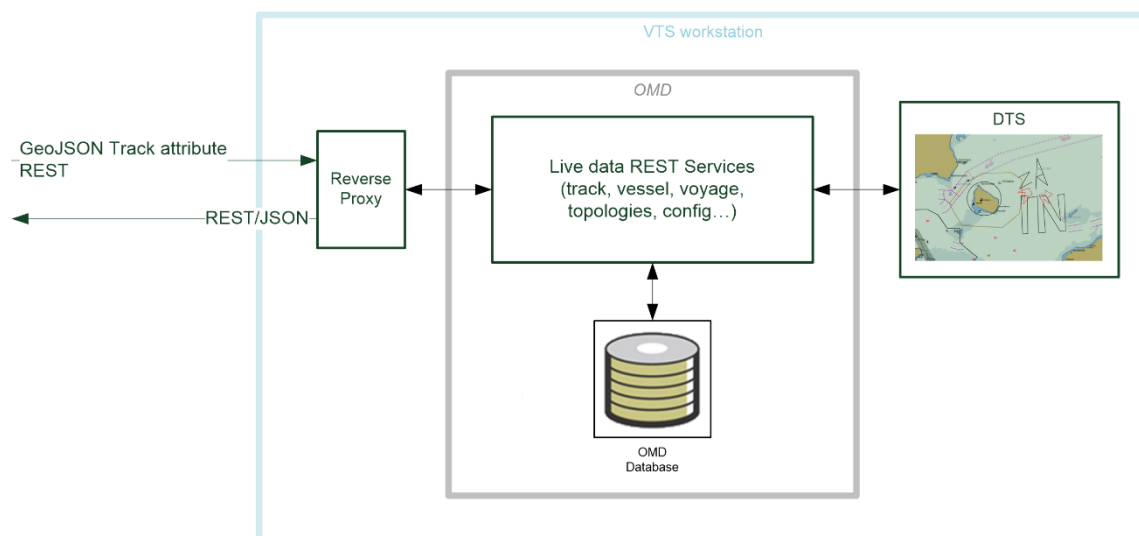


Abbildung 67 Schematische Darstellung der GeoJSON-Attribut-Schnittstelle

Für die Umsetzung wird der *TrackAttributeService* über die OMD REST Schnittstelle verwendet (siehe [inOMD-API] und obige Abbildung). Die gewünschte Topologie-Darstellung wird als GeoJSON-Dateneinhalt in einem Track-Attribut vom Typ String abgelegt. Die VTS-Software inDTS wurde so erweitert, dass über einen zusätzlichen Display-Filter auf dieses String-Attribut verwiesen werden kann und dessen Inhalt, sofern syntaktisch korrekt, auf der ENC dargestellt wird. Grundsätzlich kann dazu jedes String-Attribut verwendet werden. Es ist auch möglich, ein Schiffs-Attribut, welches im *ExtendedTrackModel* vorhanden ist, als Quelle der Track-Visualisierung zu wählen. Die Visualisierung der trackbezogenen Topologie ist unabhängig von der Visualisierung des "normalen" Track-Symbols.

68Zusammengefasst erfolgt die Kodierung der topografischen Daten in einer GeoJSON-Struktur, die dann per REST-Patch-Kommando in die VTS-Datenbank (OMD) eingetragen wird. Die Daten werden

über Track-Attribute verwaltet, die Darstellung auf dem Traffic Display DTS wird über Display-Filter-regeln gesteuert (siehe [inDTS-UM]).

Die Bedienung der Schnittstelle wird in den folgenden Code-Beispielen dargestellt.

Zur Nutzung der Schnittstelle muss der externe Client die gewünschten Topologie-Daten zunächst als GeoJSON-String kodieren (siehe [RFC7946]).

Hier ein Beispiel für eine einfache mit GeoJSON kodierte Linie:

```
{
  "type": "FeatureCollection",
  "features": [
    {
      "type": "Feature",
      "properties": {},
      "geometry": {
        "type": "LineString",
        "coordinates": [
          [
            8.36598878,
            53.9893131
          ],
          [
            8.42745721,
            53.98441641
          ]
        ]
      }
    }
  ]
}
```

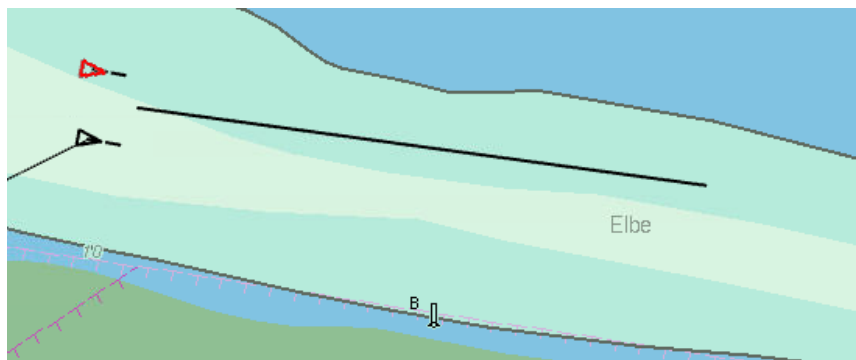


Abbildung 69 Mit GeoJSON erzeugte Linie wird in der inDTS dargestellt

Weitere GeoJSON-Beispiele findet man in [GTA2022].

Die GeoJSON-Daten werden im value-Feld der JSON-Struktur als String übergeben:

```
{
  "$schema": "http://OMDHOST/in-omd/schema/private/track-patch",
  "features": {
    "user.geoJson": {
      "value": "### Encoded GeoJSON string ###"
    }
  }
}
```

Der Attribut-Name user.geoJson ist hier nur beispielhaft und kann anwendungsspezifisch angepasst werden. Wenn mehrere Topologie-Funktionen vorgesehen werden, können auch mehrere Attribute angelegt werden, jeweils mit Bezug zur Funktion der Topologie.

Die GeoJSON-Daten müssen im Feld value so eingetragen werden, dass sie die Container-JSON-Struktur nicht zerstören, d. h., alle Anführungszeichen müssen mit vorangestelltem \ „escaped“ werden und alles muss in einer Zeile stehen. Zeilenumbrüche können durch \n ersetzt werden.

Diese Struktur muss dann per http PATCH-Kommando an das VTS-System der Leitstelle gesendet werden, um das Track-Attribut zu schreiben. Das geht zum Beispiel mit curl:

```
curl -X PATCH https://OMDHOST/in-omd/api/tracks/:track -d '###JSON-Data###'
```

Unter Umständen sind noch die Parameter -k und -p für die Authentifizierung nötig. Die JSON-Daten kann man auch in einer Datei übergeben mit -d @file.json

:track ist ein Platzhalter für die Track-ID des Tracks, dessen Topologie gesetzt werden soll. Diese ID erhält man, indem man zunächst mit Hilfe des REST Track Services die bekannten Tracks abfragt und das Feld id oder self ausliest.

Diese Schnittstelle wurde implementiert und dokumentiert (siehe [GTA2022]). Eine vollständige Beschreibung der OMD REST services findet sich in [inOMD-API]. Eine Einführung in die Verwendung von REST und JSON findet man z. B. in [Til2015]. Einen Überblick über die Kodierung von geo-referenzierten Objekten mit GeoJSON gibt [RFC7946].

Die Darstellungsoptionen umfassen Linien, Polylinien, Polygone, Symbole sowie Text. Bei Bedarf kann eine unterschiedliche Darstellung bei Tag- und Nacht-Anwendungen gewählt werden.

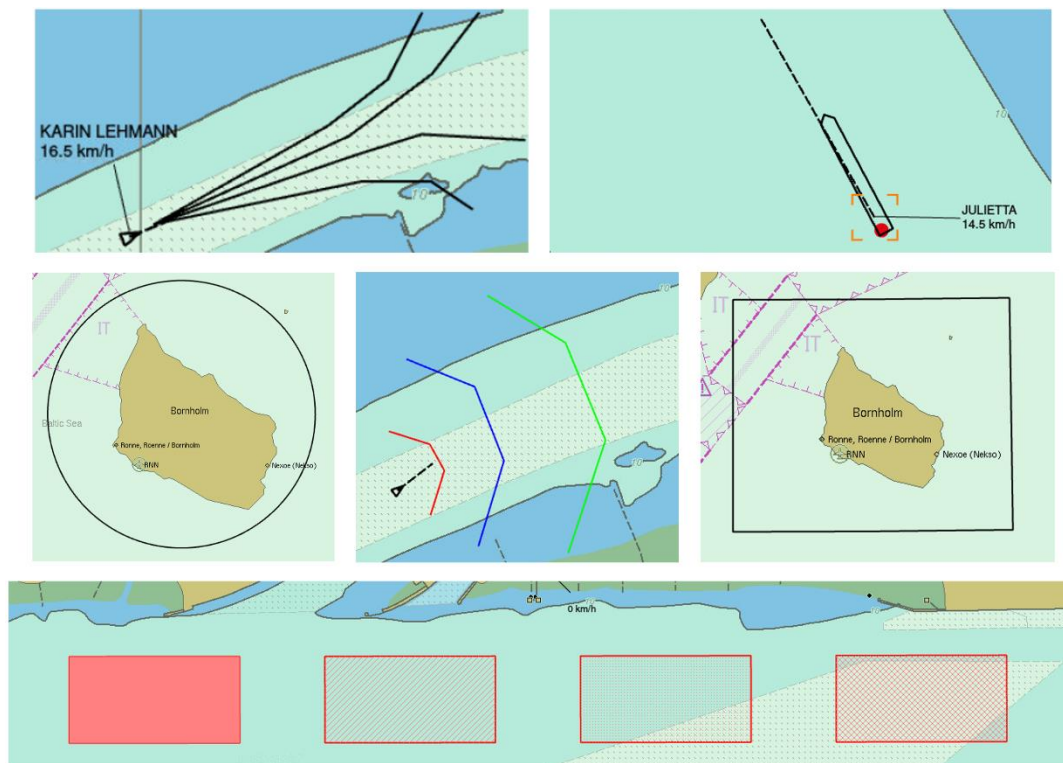


Abbildung 70 Beispiele für verschiedene einfache GeoJSON-Objekte

Die folgende Abbildung zeigt eine durch ein externes System erzeugte Solltrajektorie, die über die GeoJSON-Schnittstelle an das VTS-System der Leitstelle übertragen und auf der DTS dargestellt wird.

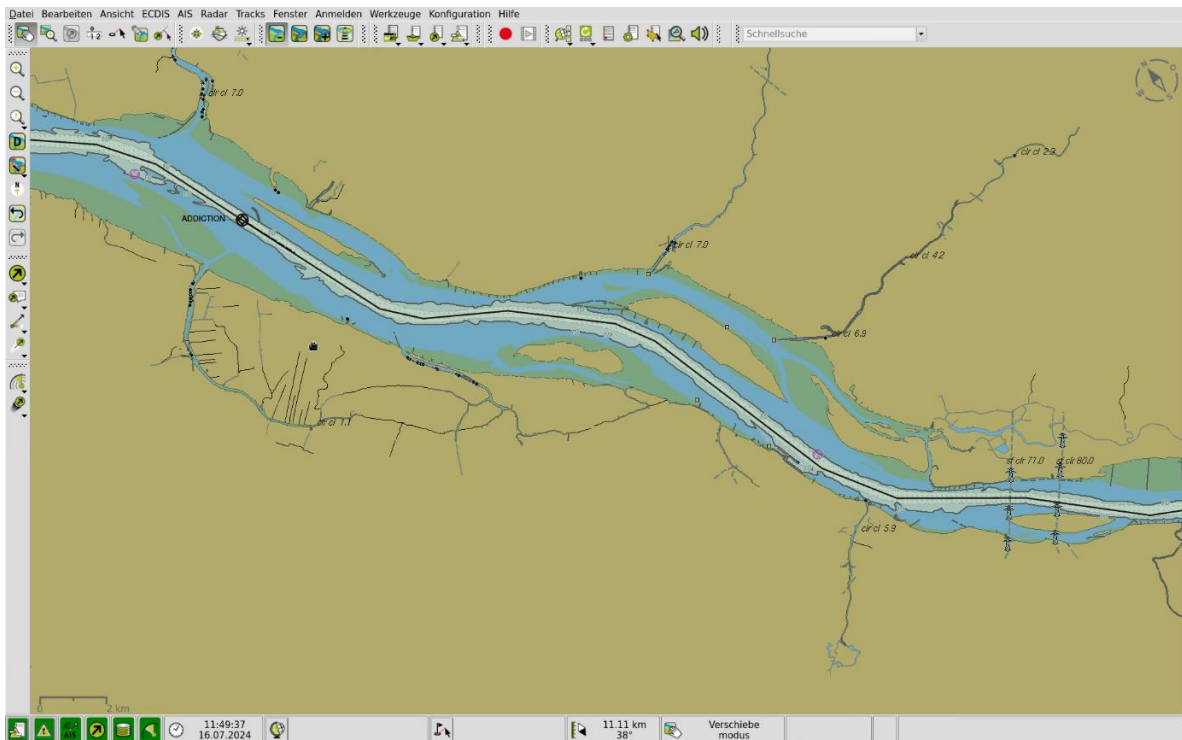


Abbildung 71 Darstellung einer extern generierten Solltrajektorie (schwarze Linie)

Entlang dieser Trajektorie könnten nun z. B. auch zukünftige Positionen des Schiffes unter Berücksichtigung der Flusskrümmungen abgeschätzt und Begegnungszonen mit anderen Schiffen prädiziert werden. Dies ist exemplarisch in der folgenden Abbildung am Beispiel der voraussichtlichen Passierposition zweier aufeinander zufahrender Schiffe in einer Flussbiegung dargestellt.

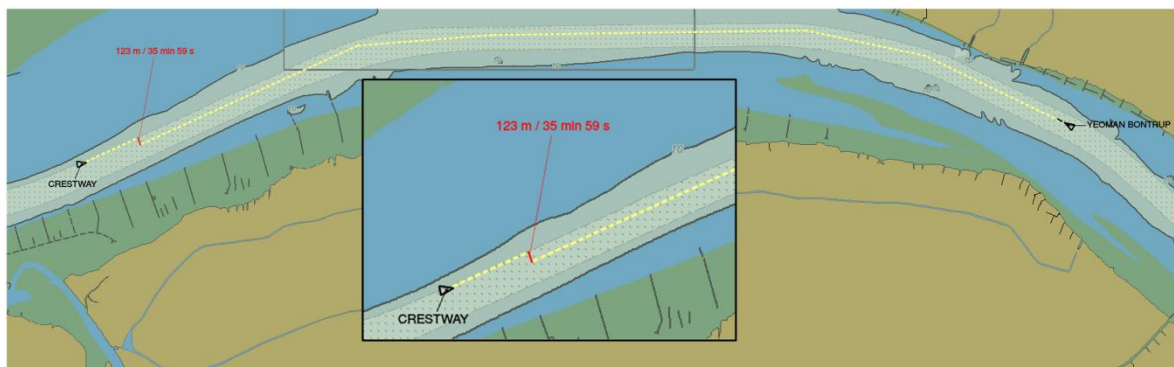


Abbildung 72 Beispieldarstellung eines prädizierten Begegnungspunktes

Mit dieser Schnittstelle können nun also externe Komponenten und Systeme temporäre grafische Objekte in die Leitstelle einspielen und zur Anzeige bringen. Die Schnittstelle ist so generisch gestaltet, dass sie nicht nur im Projekt FernBin, sondern auch in zukünftigen Forschungsprojekten zum Einsatz kommen kann.

14.3 Schnittstelle zum Zugriff auf die Alarmfunktionen der Leitstelle

Diese Schnittstelle erlaubt es externen Systemen, Alarme im VTS-System der Leitstelle zu erzeugen und auf dem inDTS-Display zur Anzeige zu bringen.

Alarmer werden im VTS-System durch die TAS-Komponente (TAS = Traffic Alarm System) geprüft und verwaltet (siehe [inTAS-TM]). Über die Schnittstelle lässt sich ein solcher TAS-Alarm auslösen. Dazu sind lediglich drei Schritte nötig:

1. Es muss eine Topologie (ein geografisches Gebiet) angelegt werden, in der der Alarm ausgelöst werden soll. Diese Topologie kann auch die gesamte VTS-Zone umfassen.
2. Dieser Topologie muss ein Filter zugewiesen werden, der einen Alarm auf Basis eines Track-Attributs triggert. Sobald das Track-Attribut gesetzt wird, wird der Alarm aus-gelöst.
3. Das Track-Attribut muss durch die externe Anwendung per *TrackAttributeService* gesetzt werden. Dies erfolgt auf die gleiche Art und Weise wie beim GeoJSON-Attribut durch einen REST-Patch-Befehl.

Die an der TAS-Fernsteuerung beteiligten Komponenten zeigt das folgende Schema:

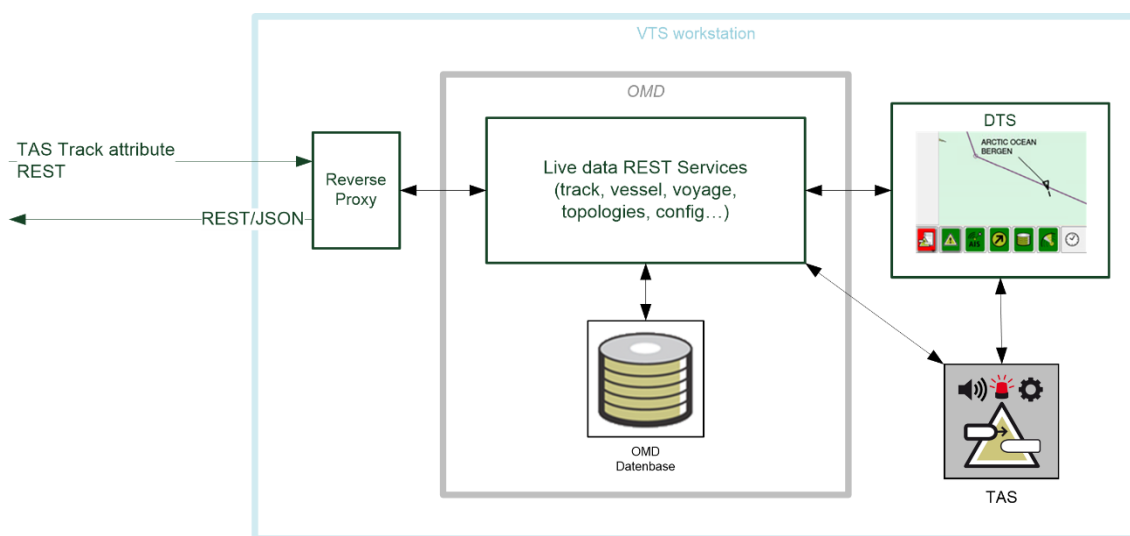


Abbildung 73 Schematische Darstellung der TAS-Attribut-Schnittstelle

Je nach Bedarf können beliebige TAS-Attribute definiert werden. Beispielfaht soll hier das Attribut *user.alarmer* als Flag genutzt werden. Die entsprechende REST-Struktur zum Setzen des Flags sieht wie folgt aus:

```

{
  "$schema": "https://OMDHOST/in-omd/schema/private/track-patch",
  "features": {
    "user.alarmer": {
      "value": "1"
    }
  }
}

```

Der Wert von *value* repräsentiert das eigentliche Alarm-Flag: 1 bedeutet *Alarm auslösen*, 0 setzt den Alarm zurück.

Diese REST-Struktur muss dann per http PATCH-Kommando an das VTS-System gesendet werden, um das Track-Attribut zu schreiben. Das geht zum Beispiel mit curl:

```
curl -X PATCH https://OMDHOST/in-omd/api/tracks/:track -d '###Flag-Data###'
```

Flag-Data enthält die ,escapee' JSON-Struktur zum Setzen des Attributs, :track ist die ID des tracks, bei dem das Flag gesetzt werden soll. Möglich ist auch ein Verweis auf eine Datei mit den JSON-Patch-Daten (flagdata.json):

```
curl -X PATCH https://OMDHOST/in-omd/api/tracks/:track -d @flagdata.json
```

Sobald das TAS-Attribut gesetzt ist, erfolgt die Anzeige und Verwaltung des Alarms auf gleiche Weise, wie die intern generierten VTS-Alarme. Der Alarm wird visualisiert, z. B. durch das rote TAS-Symbol in der inDTS-Statuszeile (links unten in Abbildung 4.10), einem Eintrag in das Label des Schiffes (ebenfalls Abbildung 10) und durch einen Eintrag in die inDTS-Alarmliste (Abbildung 4.11).

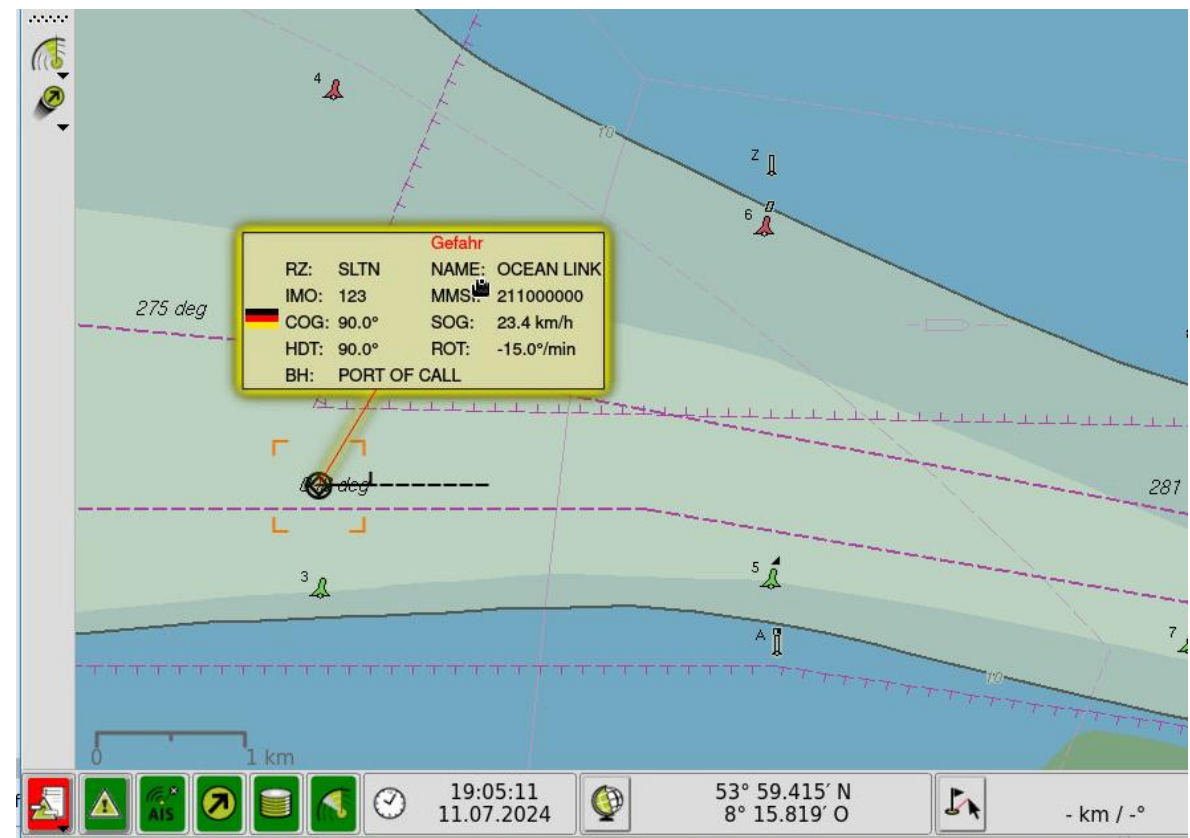


Abbildung 74 Signalisierung eines Alarms in der inDTS

Verkehrereignisliste						
Datei Filter Ansicht Konfiguration						
🔍						
Aktiv	Bestätigungsstatus	Schweregrad	Ziel 1: Kennung	Beschreibung	Betroffenes Topologieobjekt	CF
Aktiv	Unbestätigt	Gefahr	F OCEAN LINK (SLTN)	Track ist innerhalb des Gebiets	Test	CF

Abbildung 75 die inDTS Traffic Event List zeigt einen neuen aktiven Alarm

Mit dieser TAS-Schnittstelle ist es nun also möglich, Warnungen und Alarme durch externe Komponenten und Algorithmen zu ergänzen. Die Schnittstelle ist wie auch die GeoJSON-Schnittstelle generisch gestaltet, so dass sie nicht nur im Projekt FernBin sondern auch in anderen Forschungsprojekten zum Einsatz kommen kann.

14.4 Schnittstelle zur Visualisierung von Routen-Daten

Als Ergänzung zur Darstellung von GeoJSON-Grafiken wurden Funktionen zum Erstellen, Darstellen und Austauschen von Routeninformationen im RTZ-Format (RTZ = Route Plan Exchange entsprechend IEC PAS 61174-1:2021 [RTZ2022]) implementiert.

Diese Schnittstelle eignet sich insbesondere zur Anzeige von Routen, Routenplänen sowie prädierten und geplanten Trajektorien, da wichtige Informationen, wie Wegpunktdaten, erwartete Abfahrts- und Ankunftszeiten (ETA/ETD) und Sollgeschwindigkeiten, bereits in der RTZ-Struktur vereinbart werden können.

Hier ein Beispiel für die RTZ-Definition einer kurzen Route mit drei Wegpunkten (waypoint). Zuerst wird die Position der Wegpunkte definiert, anschließend im schedules-Block die Eigenschaften der Wegpunkte (hier die Sollgeschwindigkeit am Wegpunkt, speed, und die erwarteten Zeiten des Erreichens und Verlassens, eta und etd):

```
<route version="1.2" xmlns="http://www.cirm.org/RTZ/1/2"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <routeInfo routeName="BasicRoute">
    <extensions>
      <extension manufacturer="IN" name="additional-type" type="rtz_topo"/>
    </extensions>
  </routeInfo>
  <waypoints>
    <waypoint id="1" revision="0">
      <position lat="54.25" lon="8.11"/>
    </waypoint>
    <waypoint id="2" revision="0">
      <position lat="54.27" lon="8.18"/>
    </waypoint>
    <waypoint id="3" revision="0">
      <position lat="54.25" lon="8.24"/>
    </waypoint>
  </waypoints>
  <schedules>
    <schedule id="42" name="Non-optimised schedule">
      <manual>
        <scheduleElement etd="2022-02-18T00:00:00Z" waypointId="1"/>
        <scheduleElement speed="20.0" waypointId="2"/>
        <scheduleElement speed="20.0" eta="2022-02-27T21:38:42Z"
          etd="2022-02-27T23:38:42Z" waypointId="3"/>
      </manual>
      <calculated>
        <scheduleElement etd="2022-02-18T00:00:00Z" waypointId="1"/>
        <scheduleElement eta="2022-02-18T00:04:22Z" waypointId="2"/>
        <scheduleElement eta="2022-02-27T21:38:42Z" waypointId="3"/>
      </calculated>
    </schedule>
  </schedules>
</route>
```

In der Verkehrsanzeige wird diese einfache Route wie folgt visualisiert:

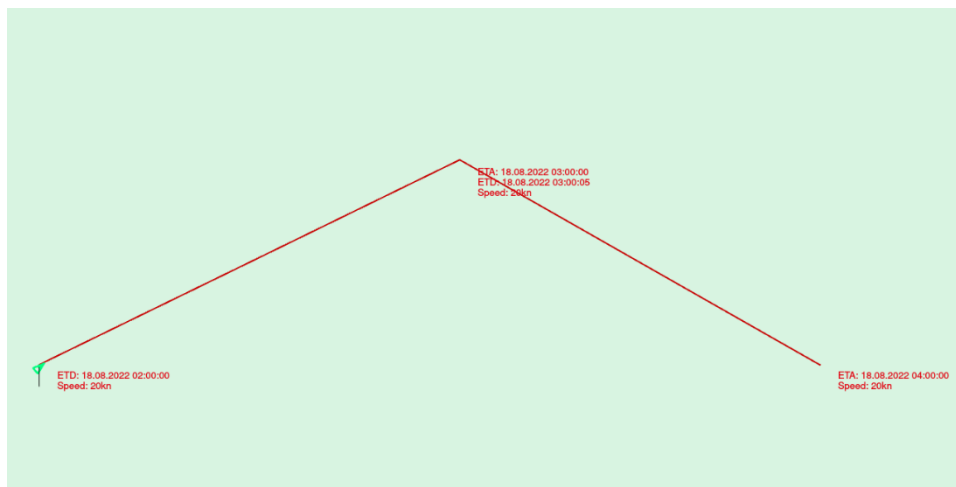


Abbildung 76 Darstellung des vorherigen Beispiels mit Wegpunktdaten

Der Zugriff erfolgt wie bei der GeoJSON-Schnittstelle über das Auslesen und Setzen von Track-Attributen per REST-Kommando. Die RTZ-Daten werden im value-Feld der JSON-Struktur als „escaper“-String übergeben:

```
{
  "$schema": "http://OMDHOST/in-omd/schema/private/track-patch",
  "features": {
    "user.rtz": {
      "value": "### Encoded RTZ string ###"
    }
  }
}
```

Diese Struktur muss dann wie bereits beschrieben per http PATCH-Kommando an das VTS-System gesendet werden, um das Track-Attribut zu schreiben:

```
curl -X PATCH https://OMDHOST/in-omd/api/tracks/:track -d @rtz-patch.json
```

Nicht im FernBin-Kontext angesiedelt aber hier passend zu erwähnen, wurde als erste Anwendung der Routendarstellung der Prototyp eines automatischen Routenplaners erstellt.

Grundlage für die automatische Routenplanung ist ein vordefiniertes Routennetz entlang der Wasserstraßen. Auf Basis des über AIS übertragenen Zielhafens kann nun für ein Schiff eine wahrscheinliche Route prädiert werden und so vorausschauend ein möglicher Verkehrsablauf an kritischen Orten, z. B. an Verkehrswegekreuzungen oder -verzweigungen, Schleusen und Engstellen, abgeschätzt werden.

Das folgende Bild zeigt beispielhaft die Routenplanung für ein Schiff auf der Elbe, unterwegs nach Brunsbüttel. Die erwarteten Eintreffzeiten an den Zwischenwegpunkten werden in der Karte entlang der Route eingetragen.

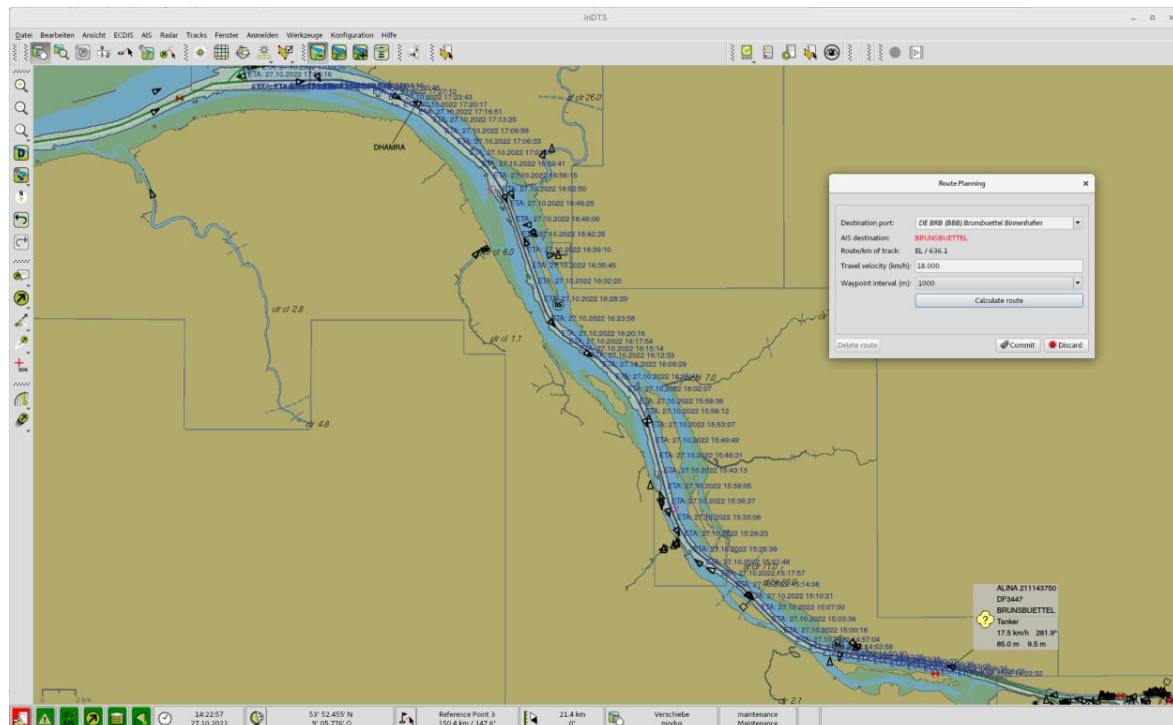


Abbildung 77 Exemplarische Routenplanung auf der Elbe

Eine denkbare Weiterentwicklung wäre nun zum Beispiel die Untersuchung der prädierten Routen auf mögliche Gefahrensituationen in der Zukunft, z. B. durch zu hohes Verkehrsaufkommen an

Engstellen. Auch diese Untersuchung könnte weitgehend automatisch erfolgen und dem Leitstellen-Operator als Report präsentiert werden.

Eine andere Weiterentwicklungsmöglichkeit besteht darin, die automatische Prädiktion durch externe Verkehrsplanungssysteme zu prüfen und zu optimieren, um z. B. auch Schleusungszeiten, den Einfluss von Gezeiten auf die Schiffbarkeit von Flüssen oder die Abfahrt von Schiffen aus Häfen in der Planung zu berücksichtigen. Das Ergebnis der externen Optimierung würde dann in das VTS-System der Leitstelle zurückgespielt und visualisiert.

14.5 Interaktives Dashboard zur Visualisierung von Trajektorienplanungs- und Navigationslösung

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

Die Kartenanzeige wurde entwickelt, um die Navigationslösung und andere optische Sensoren, z. B., Kamerabilder, darzustellen. Dieses Softwaremodul wurde im Steuerhaus des Testschiffs eingesetzt, damit eine bessere Übersicht bei der Schiffsfahrt für die Schiffsbesatzung zur Verfügung gestellt wird. Abbildung 78 stellt einen Screenshot der Kartenanzeige während einer Messfahrt dar. Die Entwicklung der Kartenanzeige erfolgt durch eine Erweiterung der Open-Source Software „MapViz2“ in C++ und Robot Operating System³.

Zusätzlich wurde ein Dashboard zum Visualisieren aller Navigationsdaten und zur Realisierung einer Interaktion zwischen dem Trajektorienplaner und dem Schiffsführer im Fernsteuerzentrum entwickelt. Da das Dashboard an unterschiedlichen Rechenplattformen (PC, Tablett etc.) in Betrieb genommen werden sollte, erfolgt eine webbasierte Entwicklung des Dashboards. Somit kann die Benutzerschnittstelle in jedem beliebigen Webbrowser aufgerufen werden. Für die Implementierung wurde eine Vorlage aus Vue.Js⁴ genommen. Das Frontend des Dashboards wurde mit der Programmierungssprache Javascript entwickelt, während das Backend auf Basis von Flask⁵ in Python umgesetzt wurde. Ein OPC-UA-Client befindet sich im Backend des Dashboards, um die Daten zwischen dem Dashboard und dem Testschiff auszutauschen. Abbildung 79 zeigt die Startseite des Dashboards, wo der Benutzer zwischen der Leitstelle und dem Steuerstand ein Interface wählen kann. Außerdem stehen andere Bedienelemente an der Sidebar zur Verfügung.

² <https://swri-robotics.github.io/mapviz/>

³ <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>

⁴ <https://www.creative-tim.com/templates/vuejs>

⁵ <https://flask.palletsprojects.com/en/3.0.x/>



Abbildung 78 Kartenanzeige der Navigationslösung mit Kamerabildern. Rot: GNSS-Messdaten, Grün: Schiffsposition aus dem Navigationsfilter.



Abbildung 79 Startseite des FernBin-Dashboards

Die interaktive Benutzerschnittstelle am Steuerstand aus einer Messfahrt mit der Live-Übertragung ist in Abbildung 80 dargestellt. Eine eingebettete Kartendarstellung zeigt die geplanten Trajektorien (in Orange) des Testschiffs (in Blau) mit anderen Verkehrsteilnehmern (in Rot) in der Mitte des Dashboards an. An der linken und rechten Seite befinden sich die Tachometer, um den Automatisierungsmodus (manuell, ferngesteuert und vollautomatisiert) und die Schiffszustände (Geschwindigkeit, Motordrehzahl etc.) darzustellen.

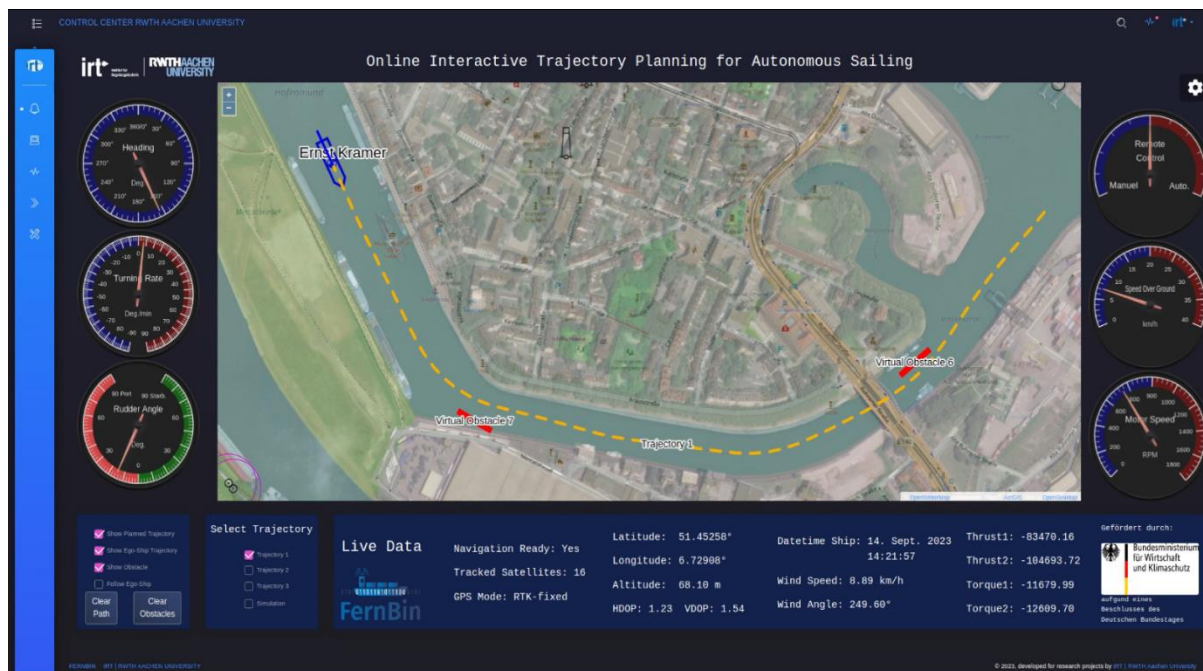


Abbildung 80 Benutzerschnittstelle des Dashboards am Steuerstand

14.6 Weiterentwicklung Verkehrssimulation

Das vorhandene Simulationsmodell musste zur Abbildung des Modellgebiets in zahlreichen Punkten angepasst werden, um die Eigenschaften der Strecke und das Verhalten der Schiffe korrekt anpassen zu können. Unter anderem wurden die folgenden Punkte bearbeitet:

- Die Funktionsweise von Mehrkammerschleusen und deren Nutzung durch die Binnenschifffahrt wurden codiert, um die entlang der Strecke vorhandene Infrastruktur abbilden zu können.
- Entlang der Strecke werden „stehende“ Schiffe (an Liegestellen oder durch AIS-Datenfehler) erkannt und ein Verfahren für das „Ausweichen“ von Schiffen wurde codiert.
- Interaktionen zwischen Binnenschiffen können nun direkt innerhalb des Simulationskerns erkannt werden.
- Ein Routing der Fahrstrecke eines Binnenschiffs ist nun über mehrere Wasserstraßen hinweg möglich, so dass abhängig von den in den AIS-Daten angegebenen Zielen ideale Fahrtrouten abgeleitet werden können.
- Schiffe können frei in der Fahrrinne fahren und sind nicht an Fahrspuren gebunden.
- Das automatisierte Auswählen und Laden von Strömungsdaten entlang des Schiffskurses in den Simulationskern wurde implementiert
- Ein Verfahren zur Berücksichtigung von Fließgeschwindigkeiten zur Berechnung realistischer Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser als Differenz zwischen Fließgeschwindigkeit und Schiffsgeschwindigkeit über Grund wurde entwickelt
- Erkennung von Hindernissen auch für die Gegenspur, um temporäre Einschränkungen des verfügbaren Fahrwassers zu berücksichtigen, um beispielweise Manöver wie Überholungen planen zu können
- Besondere Behandlung von Fähren bei der Interaktionsbestimmung
- Verbesserung des Multithreadings zur Erhöhung der Rechenperformance
- Automatisierte Protokollierung von Interaktionen und anderen relevanten Situationen

- Darstellung von Schiffen und Schleusen mit zugehörigen Informationen im InfoWindow

Eine beispielhafte Darstellung des Informationsfensters für Fahrzeuge in der Strecke eines Simulationslaufes ist in Abbildung 81 dargestellt. Hier sind die Angaben zu den Schiffen wie

- Länge
- Fahrtrichtung
- Bundeswasserstraße und Bundeswasserstraßen-ID
- Aktueller Bundeswasserstraßen-Kilometer
- Reiseziel
- Bereits verfolgte Strecke in der Simulation
- Bereits verfolgter Zeitraum in der Simulation

enthalten.

Id	Type	Length	Speed [k...	Direction	Symbolic ...	BWaStr-I...	Station [k...	Load [t]	Destinati...	Total Tra...	Total Tra...
32	unbekann...	29.50	6.6	u	Rhein	3901	789.222	?		0.892	00:07:12
36	GMS	110.00	5.8	u	Rhein	3901	765.372	?		0.817	00:07:05
41	GMS	110.00	5.6	u	Rhein	3901	771.746	?		0.782	00:06:42
46	GMS	105.00	7.8	u	Rhein	3901	767.597	?	DENSS	0.915	00:06:26
48	unbekann...	29.50	6.4	u	Rhein	3901	795.347	?		0.776	00:06:24
57	unbekann...	29.50	8.0	u	Rhein	3901	790.704	?		0.640	00:06:03
58	GMS	100.00	7.8	u	Rhein	3901	769.661	?		0.792	00:06:00
60	GMS	110.00	11.1	u	Rhein	3901	781.907	?	DELUH	1.162	00:05:57
63	GMS	100.00	18.9	d	Rhein	3901	775.250	?		1.821	00:05:54
65	Kempenaar	35.00	6.3	u	Rhein	3901	778.480	?		0.664	00:05:52
66	unbekann...	29.50	1.4	u	RHK	4001	5.634	?		0.427	00:05:51
68	unbekann...	29.50	21.1	d	Rhein	3901	765.734	?		1.968	00:05:50
71	ES	86.00	20.5	d	Rhein	3901	788.425	?		1.914	00:05:48
72	CK	67.00	8.0	d	RHK	4001	5.306	?		1.091	00:05:46
77	V 2x1	182.00	13.4	u	Rhein	3901	792.681	?		1.158	00:05:42
84	GMS	110.00	19.0	d	Rhein	3901	765.126	?		1.628	00:05:37
83	GMS	190.00	10.8	u	RHK	4001	-1.563	?		0.486	00:05:37
85	GMS	95.00	8.5	u	Rhein	3901	769.405	?		0.639	00:05:36
91	GMS	80.00	20.6	d	Rhein	3901	780.449	?	GBGOO	1.769	00:05:34
99	GMS	105.00	6.5	u	Rhein	3901	773.059	?	DEWOR	0.713	00:05:33
97	GMS	110.00	12.7	u	RHK	4001	-2.405	?	NLRTM	1.092	00:05:33
100	GMS	110.00	8.1	u	Rhein	3901	798.313	?	DEMHG	0.933	00:05:33
101	GMS	110.00	10.4	u	Rhein	3901	777.229	?	DEREG000...	0.894	00:05:32
103	GMS+	135.00	10.5	u	Rhein	3901	769.187	?		0.933	00:05:31
106	ES	86.00	8.1	u	Rhein	3901	786.693	?		0.834	00:05:31
111	unbekann...	29.50	12.7	u	Rhein	3901	793.484	?		1.040	00:05:30
107	V 1x2	110.00	12.3	d	Rhein	3901	783.513	?	BEANR	1.351	00:05:30
119	GMS	86.00	5.4	u	Rhein	3901	778.799	?		0.562	00:05:28
122	unbekann...	29.50	20.6	d	Rhein	3901	773.477	?		1.850	00:05:28
123	GMS	105.00	15.7	d	Rhein	3901	799.714	?	BEOSR	1.576	00:05:28
124	ES	85.00	8.0	u	Rhein	3901	770.472	?	DEPLO	0.761	00:05:27
126	ES	85.00	8.3	u	Rhein	3901	778.379	?	CHKGT	0.757	00:05:27
130	unbekann...	29.50	18.8	d	Rhein	3901	767.548	?		1.719	00:05:27
127	V 2x1	193.00	6.2	u	Rhein	3901	779.654	?		0.795	00:05:27
135	GMS	110.00	8.7	u	Rhein	3901	775.138	?		0.835	00:05:25
137	ES	86.00	12.5	d	RHK	4001	2.227	?		1.002	00:05:25

Abbildung 81: Informationsfenster aus der Verkehrssimulation

Nach den maßgebenden Anpassungen wurden erste Kalibrierungsrechnungen durchgeführt, um eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen „Live“-Daten aus AIS-Aufzeichnungen und den erstellten Prognosen erreichen zu können. Hier wurden verschiedene Verfahren zur Parametrisierung von Größen wie der Schiffsgeschwindigkeit den AIS-Daten gegenübergestellt und der aufsummierte Streckenfehler zwischen Simulation und Messung ausgewertet. Abbildung 82 zeigt, dass nach ersten Anpassungen und Erweiterungen der aufsummierte Streckenfehler für etwa 70 Schiffe und eine Stunde Simulationszeitraum um etwa 30% reduziert werden konnte.

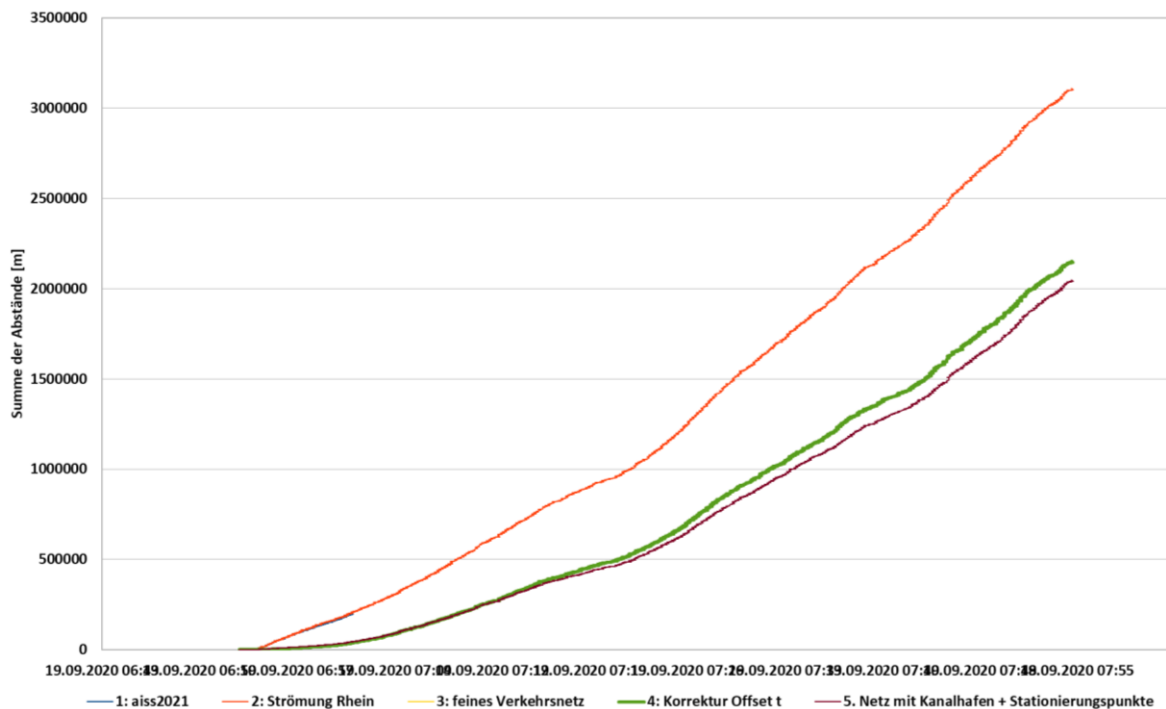


Abbildung 82: Kumulativer Streckenfehler zwischen „Live“-Daten und Simulation im Verlauf der Entwicklung des Simulators

14.7 Weiterentwicklung der mikroskopischen Verkehrssimulation

Die Verkehrssimulation mikroVon bildet den Binnenschiffsverkehr auf Basis aktueller Verkehrsdaten ab und liefert Prognosen des Verkehrsgeschehens. Auf Basis eines Simulationskerns, der durch das ingenieurbüro kauppert in einem vorhergehenden Projekt von einem vorhandenen Simulationskern für den Straßenverkehr movSim (www.movsim.org) für den Binnenschiffsverkehr angepasst wurde, erfolgten im Rahmen des Verbundvorhabens FernBin die maßgebenden Anpassungen um Prognosen auf Basis des aktuellen Verkehrs berechnen zu können.

Hierfür wurde die Simulation dahingehend weiterentwickelt, dass ein aktuelles Abbild des Verkehrs auf der Wasserstraße auf Basis von AIS-Daten als Startbedingung für die Simulationsrechnungen genutzt werden kann. Die Verkehrssimulation berechnet anschließend in mehrfacher Echtzeit die Schiffspositionen auf Basis der Positionen, Geschwindigkeiten und Kurse aus den AIS-Daten voraus und kann so Begegnungsbereiche und Ankünfte an bestimmten Orten für einzelne Fahrzeuge prognostizieren.

Um Ungenauigkeiten der Prognose gegenüber der Realität durch menschliche Eigenschaften der Schiffsführer, Abweichungen der Fahrdynamik und anderen Einflüssen ausgleichen zu können, wurde mikroVon Kaskade entwickelt. Das Modul erfasst im laufenden Betrieb der Verkehrssimulation „live“ eingehende Verkehrsdaten, erstellt ein Abbild der Wasserstraße mit aktualisierten Schiffspositionen, -geschwindigkeiten und -kursen und startet in regelmäßigen Intervallen einen neuen Simulationslauf.

Auf diese Weise können fortlaufend Prognosen mit maximaler Genauigkeit für die nahe Zukunft und Prognosen für die fernere Zukunft mit abnehmender Genauigkeit erstellt werden.

Die Verwendung von „live“-Verkehrsdaten mit kaskadierenden Berechnungsläufen ist ein Alleinstellungsmerkmal, der Unterschied zu „klassischen“ Verkehrssimulationen und die Innovation von mikroVon ist nachfolgend skizziert.

Die verschiedenen Abläufe einer „klassischen“ Verkehrssimulation und mikroVon sind in Abbildung 83 gegenübergestellt.

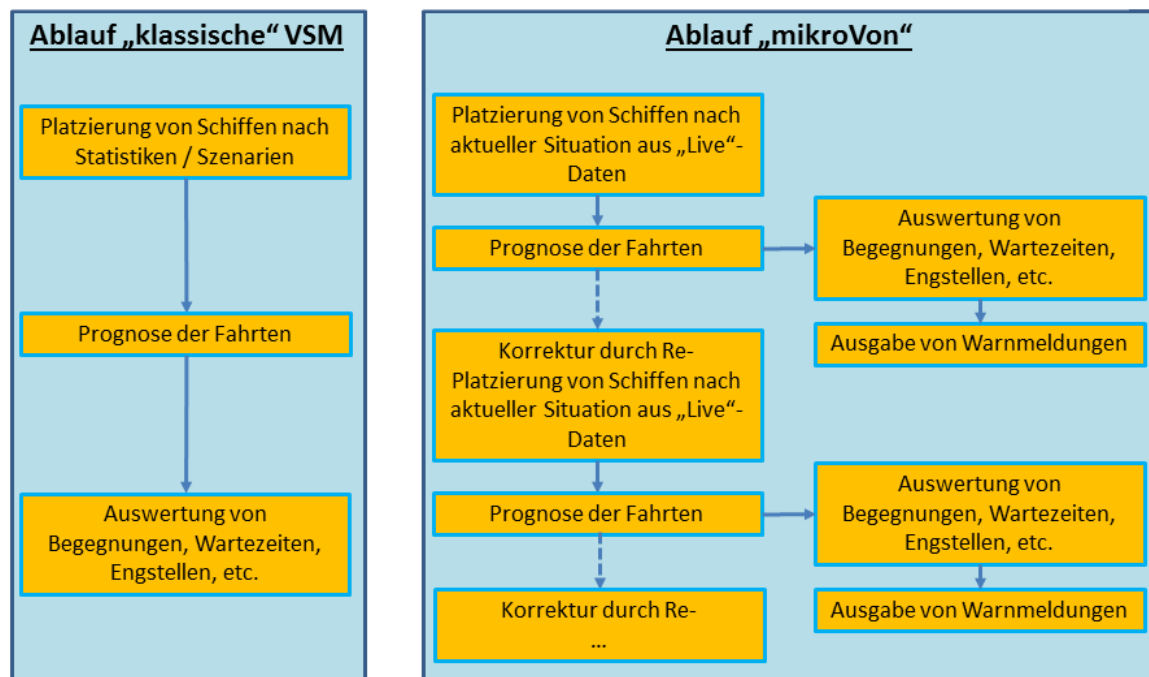


Abbildung 83: Unterschied im Ablauf zwischen „klassischer“ Verkehrssimulation und mikroVon Kaskade

Der Unterschied in der Verwendung verschiedener Daten zwischen „klassischer“ Verkehrssimulation und in mikroVon ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Verwendung von Daten in einer „klassischen“ Verkehrssimulation und in mikroVon

Daten	„klassische“ Verkehrssimulation	„mikroVon“
Wasserspiegelabhängige Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen	Statisch für definierte Szenarien	Abhängig von aktuellen Online-Daten und Statisch für definierte Szenarien
Querprofileigenschaften	Statisch für definierte Szenarien	Abhängig von aktuellen Online-Daten und Statisch für definierte Szenarien
Verkehrsregeln	Ja	Ja
Statistische Verkehrsdaten	Ja	Ja
Online Pegeldaten	Nein	Ja
Aktuelle Informationen für Schiffsführer	Nein	Ja
Dynamische Fahrzeug Informationen	Nein	Ja

Die Innovation durch die Verwendung von stets aktuellen Verkehrsdaten und die hierfür erforderliche Kaskadierung der Rechenläufe (also die fortlaufende Neuberechnung mit aktualisierter Datenlage) ist in Abbildung 84 skizziert.

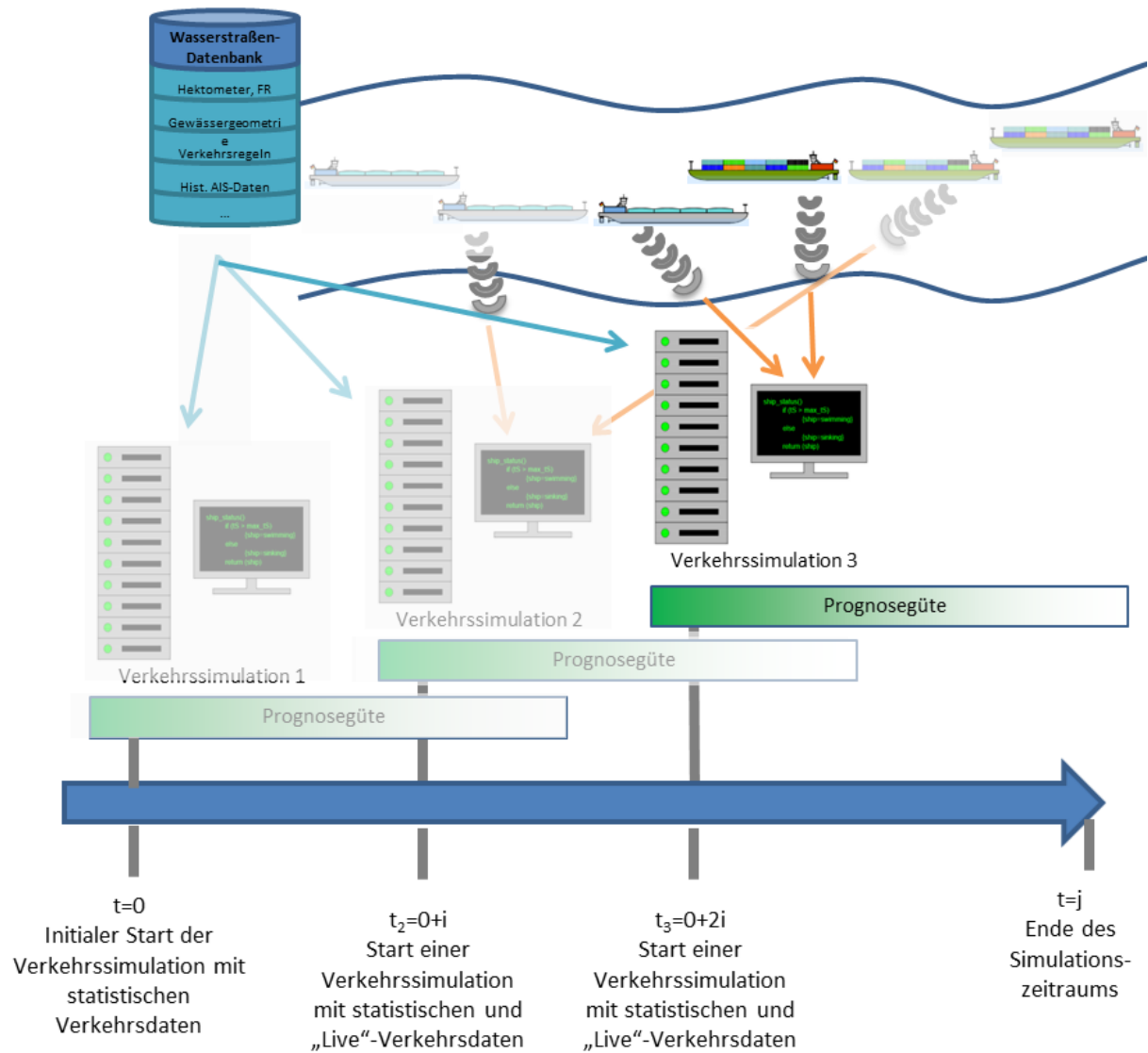


Abbildung 84: Skizzierung des Ablaufs der kaskadierten Berechnungsläufe mit aktualisierten Verkehrsdaten

Aufgrund der verschiedenen Unwägbarkeiten bei der Prognose von Schiffspositionen ist beispielsweise eine prognostizierte Begegnung zweier Schiffe in „ferner“ Zukunft mit hohen Unsicherheiten behaftet. Ändert eines der Schiffe gegenüber den Annahmen in der Verkehrssimulation seine Geschwindigkeit, verschiebt sich der Begegnungsbereich entlang der Wasserstraße und findet zu einem anderen Zeitpunkt statt. Die Steigerung der Prognosegüte durch die kaskadierte Berechnung mit stets aktualisierten Verkehrsdaten für die Bestimmung eines Interaktionsbereichs und -zeitpunkt ist in Abbildung 85 skizziert.

Da es in der Binnenschifffahrt vor allem in beengten Wasserstraßen von hoher Bedeutung ist, wo eine Begegnung von Binnenschiffen stattfindet (enge Kurve oder Brückenbereich vs. gerade, freie Strecke) ist eine exakte Prognose von hohem Wert. Im Falle des Forschungsvorhabens FernBin kann so beispielsweise die Begegnung des ferngesteuerten Eigenschiffs mit einem Fremdschiff in einem kritischen Bereich vermieden werden.

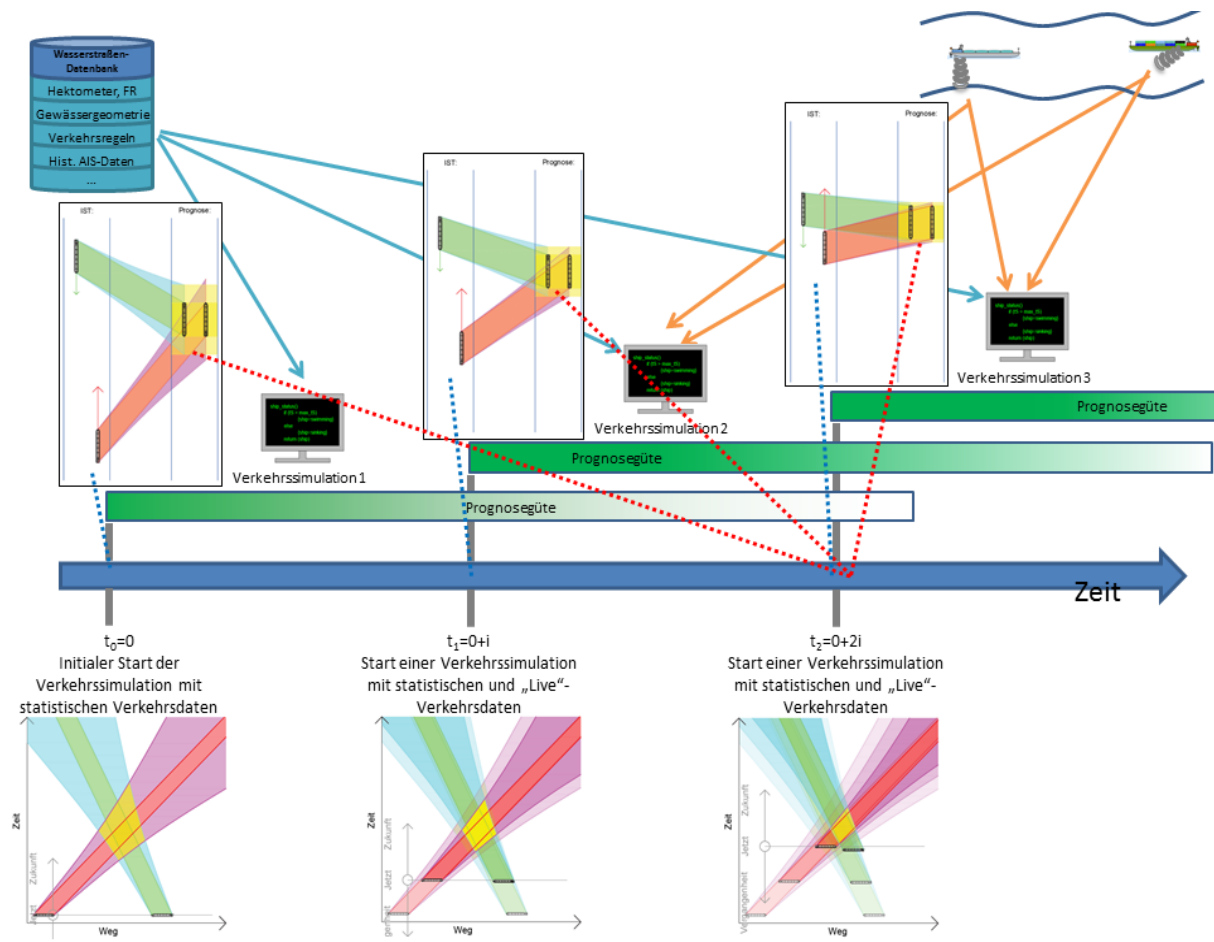


Abbildung 85: Skizzierung der Steigerung der Prognosegüte durch kaskadierte Berechnung mit mikroVon-Kaskade

Durch die Detektion prognostizierter Ereignisse wie Begegnungen können wertvolle Informationen an Schiffsführer und Leit- oder Steuerzentralen weitergegeben werden. Es wurde eine automatisierte Ausgabe von prognostizierten Schiffspositionen und Begegnungspunkten für die Anzeige auf einer digitalen Wasserstraßenkarte oder in Listenform entwickelt.

Die Prozessierung der Daten, die Prognose des Verkehrs und die Anzeige der Ergebnisse ist in Abbildung 86 skizziert.

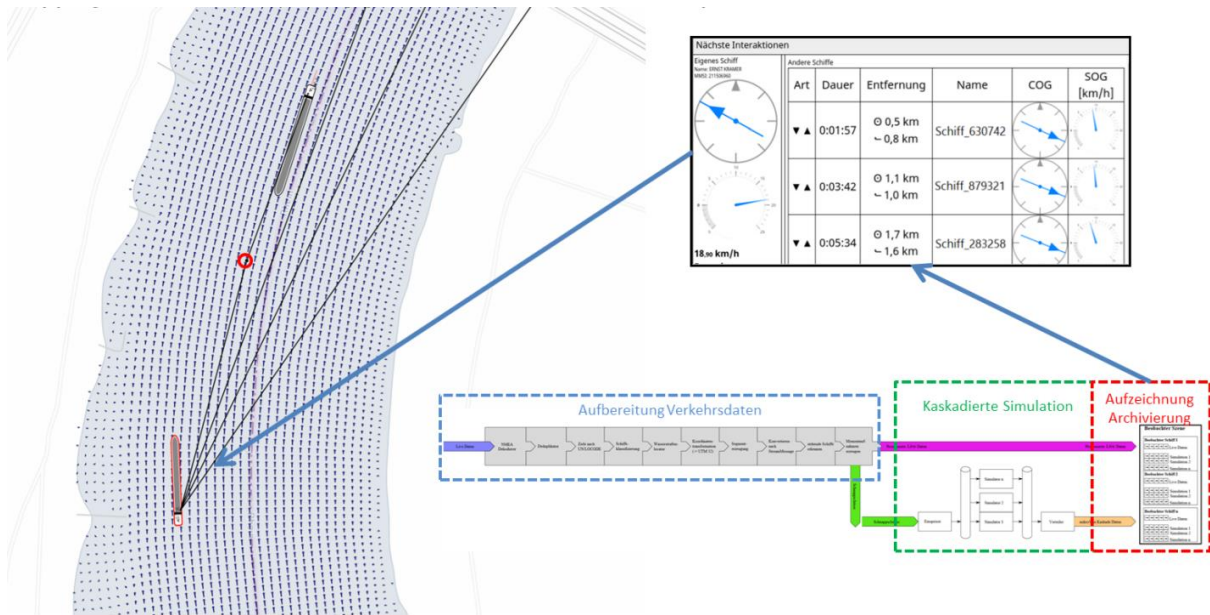


Abbildung 86: Prozessierung der Daten, Prognose des Verkehrsgeschehens und die Anzeige der Ergebnisse

Die für die Entwicklung von mikroVon notwendigen und im Rahmen des Einzelvorhabens ausgeführten Arbeiten sind nachfolgend beschrieben.

14.7.1 Entwicklung mikroVon Kaskade

Wie zuvor erläutert, bestand die maßgebende Herausforderung und Innovation der Entwicklung von mikroVon in der kaskadierten Neuberechnung auf Basis fortlaufend aktualisierter „live“-Daten. Für die Entwicklung des Moduls mikroVon Kaskade zur automatisierten Kaskadierung von Simulationsläufen nach der jeweiligen aktuellen Datenverfügbarkeit wurde eine Datenpipeline zur Verarbeitung von AIS-Daten entwickelt. Diese Pipeline empfängt und anonymisiert „Live“-Daten, bereitet diese auf und stellt sie einem Scheduler zur Steuerung der Simulation bereit. Die Datenpipeline ist in Abbildung 87 dargestellt.

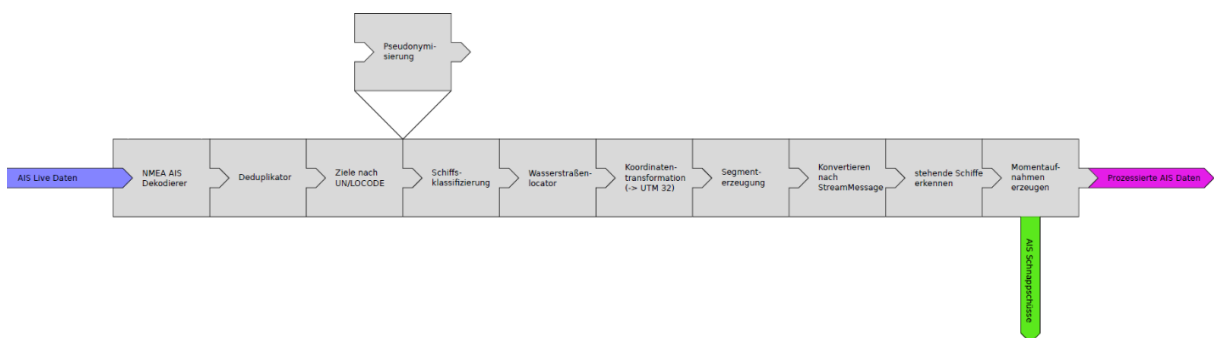


Abbildung 87: Skizzierung der Datenpipeline zur Verarbeitung AIS

Es werden Momentaufnahmen, also Abbildungen des Verkehrs zu einem bestimmten Zeitpunkt, erstellt und als Startbedingung für einen neuen Simulationslauf aufbereitet. Dazu werden in einstellbaren zeitlichen Abständen automatisiert neue Simulationen gestartet, so dass stets ein Simulationslauf mit den jeweils aktuellsten Daten betrieben wird. Der Ablauf des Schedulers zur Kaskadierung der Simulationsläufe ist in Abbildung 88 skizziert.

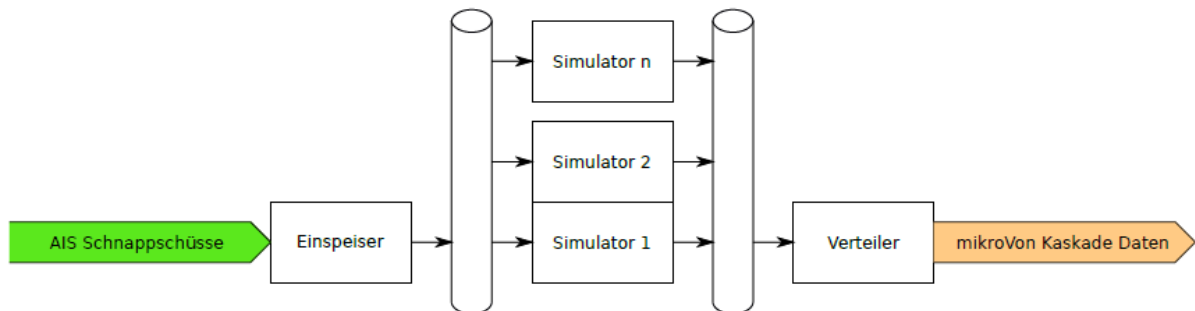


Abbildung 88: Skizze Ablauf Scheduler zur Kaskadierung der Simulationsläufe

Die Entwicklung von mikroVon Kaskade zur automatisierten Kaskadierung von Simulationsläufen nach der jeweiligen aktuellen Datenverfügbarkeit wurde weiter fortgesetzt, so dass die Kaskadierung des Systems im Dauerbetrieb läuft.

Für die Verarbeitung eingehender, aktualisierter „Live“-Daten wurden Filter erstellt, die die Daten auf Vollständigkeit und Korrektheit prüfen. Dabei werden Duplikate entfernt, Datenlücken so weit möglich gefüllt und Schiffpositionen zu „Segmenten“ verbunden.

Der Cache der Simulation wird nun automatisch mit dem jeweils letzten Stand der Datenbank gefüllt. Durch den Dauerbetrieb der kaskadierten Verkehrssimulation kann der Verkehr im Projektgebiet über lange Zeit simuliert und fortlaufend durch aktualisierte Daten korrigiert werden. Hiermit wird erreicht, dass sich die Ergebnisse der Simulation stets nah an der Realität befinden, und der Verkehr genauer abgebildet wird als nur durch Betrachtung der „Live“-Verkehrsdaten.

In einem Simulationszeitraum von 15 Stunden und 40 Minuten wurden so 597.699 Positionspunkte aus „Live“-Daten verarbeitet, wodurch 4.403.262 Positionspunkte berechnet wurden, die Dichte der Schiffpositionen kann damit etwa um den Faktor 7 erhöht werden.

Abbildung 89 zeigt den Verlauf der verarbeiteten Schiffpositionen und die erfassten Interaktionen von Schiffen über den betrachteten Simulationszeitraum. Insgesamt konnten 66.190 Vorbeifahrten (Begegnungen fahrender Schiffe und Passagen vorbei an liegenden Fahrzeugen) sowie 2.783 Überholungen berechnet werden. Zur Abbildung des Zeitraums wurden kaskadierte Simulationsläufe mit je einer Stunde Prognosezeitraum alle fünf Minuten automatisiert gestartet.

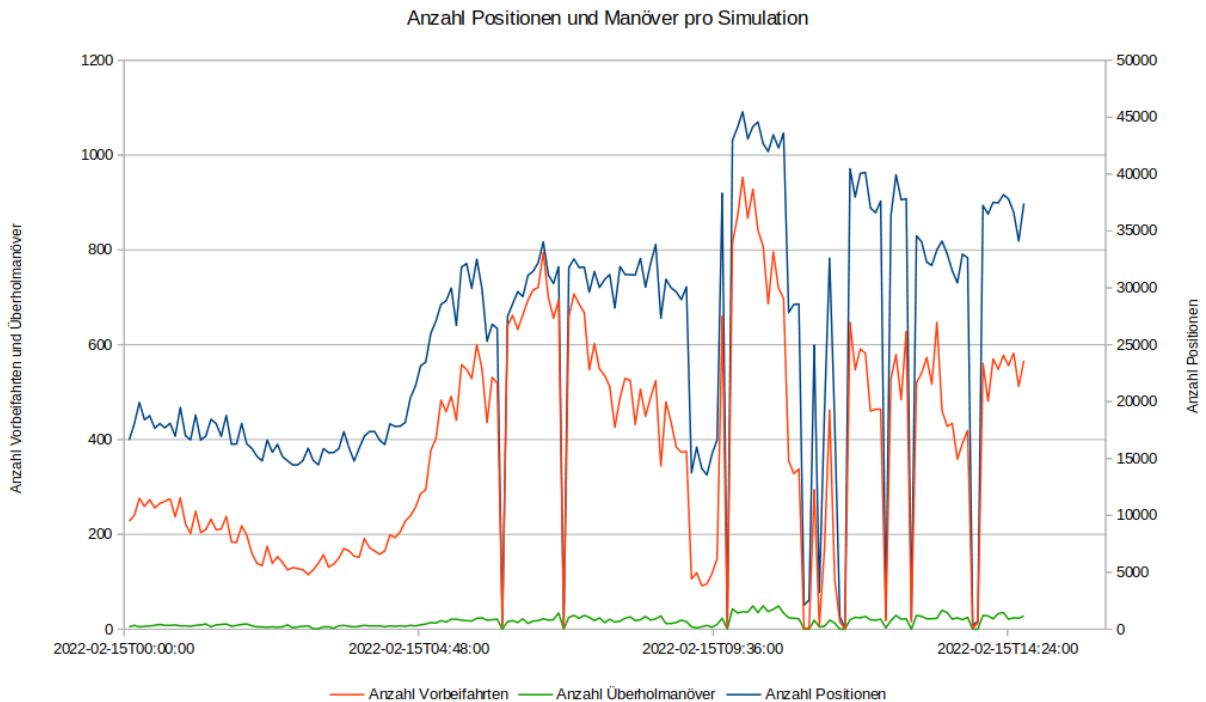


Abbildung 89: Anzahl verarbeiteter Positionen und erkannter Interaktionen von Schiffen über einen Simulationszeitraum von etwa 15 Stunden und 40 Minuten

14.7.2 Datenhaltung

Für die Datenhaltung wurde ein Beobachter-Modul entwickelt, welches Daten aus verschiedenen Simulationsläufen und AIS-Aufzeichnungen sammelt und für einzelne Fahrzeuge oder Ereignisse abspeichert. Hiermit wird in einem ersten Schritt eine Bewertung der Prognosegüte der Simulation vereinfacht. Später können hiermit Auswertungen zu Interaktionen, Durchfahrten, etc. ausgeführt werden. Die Entwicklung ist maßgebliche Voraussetzung für die nachfolgenden Arbeitspakete.

Der entwickelte „Observer“, das Beobachter-Modul zur Sammlung von Daten aus Simulationszeiträumen und AIS-Aufzeichnungen, wurde im weiteren Projektverlauf weiterentwickelt, so dass Informationen zu detektierten Interaktionen zwischen Fahrzeugen protokolliert werden, um anschließend weitergehende Auswertungen zu den aufgezeichneten Situationen erstellen zu können.

Hiermit können nun die notwendigen Daten für die weitere Bearbeitung gesammelt werden. Darüber hinaus werden Vergleiche zwischen AIS-Aufzeichnungen und der Prognosen aus der Simulation deutlich erleichtert und beide Datenquellen können simultan auf einer Wasserstraßenkarte abgespielt werden.

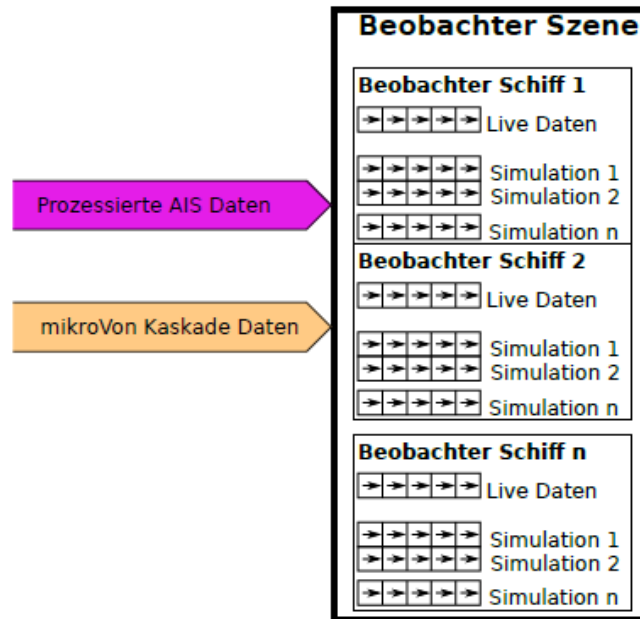


Abbildung 90: Skizzierung des „Beobachters“ zur Ablage relevanter Daten. Jedes Quadrat mit Pfeil ist eine Schiffsposition aus „Live“-Daten oder einer Simulation

Die Datenhaltung ist Grundlage für die zu entwickelnden Auswertungen. Die Daten müssen daher in einem Archiv vorgehalten und effizient abgerufen werden. Für die effiziente kontinuierliche Bereitstellung der Simulationsergebnisse wurde eine API auf Grundlage der In-Memory-Datenbank Redis implementiert. Zusätzlich zur Redis-API können die Ergebnisse dateibasiert oder in einem relationalen Datenbankmodell archiviert werden.

Der Datenflow zwischen mikroVonKaskade und der Darstellung und Archivierung ist in Abbildung 91 dargestellt.

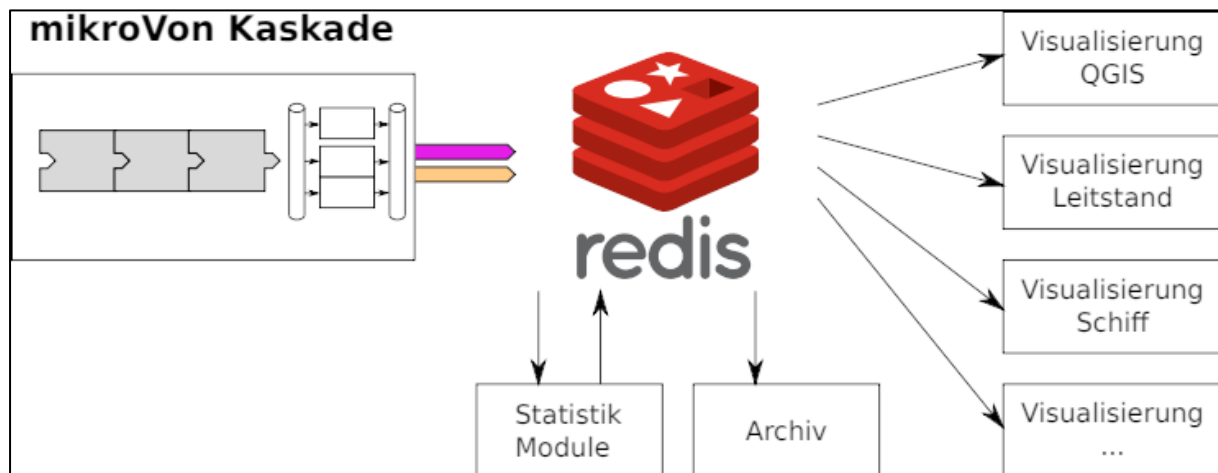


Abbildung 91: Redis Schnittstelle für die Verteilung der Ergebnisse aus mikroVon Kaskade

Aus mikroVon Kaskade wird ein kontinuierlicher Datenstrom aus aufbereiteten Eingangsnachrichten und Nachrichten, die von der Verkehrssimulation generiert wurden, ausgegeben. Alle Nachrichten liegen jeweils in einem JSON Format vor. Dieser Datenstrom wird über eine Redis Datenbank in der Datenstruktur "Redis Stream" für externe Weiterbearbeitung bereitgestellt. Ein Stream enthält immer die letzten z.B. 10.000 Nachrichten und löscht jeweils die älteste, wenn neue Nachrichten zum Stream hinzugefügt werden. Externe Applikationen können den Stream abonnieren und werden von Redis über

neue Nachrichten informiert. Redis ist hochskalierbar und kann eine große Anzahl von gleichzeitigen Verbindungen bedienen. Durch die Verwendung von Redis können mehr Informationen bereitgestellt werden, gleichzeitig kann eine bessere Performance gegenüber den zuvor verwendeten Datenbankabrufen erzielt werden.

Zur Datenpflege müssen die Ergebnisse von Simulationsläufen und Live-Daten eindeutig zugeordnet und synchronisiert werden. Hierfür wurde in den Datensätzen eine "CalculationStatusMessage" implementiert, die in den Datenstrom eingefügt wird und Informationen über Beginn und Ende eines Simulationslaufs enthält

Die Live-Daten, die in variablen Frequenzen in das System eingespeist werden, können nun auf simulierte Nachrichten durch lineare Interpolation (LivePredictionInterpolation) synchronisiert werden.

15 Mathematische Modellierung des Manövrierverhaltens des Eigenschiffes

Für Erprobungen der Fernsteuerung in der virtuellen Testumgebung sowie die Prognose der Bahnen des Schiffes für Assistenzsysteme, z.B. zur Kollisionsvermeidung, werden echtzeitfähige Modellierungen des Manövrierverhaltens des Eigenschiffes benötigt. Die mathematischen Modellierungen müssen die Prognose des Manövrierverhaltens in einem möglichst großen Bereich an Betriebsbedingungen und für viele Manöver mit hoher Genauigkeit zulassen. Im Rahmen des Projekts wurde ein bereits existierendes, für Seeschiffe geeignetes ManövriermodeLL um spezifische Einflussfaktoren der Binnenschiffahrt weiterentwickelt. Diese Einflussfaktoren sind Flachwasser, Begegnungs- und Überholvorgänge. Das weiterentwickelte ManövriermodeLL wurde für das Testschiff des Projekts, die Ernst Kramer, parametrisiert. Für die Parametrierung des ManövriermodeLLs wurden außerdem Methoden zur indirekten Systemidentifikation entwickelt. Anschließend wurden Methoden für eine echtzeitfähige Trajektorienprädiktion sowie ein digitaler Zwilling des Eigenschiffes entwickelt.

15.1 Entwicklung des Modells zur mathematischen Beschreibung des Manövrierverhaltens

Die Entwicklung des mathematischen Modells zur Prognose des Manövrierverhaltens des Eigenschiffes erfolgte auf Basis eines bereits bestehenden Modells, welches im Zuge des Projekts um die Einflussfaktoren Wassertiefe und Schiff-Schiff-Interaktion (Begegnungs- und Überholvorgänge) erweitert wurde. Diese Weiterentwicklungen und deren Validierungen erfolgten unter intensiver Nutzung numerischer Strömungssimulationen. Das Simulationsverfahren wurde zu Beginn der Arbeiten zunächst für die konkreten Anwendungsfälle validiert. Daran schlossen sich Simulationen von Überholvorgängen zwischen zwei Schiffen an. Es erfolgen daraufhin die Beschreibungen des Ausgangsmodells, des erweiterten ManövriermodeLLs sowie des wassertiefenabhängigen ManövriermodeLLs. Danach wurde ein Fourier-basiertes Modell für die Abbildung von Schiff-Schiff-Interaktionen bei Überholvorgängen erstellt. Das ManövriermodeLL wurde um die Berücksichtigung der Gewässerströmung sowie um eine vereinfachte Implementierung eines Propulsionsmodells erweitert.

15.1.1 Validierung der numerischen Strömungssimulationen

Die Weiterentwicklung des ManövriermodeLLs erfolgt unter Anwendung numerischer Strömungssimulationen. Das Verfahren zur numerischen Simulation von Strömungen wurde zuerst mit experimentellen Messdaten für die in diesem Projekt relevanten Anwendungsfälle validiert. Zur Validierung wurden die Benchmark-Daten für das in der Literatur bekannte „Kriso Container Ship“ (KCS) für Flachwassersituationen aus dem SIMMAN-Workshop 2014 verwendet.

Die numerischen Simulationen wurden mit dem Strömungslöser „OpenFOAM“ durchgeführt. Das Finite-Volumen-Verfahren löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANSE) numerisch unter Verwendung des SIMPLE-Algorithmus für die Druck-Geschwindigkeits-Kopplung gelöst. Es wurde eine zeitliche und räumliche Diskretisierung zweiter Ordnung verwendet. Die Turbulenz wurde über das $k-\omega$ -SST (Shear Stress Transport) Turbulenzmodell modelliert. Die Berechnungen erfolgten für eine Zweiphasenströmung aus Luft und Wasser. Die beiden Phasen wurden unter Verwendung der Volume-of-Fluid-Methode (VoF) abgebildet. Die Methode löst eine zusätzliche Transportgleichung für den relativen Anteil einer Phase in jedem Kontrollvolumen. Die Dichte und Viskosität in jedem Kontrollvolumen wird dann unter Berücksichtigung der anteiligen Volumen der beiden Phasen gemittelt.

Die Stampf- und Tauchbewegungen des Schiffes sind im Flachwasser ausgeprägter als im Tiefwasser und ihr Einfluss auf die hydrodynamischen Kräfte ist nicht vernachlässigbar. Daher werden die Stampf- und Tauchbewegungen in den numerischen Simulationen, ebenso wie in den Modellversuchen, zugelassen. Die Bewegung des Schiffes wird mit der Overset-Mesh-Technik umgesetzt.

Das verwendete Rechengebiet ist in Abbildung 92 dargestellt. Einlass und Auslass sind jeweils vier Schiffslängen vom Mittelpunkt des Schiffs entfernt. Die Breite des Rechengebiets entspricht für die Validierung der Tankbreite bei den Modellversuchen (7 m), die bei Flanders Hydraulic (FH) stattfanden. Die Wassertiefe entspricht dem doppelten Tiefgang des Schiffes und die obere Begrenzung des Rechengebiets hat einen Abstand von einer Schiffslänge zur Wasseroberfläche im ruhenden Zustand. In Abbildung 93 sind das Hintergrundgitter für den Strömungskanal und das Overset-Gitter des Schiffes dargestellt.

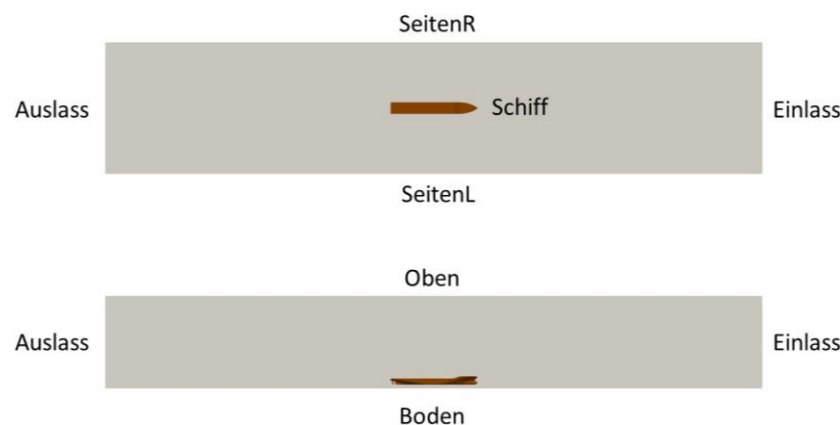


Abbildung 92 Rechengebiet

An den Begrenzungen des Rechengebiets und an der Schiffsoberfläche wurden Neumann- und Dirichlet-Randbedingungen angesetzt. Am Einlass sowie an reibungsbehafteten Wänden wurden Dirichlet-Randbedingungen verwendet, am Auslass sowie an reibungsfreien Wänden Neumann-Randbedingungen. Für die Verwendung der Overset-Methode wurde für jede Transportgröße eine weitere Randbedingung definiert, die eine Übertragung und Interpolation der Strömungsgrößen bzw. der Gitterbewegungen zwischen den überlappenden Gittern erlaubt.

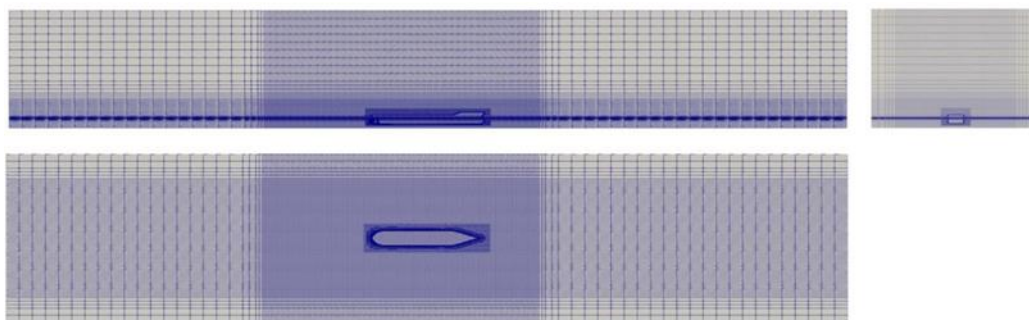


Abbildung 93 Hintergrundgitter mit überlappendem Overset-Gitter des Schiffes

Bei den gefesselten Modellversuchen bei Flanders Hydraulic im Zuge des SIMMAN-Workshops 2014 war das Schiff mit einem Propeller und Ruder ausgerüstet. In den numerischen Simulationen wurde die Wirkung des Propellers über ein Druckscheiben-Modell abgebildet, um die Zahl der Kontrollvolumen zu verringern und die Simulationen zu beschleunigen. In Abbildung 94 sind das Propeller-Freifahrt-diagramm (links), die Schub- und Drehmomentverläufe (Mitte) sowie die Beiwerte des kalibrierten Druckscheiben-Modells (rechts) dargestellt. Die Abbildungen 95 und 96 zeigen jeweils die Geschwindigkeits- und Druckverteilung in der Mittschiffsebene. In den Abbildungen sind die durch den Propeller induzierten Änderungen der Geschwindigkeit und des Drucks erkennbar.

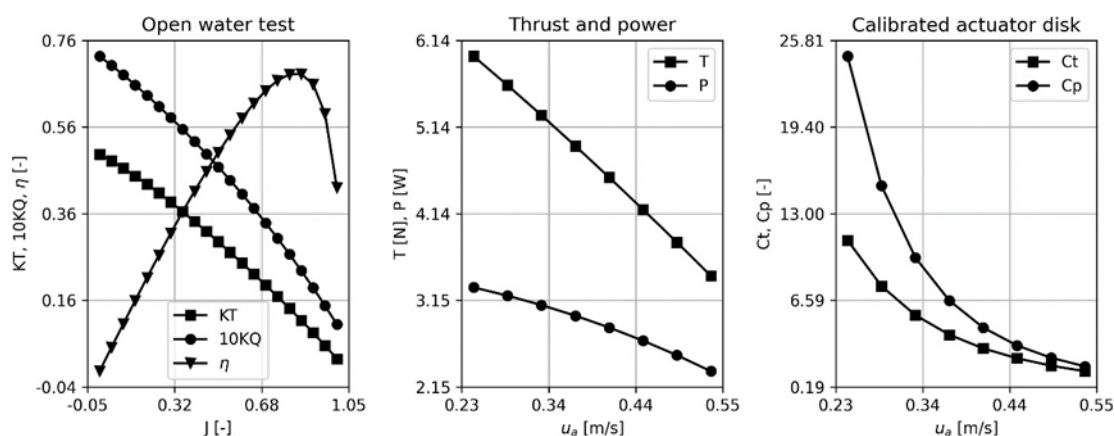


Abbildung 94 Kalibrierung des Druckscheiben-Modells

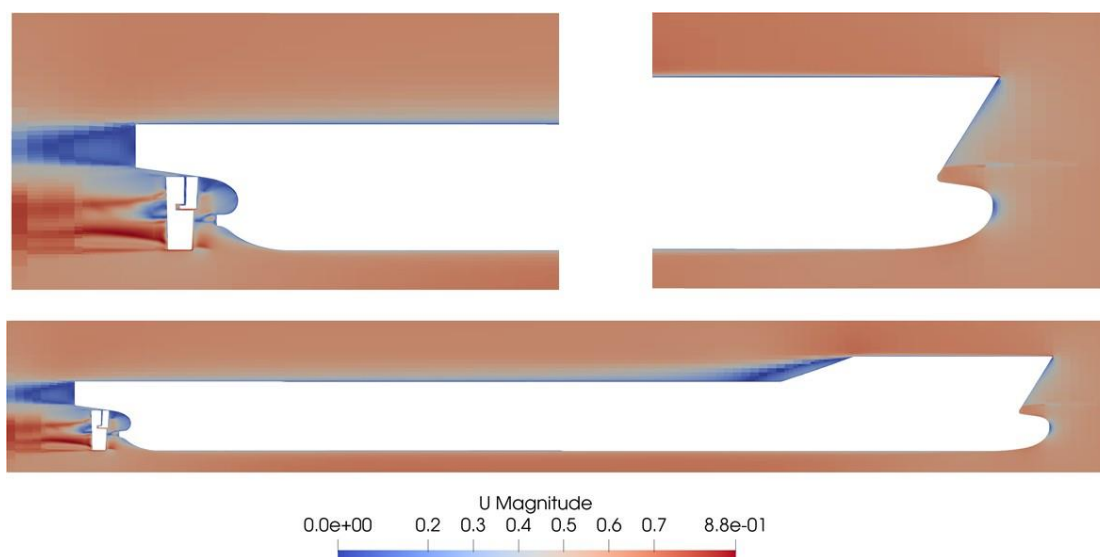


Abbildung 95 Geschwindigkeitsfeld in der Mittschiffsebene in m/s

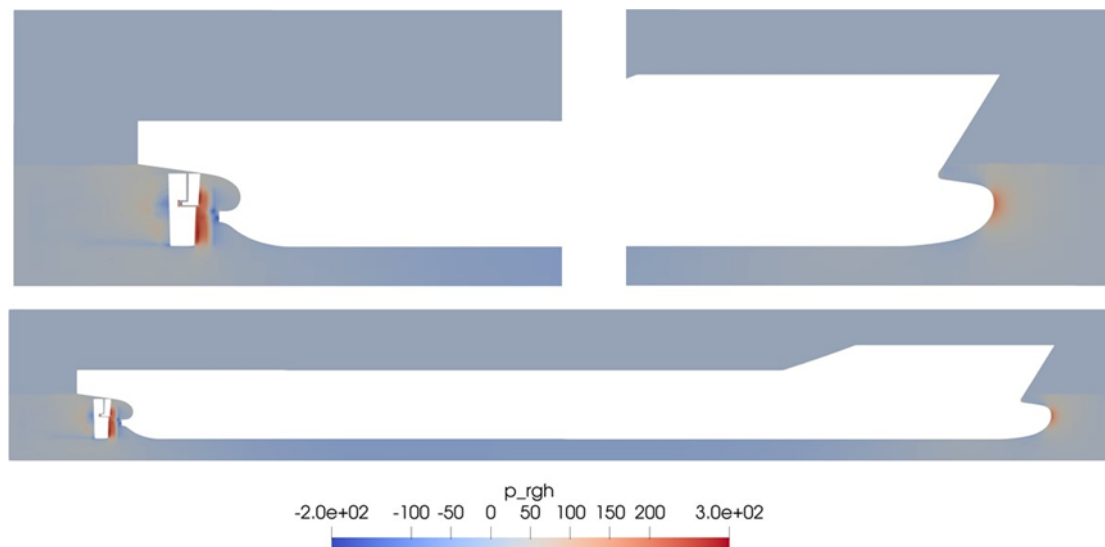


Abbildung 96 Druckverteilung in der Mittschiffsebene in Pa

Zur genaueren Berechnung der Druck- bzw. Reibungskräfte am Rumpf und den Anhängen erfolgte eine direkte Auflösung der Grenzschicht. Dies bedingt y^+ -Werte unter 5. Es wurde eine Gitterstudie nach dem Verfahren von Oberhagemann und el Moctar (2016) durchgeführt. Dabei wurden die Gittergröße und der Zeitschritt gleichzeitig angepasst, um die Courant-Zahl konstant zu halten. Die Ergebnisse der Gitterstudie sind in der Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse der Gitterstudie mit den Experimenten aus dem SIMMAN-Workshop 2014

	Kontrollvolumen	F_x	Fehler	F_y	Fehler
	10^6	[N]	[-]	[N]	[-]
Grob	1,9	-4,448	-4,6%	-1,393	-14,3%
Mittel	3,9	-4,565	-2,1%	-1,496	-8,0%
Fein	17,9	-4,610	-1,1%	-1,584	-2,6%
Extrapolation	-	-4,643	-0,4%	-1,609	-1,0%
Experiment	-	-4,661	-	-1,626*	-

Basierend auf den drei Gittern wurde eine quadratische Extrapolation durchgeführt. Abbildung 97 stellt die Ergebnisse der Gitterstudie im Vergleich mit experimentellen Daten dar. Die drei untersuchten Gitterauflösungen werden über die dimensionslosen Größe γ repräsentiert. Dabei entspricht $\gamma = 1$ dem groben Gitter und $\gamma = 0$ bezieht sich auf das Ergebnis der Extrapolation auf ein zeitlich und räumlich unabhängiges Gitter. Es wurde eine monotone Konvergenz bezüglich der Längs- (F_x) und Querkraft (F_y) erzielt. Die Abweichung zwischen Simulationen und Experiment sind auf einen leicht veränderten Gewichtsschwerpunkt bei den Modellversuchen zurückzuführen. Auf Basis einer Betrachtung der erzielbaren Genauigkeit in Verbindung mit dem Rechenaufwand wurde das mittlere Rechengitter für die weiteren Untersuchungen gewählt. Mit Abweichungen von -2,1 % für die Längskraft und -8,0 % für die Querkraft liefert das Gitter hinreichend genaue Ergebnisse und erfordert einen akzeptablen Rechenaufwand.

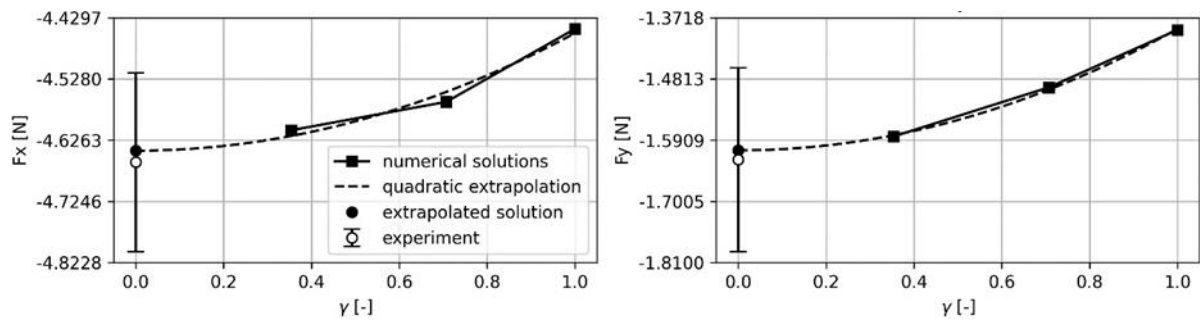


Abbildung 97 Gitterstudie und Vergleich mit experimentellen Daten aus dem SIMMAN-Workshop 2014

Für die Validierung der numerischen Simulationen der Überholvorgänge wurde eine vereinfachte Rumpfform, das sog. „Wigley hull“, verwendet. Zur Ermittlung der numerischen Unsicherheiten wurde für einen Abstand zwischen den Schiffen von $d/B = 1.5$ eine Gitterstudie durchgeführt. Dabei bezeichnet d den Abstand zwischen den Mittelebenen beider Schiffe und B die Schiffsbreite. Die numerischen Berechnungen wurden auf drei Rechengittern mit jeweils 4,86 Mio., 7,11 Mio. und 11,15 Mio. Kontrollvolumen durchgeführt.

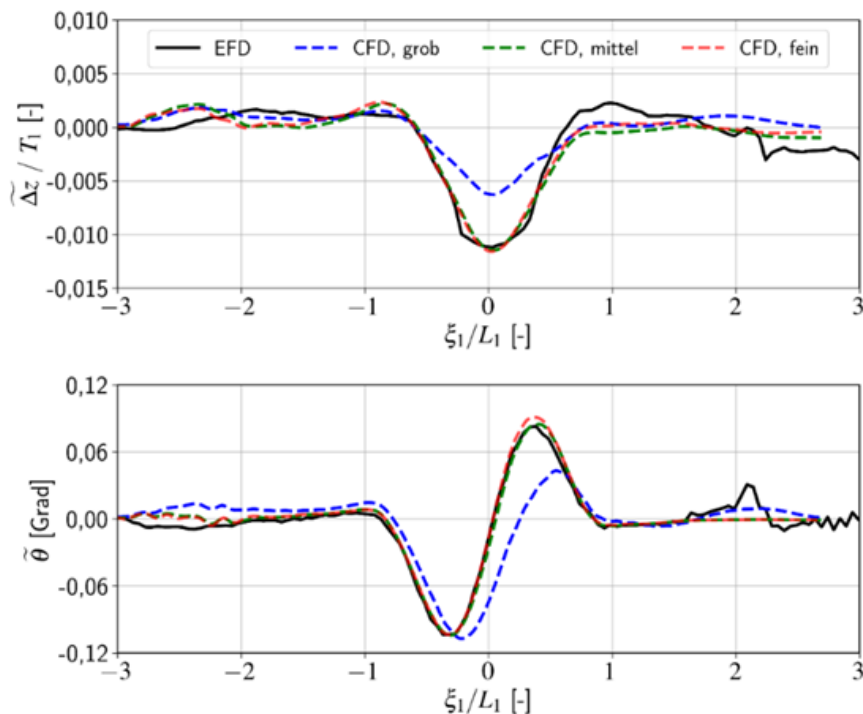


Abbildung 98 Validierungsstudie der Verläufe von Absenkung $\tilde{\Delta z}$ (oben) und Trimm $\tilde{\theta}$ (unten) während eines Überholvorgangs mit einem normierten Abstand von $d/B = 1.5$

In Abbildung 98 sind die Verläufe der Absenkung $\tilde{\Delta z}$ und des Trimmwinkels $\tilde{\theta}$ während des Überholvorgangs für einen Versuch aus der Literatur und Berechnungen mit den beschriebenen, unterschiedlich feinen Rechengittern dargestellt. Auf der Abszisse ist der Abstand beider Schiffe in Längsrichtung ξ_1 mit der Länge L_1 des überholenden Schiffes normiert. Auf der Ordinate des oberen Graphen ist die Absenkung $\tilde{\Delta z}$ mit dem Tiefgang T_1 normiert. Die Verläufe der berechneten Absenkung und des dynamischen Trimmwinkels stimmen für das mittlere und feine Rechengitter gut mit den experimentellen Daten überein. Abbildung 99 zeigt die Verläufe der während des Überholvorgangs auf das Eigenschiff wirkenden normierten Längskraft $\tilde{X}'$, Querkraft $\tilde{Y}'$ und des Giermoments $\tilde{N}'$. Auch hier stimmen die mit dem mittleren und feinen Rechengitter erzielten Ergebnisse gut mit den gemessenen Größen

überein. Somit wurde nachgewiesen, dass die Interaktion zwischen zwei Schiffen bei Überholvorgängen hinsichtlich der auftretenden Kräfte und Momente sowie des Trimmwinkels und der Absenkung mit dem RANSE-basierten Rechenverfahren in guter Näherung berechnet werden können, sofern das Rechengitter eine hinreichend feine räumliche Auflösung aufweist.

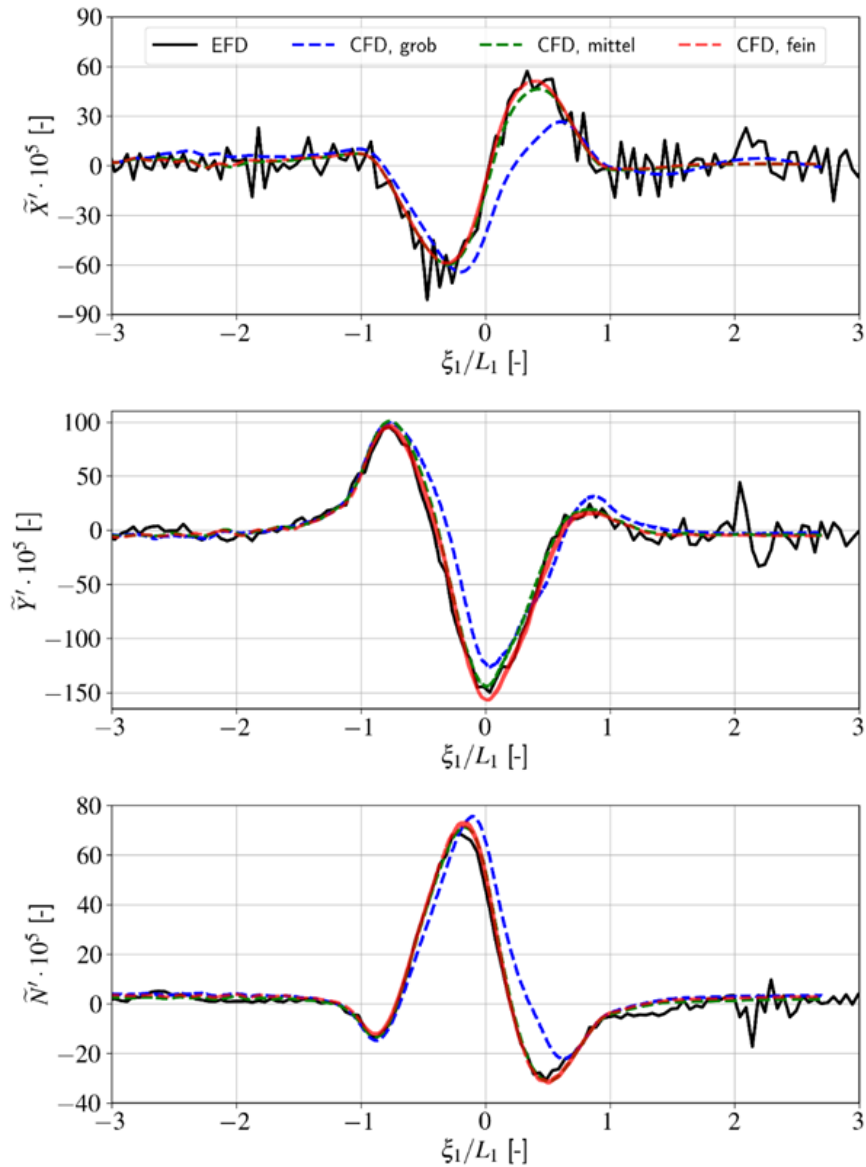


Abbildung 99 Validierungsstudie der normierten hydrodynamischen Längskraft $\tilde{X}'$ (oben), Querkraft $\tilde{Y}'$ (Mitte) und des Giermoments $\tilde{N}'$ (unten) bei einem Überholvorgang zwischen zwei Schiffen mit einem normierten Abstand von $d/B = 1.5$

15.1.2 Numerische Simulation des Überholvorgangs

Die Weiterentwicklung des Manövriermodells zur Abbildung der Einflüsse von Begegnungs- und Überholvorgängen erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde der Einfluss des Abstands zwischen beiden Schiffen auf die auf das Eigenschiff wirkenden Kräfte und Moments untersucht. Das Eigenschiff wurde sowohl als überholendes als auch überholtes Schiff betrachtet. Anschließend wurden die Berechnungen für verschiedene Wassertiefen durchgeführt, um den Einfluss von Flachwasser auf die Überholvorgänge zu untersuchen.

Die Untersuchungen zur Erweiterung des Manövriermodells wurden mittels eines RANSE-basierten numerischen Berechnungsverfahrens durchgeführt. Zur Simulation der Überholvorgänge wurde das Rechengebiet vergrößert um den Wandeinfluss auf beide Schiffe, welche zusammen mehr Platz im Rechengebiet in Anspruch nahmen, zu eliminieren. In Abbildung 100 ist das Rechengitter des erweiterten Rechengebiets (Ausdehnung in Längsrichtung $12L$ und in Querrichtung $20B$) dargestellt, wobei L und B jeweils der Länge und Breite des Eigenschiffes entsprechen. Im mittleren Bereich, in dem der Überholvorgang stattfindet, wurde das Rechengitter deutlich verfeinert. Das Eigenschiff befindet sich in der Mitte des Rechengebiets und wird mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $U = 0,62 \text{ m/s}$ angeströmt. Das zweite Schiff, bezeichnet als Fremdschiff, wird entweder als überholendes Schiff $1,5L$ hinter dem Eigenschiff oder als überholtes Schiff $1,5L$ vor dem Eigenschiff eingesetzt. Die Überholvorgänge in der Binnenschiffahrt finden normalerweise mit geringer Geschwindigkeitsdifferenz zwischen beiden Schiffen statt. In den Simulationen wurde das Fremdschiff als überholendes Schiff mit 10 % höherer Geschwindigkeit und als überholtes Schiff mit 10 % niedrigerer Geschwindigkeit als das Eigenschiff untersucht.

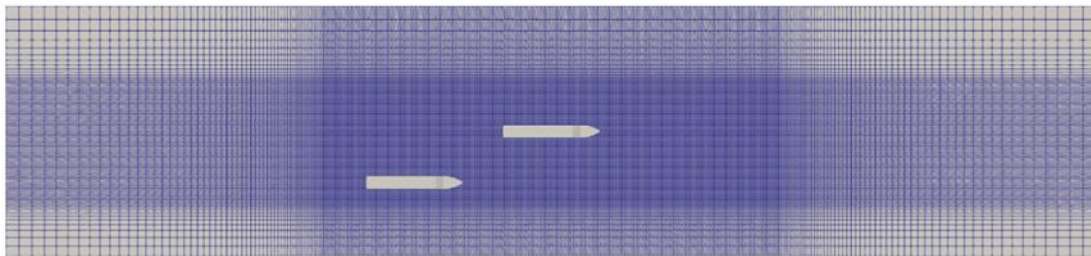


Abbildung 100 Erweitertes Rechengebiet für die Simulation der Überholvorgänge

Zur Berechnung der Bewegung des Eigenschiffes (Absenkung und Trimm) wurde ein 6-DoF-Bewegungslöser eingesetzt. Das Fremdschiff fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit, wobei die Bewegungen vorgegeben sind. Das Fremdschiff wurde zunächst für 100 s mit der Referenzgeschwindigkeit angeströmt. Dann wurde das Fremdschiff innerhalb von 20 s auf die Überholgeschwindigkeit beschleunigt. Das Fremdschiff überholte danach mit konstanter Geschwindigkeit das Eigenschiff.

Die Überholvorgänge wurden für vier verschiedene Abstände zwischen beiden Schiffen untersucht. Die Abstände wurden mit der Schiffsbreite normiert und betrugen 1,5; 2; 3 und 4. Der in Abbildung 100 dargestellte Überholvorgang fand bei einem dimensionslosen Abstand von $d/B = 4$ statt. In Abbildung 101 ist die Druckverteilung beim Überholvorgang mit einem dimensionslosen Abstand von 1,5 für drei unterschiedliche Zeitpunkte dargestellt. Die Druckbereiche beider Schiffe überlagern sich, wenn sich das überholende Fremdschiff dem Eigenschiff nähert. Wenn das überholende Fremdschiff sich dem Eigenschiff nähert, interagiert zunächst der Hochdruckbereich des Fremdschiffes mit dem Eigenschiff. Demzufolge erhöht sich die Querkraft und bewirkt ein negatives Giermoment am Eigenschiff. Wenn das Fremdschiff weiterfährt, überlagern sich die Niederdruckbereiche; die Querkraft verringert sich dementsprechend und wird negativ.

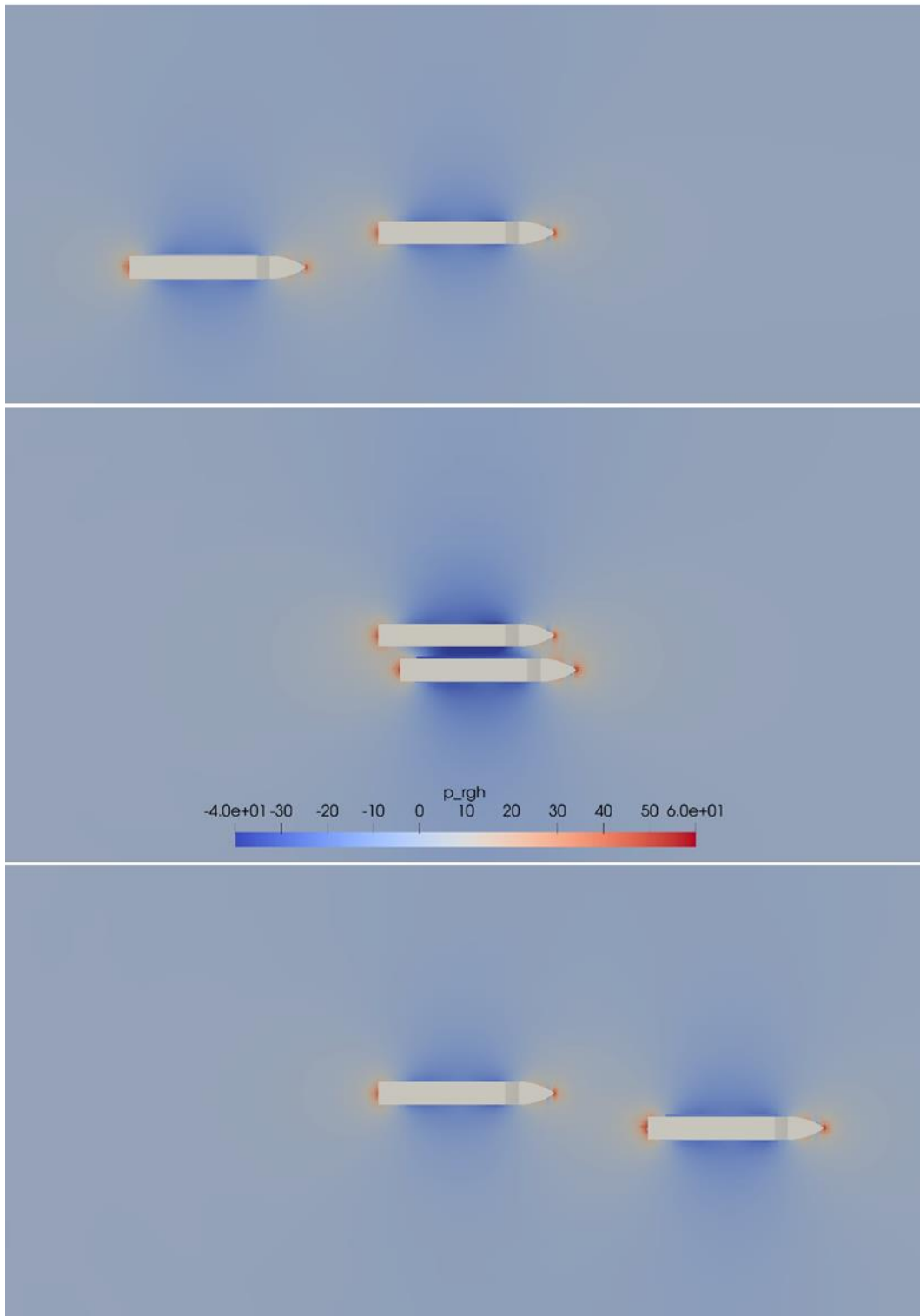


Abbildung 101 Druckverteilung an drei unterschiedlichen Zeitpunkten eines Überholvorgangs mit einem dimensionslosen Abstand von $d/B = 1,5$

Der Überholvorgang wurde auch unter Tiefwasserbedingungen ($h/T=4$) berechnet. Abbildung 102 zeigt die auf das überholte Schiff wirkende dimensionslose Längs- und Querkraft sowie das Giermoment für $h/T=4$ für verschiedene Abstände beider Schiffe. In diesem Beispiel wurde das Eigenschiff von einem anderen Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit überholt. Die Längskoordinate Δx bezeichnet die Relativposition des überholenden zum überholten Schiff. Bei $\Delta x = 0$ befinden sich beide Schiffe genau nebeneinander.

Bei großem Abstand ($d/B = 6$) lassen sich die Verläufe der Kräfte- und des Giermoments in guter Näherung als harmonische Funktion darstellen. Die Verläufe werden mit abnehmendem Abstand komplexer. Dieses Phänomen ist auf die während des Überholvorgangs interagierenden Druckfelder beider Schiffe zurückzuführen.

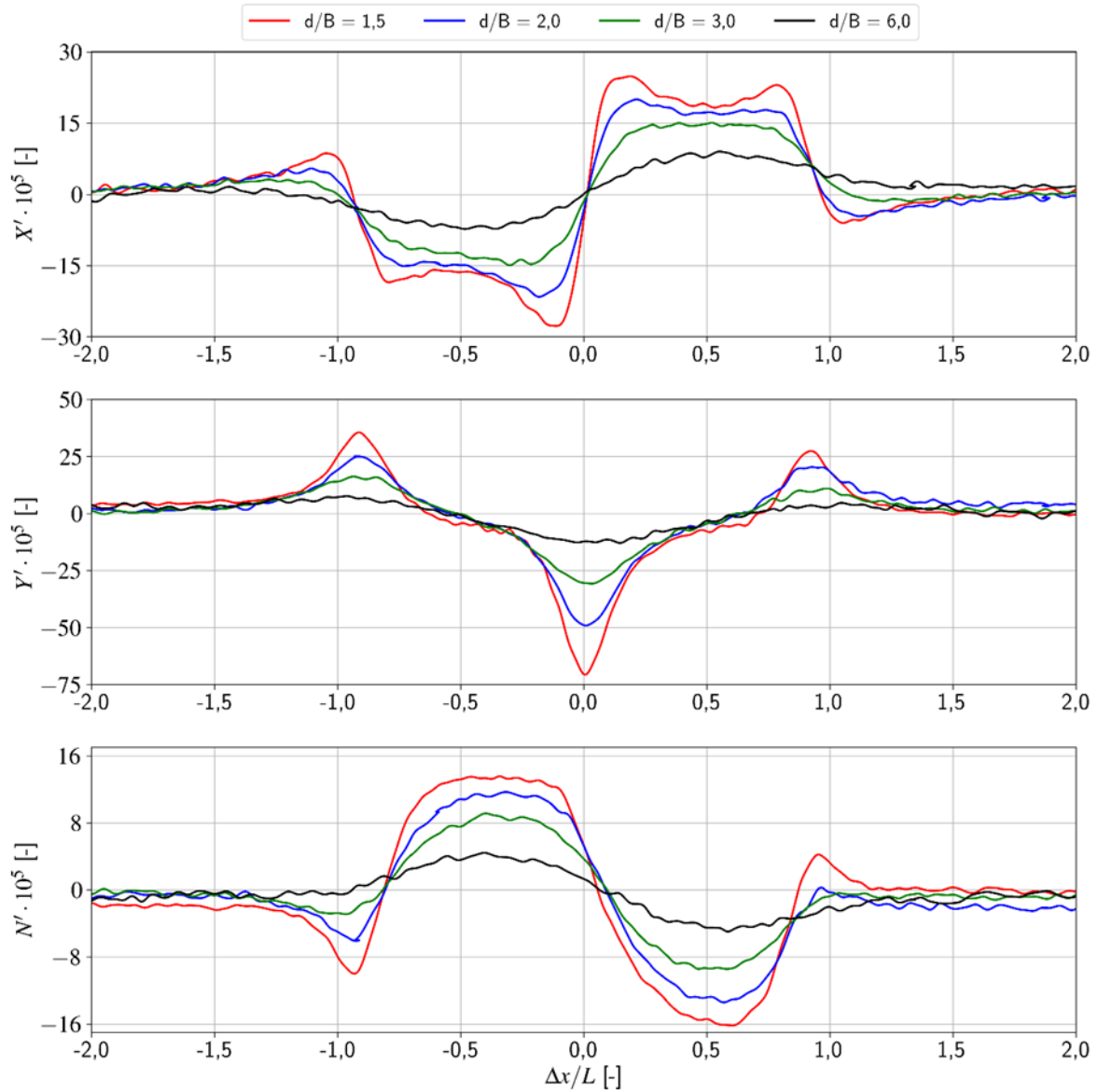


Abbildung 102 Verläufe der dimensionslosen Längskraft (oben), Querkraft (Mitte) sowie des Giermoments (unten) auf das überholte Schiff im Tiefwasser ($h/T = 4$) für unterschiedliche normierte Abstände d/B

15.1.3 Ausgangsmanövriermodell

Das zu erweiternde Manövriermodell basiert auf dem reduzierten Abkowitz-Modell aus Mucha und el Moctar (2015):

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr \quad (1)$$

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_0 + Y_vv + Y_{vv}v^3 + Y_r r + Y_{rrr}r^3 + Y_{\delta}\delta + Y_{vrr}vr^2 + Y_{rvv}rv^2 + Y_{\delta u}\delta\Delta u \quad (2)$$

$$N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_0 + N_vv + N_{vv}v^3 + N_r r + N_{rrr}r^3 + N_{\delta}\delta + N_{vrr}vr^2 + N_{rvv}rv^2 + N_{\delta u}\delta\Delta u \quad (3)$$

Dabei stehen X, Y und N jeweils für die auf das Schiff wirkenden Längs- und Querkräfte sowie das Giermoment. Die Kräfte und das Giermoment lassen sich als Funktionen der Bewegungsgrößen des Schiffes (Δu , v , r , etc.) und dem Ruderwinkel δ darstellen. Die Beiwerte in den Gleichungen werden auch als hydrodynamische Koeffizienten bezeichnet. Details zur Ableitung dieser Gleichungen können Abkowitz (1964), Wolff (1981) und Mucha und el Moctar (2015) entnommen werden.

Für die Entwicklung des Manövriermodells wurde das KRISO Containerschiff (KCS) gewählt, welches bereits in zahlreichen Veröffentlichungen und Workshops untersucht wurde. Gronarz (1997) hat umfassende gefesselte Modellversuche für dieses Schiff durchgeführt und die entsprechenden hydrodynamischen Koeffizienten, auch im Flachwasser, ermittelt. Diese Ergebnisse waren der Ausgangspunkt für die Erweiterung des Manövriermodells.

15.1.4 Erweitertes Manövriermodell

Basierend auf systematischen Untersuchungen mit dem Testschiff wurde das Ausgangsmanövriermodell modifiziert. Die zusätzlichen Terme höherer Ordnung $X_{vvvv}v^4$ und $X_{vvrr}v^2r^2$ wurden eingeführt, um die Längskraft bei Drift- und Rotationsarmversuchen genauer ermitteln zu können. Aufgrund des besonderen Propulsionssystems des Testschiffes (Einschrauber mit Düse und Düsenpropeller), sind die Ruderkräfte und -momente stärker mit der Schiffsgeschwindigkeit gekoppelt. Mit den zusätzlichen Termen $X_{u\delta\delta}\Delta u\delta^2$, $Y_{u\delta\delta}\Delta u\delta^3$ und $N_{u\delta\delta}\Delta u\delta^3$ lassen sich die hydrodynamischen Kräfte und Momente in Ruderversuchen bei unterschiedlichen Schiffsgeschwindigkeiten mit höherer Genauigkeit ermitteln. Die folgenden Gleichungen zeigen das modifizierte Manövriermodell. Die neu eingeführten Terme sind rot markiert.

$$X = X_0 + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{vv}v^2 + X_{vvvv}v^4 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr + X_{vvrr}v^2r^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{u\delta\delta}\Delta u\delta^2 \quad (4)$$

$$Y = Y_0 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_vv + Y_{vv}v^3 + Y_r r + Y_{rrr}r^3 + Y_{vrr}vr^2 + Y_{vvr}v^2r + Y_{\delta}\delta + Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 + Y_{u\delta}\Delta u\delta + Y_{u\delta\delta}\Delta u\delta^3 \quad (5)$$

$$N = N_0 + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_vv + N_{vv}v^3 + N_r r + N_{rrr}r^3 + N_{vrr}vr^2 + N_{vvr}v^2r + N_{\delta}\delta + N_{\delta\delta\delta}\delta^3 + N_{u\delta}\Delta u\delta + N_{u\delta\delta}\Delta u\delta^3 \quad (6)$$

15.1.5 Wassertiefenabhängiges Manövriermodell

Zur Modellierung der Flachwassereffekte wurden zusätzliche Funktionen für die hydrodynamischen Kräfte und Momente, die mittels gefesselter Modellversuche ermittelt wurden, entwickelt. Die folgenden Gleichungen zeigen das Flachwasser-Manövriermodell. Die zusätzlichen Funktionen sind rot gekennzeichnet. Der Einfluss des Flachwassers auf die hydrodynamischen Kräfte und Momente hängt exponentiell von der dimensionslosen Wassertiefe $h' = h/T$ ab. Dabei entspricht h der Wassertiefe und

T dem Tiefgang des Schiffes. Der Exponent α und der Vorfaktor C wurden über Regressionsanalysen aus den hydrodynamischen Kräften und Momenten berechnet. Der Vorfaktor C hängt von einer Zustandsgröße x , z. B. der Längsgeschwindigkeit u , Quergeschwindigkeit v , oder Drehrate r , ab. Die Koeffizienten a , b , c und α werden als Flachwasserkoeffizienten bezeichnet.

$$\begin{aligned}
{}^sX &= X_{\dot{u}}\dot{u} \cdot f_{X\dot{u}}(h') \\
&+ (X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2) \cdot f_{Xu}(h') \\
&+ (X_{vv}v^2 + X_{vvvv}v^4) \cdot f_{Xv}(h') \\
&+ (X_{rr}r^2 + X_{vr}vr + X_{vvrr}v^2r^2) \cdot f_{Xr}(h') \\
&+ (X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{u\delta\delta}\Delta u\delta^2) \cdot f_{X\delta}(h') \\
{}^sY &= Y_{\dot{v}}\dot{v} \cdot f_{Y\dot{v}}(h') + Y_{\dot{r}}\dot{r} \cdot f_{Y\dot{r}}(h') \\
&+ (Y_vv + Y_{vvv}v^3) \cdot f_{Yv}(h') \\
&+ (Y_r r + Y_{rrr}r^3) \cdot f_{Yr}(h') \\
&+ (Y_{vrr}vr^2 + Y_{vvrr}v^2r) \cdot f_{Yvr}(h') \\
&+ (Y_{\delta\delta}\delta + Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 + Y_{u\delta\delta}\Delta u\delta + Y_{u\delta\delta\delta}\Delta u\delta^3) \cdot f_{Y\delta}(h') \\
{}^sN &= N_{\dot{v}}\dot{v} \cdot f_{N\dot{v}}(h') + N_{\dot{r}}\dot{r} \cdot f_{N\dot{r}}(h') \\
&+ (N_vv + N_{vvv}v^3 + N_{vrr}vr^2) \cdot f_{Nv}(h') \\
&+ (N_r r + N_{rrr}r^3) \cdot f_{Nr}(h') \\
&+ N_{vvrr}v^2r \cdot f_{Nvrr}(h') \\
&+ (N_{\delta\delta}\delta + N_{\delta\delta\delta}\delta^3 + N_{u\delta\delta}\Delta u\delta + N_{u\delta\delta\delta}\Delta u\delta^3) \cdot f_{N\delta}(h')
\end{aligned} \tag{7}$$

wobei

$$f(h') = C \cdot (h')^{-\alpha} + 1 \quad \text{mit } C = ax^2 + bx + c \tag{8}$$

15.1.6 Fourier-basiertes Modell für die Schiff-Schiff-Interaktion beim Überholen

Zur Abbildung der wechselseitigen Kräfte und Momente bei Überholvorgängen wurde ein Fourier-basiertes Modell entwickelt. Die aufgrund von Überholvorgängen entstehenden Kräfte und Momente auf das Eigenschiff werden als $\tilde{X}(\xi)$, $\tilde{Y}(\xi)$ und $\tilde{N}(\xi)$ bezeichnet, wobei ξ die Distanz zwischen Fremdschiff und Eigenschiff in Längsrichtung bezeichnet. Abbildung 103 zeigt das Koordinatensystem auf dem Eigenschiff (Own). Die entstehenden Kräfte und das Giermoment werden für das Eigenschiff ausgewertet, unabhängig davon, welches der beiden Schiffe – Eigenschiff oder Fremdschiff (Target) –überholt.

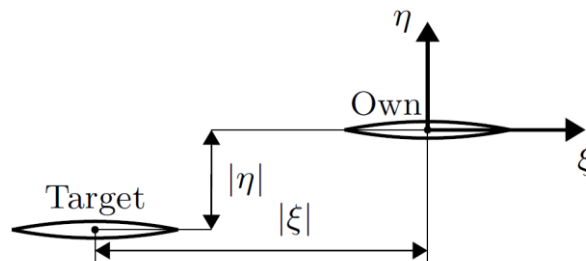


Abbildung 103 Koordinatensystem auf dem Eigenschiff beim Überholen

Die interagierenden Kräfte und Momente werden mit der Staudruck des Eigenschiffes normiert (siehe Gl. 9), wobei ρ die Wasserdichte bezeichnet. U_o und L_o bezeichnen die Geschwindigkeit und die Länge des Eigenschiffes:

$$\begin{aligned}\tilde{X}(\xi) &= \tilde{X}'(\xi) \cdot 0.5\rho U_o^2 L_o^2 \\ \tilde{Y}(\xi) &= \tilde{Y}'(\xi) \cdot 0.5\rho U_o^2 L_o^2 \\ \tilde{N}(\xi) &= \tilde{N}'(\xi) \cdot 0.5\rho U_o^2 L_o^3\end{aligned}\quad (9)$$

Die normierten Interaktionskräfte und das -moment wurden mit der folgenden Gleichung modelliert:

$$\begin{aligned}\tilde{X}'(\xi) &= \left(a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cdot k_\eta \cdot \cos(n\omega_0\xi' + b_n) \right) e^{-\left|\frac{\xi'}{\sigma}\right|^\alpha} \cdot \frac{k_U}{k_{U,ref}} \cdot k_h \\ \tilde{Y}'(\xi) &= \left(a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cdot k_\eta \cdot \cos(n\omega_0\xi' + b_n) \right) e^{-\left|\frac{\xi'}{\sigma}\right|^\alpha} \cdot \frac{k_U}{k_{U,ref}} \cdot k_h \\ \tilde{N}'(\xi) &= \left(a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cdot k_\eta \cdot \cos(n\omega_0\xi' + b_n) \right) e^{-\left|\frac{\xi'}{\sigma}\right|^\alpha} \cdot \frac{k_U}{k_{U,ref}} \cdot k_h\end{aligned}\quad (10)$$

mit

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \frac{2\pi}{\xi'_{up} - \xi'_{low}}, \\ k_\eta &= \left| \frac{\eta'_{ref}}{\eta'} \right|^\kappa e^{-\left(|\eta' - \eta'_{ref}| \frac{n}{N} \right)^{2|\eta'|}}, \\ k_U &= \left(1 + 2 \frac{U_t}{U_o} + \left(\frac{U_t}{U_o} \right)^2 \right) \left(\frac{U_o}{U_{o,ref}} \right)^{c_1} \left(\frac{U_t}{U_{t,ref}} \right)^{c_2}, \\ k_{U,ref} &= 1 + 2 \frac{U_{t,ref}}{U_{o,ref}} + \left(\frac{U_{t,ref}}{U_{o,ref}} \right)^2, \\ k_h &= 1 + k_1 \left(\frac{h}{T} \right)^{k_2} - k_1 \left(\frac{h}{T} \right)_d^{k_2}\end{aligned}\quad (11)$$

Wobei ξ' die dimensionslose Distanz des Fremdschiffs zum Eigenschiff in Längsrichtung ist. Die Größe ω_0 kennzeichnet die Grundfrequenz zur Abbildung der Interaktionskräfte und des -moments, während a_0 , a_n und b_n die harmonischen Koeffizienten der Fourier-Reihe und N die Anzahl der verwendeten harmonischen Schwingungen bezeichnen. Die Exponentialfunktion mit den Parametern α und σ dient zur Dämpfung der unerwünschten Schwingungen am Rande der Interaktionszone, die Faktoren k_η , k_U und k_h wurden zur Modellierung der Einflüsse des Seitenabstands, der Schiffsgeschwindigkeit und der Wassertiefe implementiert. Die Grundfrequenz ω_0 hängt von der Breite der Interaktionszone $\xi'_{up} - \xi'_{low}$ ab.

Der Seitenabstand η' beeinflusst die Interaktionskräfte und das -moment in zweifacher Hinsicht: Zunächst verringern sich die Interaktionskräfte und das -moment mit zunehmendem Seitenabstand in der Relation $\left| \eta'_{ref} / \eta' \right|^\kappa$, wobei η'_{ref} der Referenzabstand ist. Darüber hinaus entsprechen die Verläufe der Interaktionskräfte und des -moments bei größeren Seitenabständen eher der einer einzelnen harmonischen Schwingung und benötigen dann dementsprechend harmonische Komponenten.

Bei einem Überholvorgang hängen die Interaktionskräfte und das -moment von den Geschwindigkeiten beider Schiffe ab, wobei U_o und U_t jeweils die aktuelle Geschwindigkeit des Eigenschiffes und des

Fremdschiffs bezeichnen. $U_{o,ref}$ und $U_{t,ref}$ sind die Referenzgeschwindigkeiten oder Entwurfsgeschwindigkeiten. Im Grunde sind die Interaktionskräfte und das -moment quadratisch abhängig von der Summe der Geschwindigkeiten beider Schiffe. Bei Überholvorgängen, die von den Referenzgeschwindigkeiten abweichen werden die Interaktionskräfte und das -moment korrigiert.

Die Flachwassereinflüsse auf die Interaktionskräfte und das -moment werden über eine Potenzfunktion der Wassertiefe approximiert. Es wird angenommen, dass die Interaktionskräfte und das -moment zunächst im Tiefwasser gemessen werden. Falls die Tiefwasserbedingung nicht erfüllt werden kann, wird der Faktor für den Flachwassereinfluss über die dimensionslose Wassertiefe $(h/T)_d$ korrigiert.

15.1.7 Manövriermodell unter Berücksichtigung der Gewässerströmung

Es wurde eine vereinfachte Methode entwickelt, um das Manövrieren von Schiffen in Flüssen zu approximieren. D. h., die Strömung in Flüssen wird in die Bewegungsgleichungen für das Manövrierverhalten des Schiffes einbezogen. Es werden vier Koordinatensysteme verwendet, um den Zustand eines in einem Fluss manövrierenden Schiffes zu beschreiben. Ein Koordinatensystem nach dem WGS-84-Standard wird verwendet, um die globale Schiffposition auf dem Globus zu beschreiben. Eine UTM-32-Standardprojektion auf die Ebene wird verwendet, um Flüsse und Umweltbedingungen zu visualisieren. Als Drittes beschreibt ein Inertial-Koordinatensystem $O\xi\eta\zeta$ die Position und den Kurs des Schiffes. Das vierte, schiffsfeste Koordinatensystem $oxyz$ beschreibt die kinematischen Größen des Schiffes, wie z. B. Geschwindigkeit und Beschleunigung. Der Ursprung o liegt mittschiffs auf der Wasseroberfläche, die x -Achse zeigt nach vorne, die y -Achse nach Backbord und die z -Achse nach oben. Das Inertial-Koordinatensystem $O\xi\eta\zeta$ wird verwendet, um die Position und Orientierung des Schiffes zu verfolgen. Die meisten über AIS übertragenen Daten sind in der Kartenprojektion Universal Transverse Mercator (UTM-32) angegeben. Daher sollte dieses Koordinatensystem verwendet werden und die Daten in das Inertial Koordinatensystem transformiert werden.

Die allgemeine Bewegungsgleichung eines in der Strömung fahrenden Schiffes kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden. Der Index RB steht für den Beitrag des starren Körpers und A für den Beitrag der zusätzlichen Masse.

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r = \mathbf{F}(\mathbf{v}_r, \delta, n) \quad (12)$$

Dabei ist $\mathbf{v}$ die Geschwindigkeit des starren Körpers, $\mathbf{v}_r$ die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Schiff und der Strömung und $\mathbf{v}_c$ die Strömungsgeschwindigkeit einer nicht rotierenden Flüssigkeit.

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_c = [u_c \quad v_c \quad w_c \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_r = [u - u_c \quad v - v_c \quad w - w_c \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (15)$$

Unter der Annahme, dass die Strömung während des Manövers rotationsfrei und konstant ist, kann die Bewegungsgleichung vereinfacht und nur in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit geschrieben werden.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r = \mathbf{F}(\mathbf{v}_r, \delta, n) \quad (16)$$

Dabei gilt: $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ und $\mathbf{C}(\mathbf{v}_r) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)$. Der Strömungsgeschwindigkeitsvektor kann im Inertialsystem oder im körperfesten Koordinatensystem ausgedrückt werden. Beide sind durch die Transformationsmatrix miteinander verbunden $\mathbf{T}(\phi, \theta, \psi)$:

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{T}(\phi, \theta, \psi)\mathbf{v}_c \quad (17)$$

Wobei $\mathbf{V}_c$ die aktuelle Geschwindigkeit im körperfesten Koordinatensystem und $\mathbf{v}_c$ die Geschwindigkeit im Inertialsystem ist. Die Symbole ϕ, θ und ψ sind die Euler-Winkel zwischen dem körperfesten und dem Inertialsystem. Eine rotationsfreie Strömung im Inertialkoordinatensystem erfüllt:

$$\dot{\mathbf{V}}_c = \dot{\mathbf{T}}(\phi, \theta, \psi)\mathbf{v}_c + \mathbf{T}(\phi, \theta, \psi)\dot{\mathbf{v}}_c = \mathbf{0} \quad (18)$$

Es gilt: $\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{T}\mathbf{S}(\omega)$, wobei $\mathbf{S}$ die schiefsymmetrische Matrix und ω die Winkelgeschwindigkeit des Schiffes im körperfesten System darstellen. Daher ist die Änderung der aktuellen Geschwindigkeit im Körperkoordinatensystem gegeben durch:

$$\dot{\mathbf{v}}_c = -\mathbf{S}(\omega)\mathbf{v}_c \quad (19)$$

Für das 3-DoF-Manövriermodell lauten die Matrizen und Vektoren:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G r \\ mr & 0 & 0 \\ mx_G r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}} v_r + Y_{\dot{r}} r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}} u_r \\ -Y_{\dot{v}} v_r - Y_{\dot{r}} r & X_{\dot{u}} u_r & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad r]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{v}_c = [u_c \quad v_c \quad 0]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{v}_r = [u - u_c \quad v - v_c \quad r]^T \quad (24)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = [\dot{u} \quad \dot{v} \quad \dot{r}]^T \quad (25)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_c = [-rv_c \quad -ru_c \quad 0]^T \quad (26)$$

Die entkoppelten Bewegungsgleichungen in drei Freiheitsgraden lauten dann:

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u}_r - (m - Y_{\dot{v}})v_r r - (mx_G - Y_{\dot{r}})r^2 = X(u_r, v_r, r, \delta, n) \quad (27)$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v}_r + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (m - X_{\dot{u}})u_r r = Y(u_r, v_r, r, \delta, n) \quad (28)$$

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v}_r + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} + (mx_G - Y_{\dot{r}})u_r r + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})u_r v_r = N(u_r, v_r, r, \delta, n) \quad (29)$$

So können die Einflüsse der Strömung auf die Bewegungen manövrierender Schiffe analysiert werden.

15.1.8 Propulsionsmodell

Im Rahmen des Projekts wurde ein vereinfachtes Propulsionsmodell entwickelt und mit dem Manövriermodell gekoppelt. Das Propulsionsmodell erfordert eine Kenntnis der Nachstromziffer w , um die Anströmgeschwindigkeit v_A des Propellers berechnen zu können. Als Eingabeparameter wird die Geschwindigkeit des Schiffes v_S und des Fluids v_F benötigt.

$$v_A = v_S(1 - w) \quad (30)$$

Um die Nachstromziffer zu berechnen, wird die Methode der Schubidentität genutzt. Aus den Modellversuchen sind das Freifahrttdiagramm und die Geschwindigkeit v_S , die Propellerdrehzahl n und der Schub T in Abhängigkeit der Wassertiefe bekannt. Die Wassertiefe hat einen entscheidenden Einfluss auf die Nachstromziffer, siehe Friedhoff et al. 2019. Für die Berechnungen werden die Daten aus den Modellversuchen unter Berücksichtigung der Froude'schen Ähnlichkeit auf die Großausführung extrapoliert. Der Index M steht im Folgenden für das Modell und der Index S für die Großausführung. Die Parameter werden wie folgt umgerechnet, wobei $\lambda = 15,3$ der geometrische Maßstabsfaktor ist.

$$D_S = D_M \lambda \quad (31)$$

$$v_S = v_M \sqrt{\lambda} \quad (32)$$

$$n_S = \frac{n_M}{\sqrt{\lambda}} \quad (33)$$

$$T_S = T_M \lambda^3 \quad (34)$$

In den Modellversuchen betrug der Propellerdurchmesser $D_M = 0,1 \text{ m}$. Des Weiteren sind in Tabelle 10 weitere benötigte Parameter bezogen auf die Wassertiefe h_M der Modellversuche aufgeführt. Die Geschwindigkeit v_M betrug bei allen Messungen $0,710 \text{ m/s}$ und die Dichte ρ des Wassers entsprach $998,43 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Tabelle 10 Daten aus Modellversuchen

$h_M[m]$	$n_M[1/s]$	$T_M[N]$
0,262	17,290	11,85
0,328	16,620	10,67
0,366	16,400	10,31
0,732	16,170	9,71

Die Daten wurden zunächst auf die Großausführung umgerechnet. Im Anschluss wurden die weiteren Berechnungen über die Schubidentität durchgeführt. Für jede Messreihe wurde dafür zunächst der Schubbeiwert über die folgende Gleichung berechnet.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (35)$$

Die Daten des Freifahrtendiagramms wurden über Splinefunktionen abgebildet, so dass für jeden Schubbeiwert die dazu passende Fortschrittsziffer J automatisch ermittelt werden kann. Die Anströmgeschwindigkeit des Propellers konnte daraufhin mit den folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$J = \frac{v_A}{n D} \quad (36)$$

$$v_A = J n D \quad (37)$$

$$w = 1 - \frac{v_A}{v_S} \quad (38)$$

In Abbildung 104 sind die Nachstromziffern für die Großausführung bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h dargestellt. Bei Modell M2158B handelt es sich um das hier untersuchte Testschiff Ernst Kramer. M2051 ist ein aus der Literatur bekanntes Schiff mit einem ähnlichen Heck als Vergleich (Friedhoff et al. 2019). Die Nachstromziffern für das Testschiff Ernst Kramer bei verschiedenen Wassertiefen in der Großausführung sind in Tabelle 11 aufgeführt.

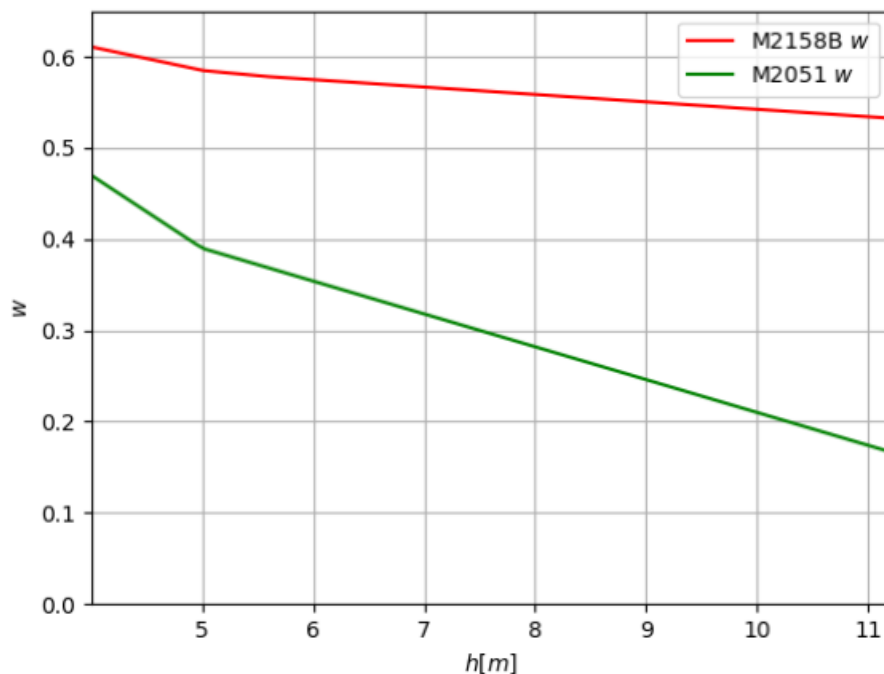


Abbildung 104 Nachstromziffern für die Schiffe M2158B (Testschiff) und M2051 (Vergleichsschiff aus der Literatur nach Friedhoff et al. 2019)

Tabelle 11 Nachstromziffern für verschiedene Wassertiefen

$h_S[m]$	$w_S[-]$
4	0,611
5	0,585
5,6	0,578
11,2	0,532

Der Schub kann mithilfe der Nachstromziffer und des Freifahrt diagrams berechnete werden. Hierzu sind die Datenreihen der Fortschrittsziffer J , des Schubbeiwerts K_T , des Drehmomentbeiwerts K_Q und des Freifahrtwirkungsgrads η_0 aus dem Freifahrt diagram notwendig. Als Eingabeparameter sind die Schiffsgeschwindigkeit $v_S [m/s]$, die Strömungsgeschwindigkeit $v_F [m/s]$, die Propellerdrehzahl $n [1/s]$, die Wassertiefe $h [m]$ und die Fahrtrichtung $dir [-]$ erforderlich.

Anhand der Wassertiefe wird die Nachstromziffer mit den Daten aus Tabelle 11 inter- bzw. extrapoliert. Dies geschieht über eine lineare Spline-Funktion. Anschließend wird mit der Schiffsgeschwindigkeit, der Strömungsgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung die Geschwindigkeit durch das Wasser v_{vw} berechnet. Für eine Talfahrt gilt die Gleichung:

$$v_{vw} = v_S - v_F \quad (39)$$

Für eine Bergfahrt gilt die Gleichung:

$$v_{vw} = v_S + v_F \quad (40)$$

Anschließend kann die Anströmgeschwindigkeit v_A berechnet werden. Mit der Anströmgeschwindigkeit, der Drehzahl des Propellers und dem Propellerdurchmesser wird die Fortschrittsziffer berechnet. Der Schub- und Drehmomentbeiwert und der Freifahrtwirkungsgrad werden über die Spline-Funktionen des Freifahrt diagrams berechnet. Durch Umstellen der Gleichungen für die beiden Beiwerte lassen sich der Schub und das Drehmoment wie folgt berechnen.

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (41)$$

$$Q = K_Q \rho n^3 D^5 \quad (42)$$

Für den digitalen Zwilling war es erforderlich, die mathematischen Formulierungen des Propulsionsmodells mit denen des Manövriermodells zu kombinieren, damit die Fahrtgeschwindigkeit auch während des Manövrierens verändert werden kann.

Der Ansatz für die Kombination der Abkowitz- und Propulsionsmodelle basiert auf der Annahme, dass die von der Geschwindigkeit u abhängigen Terme bezüglich der Längskraft X im Manövriermodell durch die Längskraft am Schiff und den erzeugten Schub ersetzt werden können. In diesem Fall ist die Summe der Längskräfte eine Kombination aus der Längskraft am Schiff R , dem Schub T und dem durch das Manöver induzierten Widerstand. Der Widerstand wird aus einer zuvor simulierten Widerstandskurve für die momentane Geschwindigkeit interpoliert. Die Nachstromziffer und die Sogziffer sind aus vorangegangenen Berechnungen bekannt. Der Schub wird mit dem Propulsionsmodell und der Sogziffer berechnet. Die gesamte Längskraft X_{total} ist in folgender Gleichung dargestellt. In der Gleichung entspricht X_{man} dem durch das Manöver induzierten Widerstand.

$$X_{total} = R + T + X_{man} \quad (43)$$

Der durch das Manöver induzierte Widerstand setzt sich nur aus den von der Driftgeschwindigkeit v , der Drehrate r und dem Ruderwinkel δ abhängigen Anteilen und deren Koeffizienten X_{vv} , X_{rr} , X_{vr} und $X_{\delta\delta}$ zusammen.

$$X_{man} = X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{vr} vr + X_{\delta\delta} \delta^2 \quad (44)$$

Zur Validierung wird das Manövriermode mit dem kombinierten Modell verglichen, wobei die Eingangsgrößen gleich sind, und das kombinierte Modell gezwungen wird, die Drehzahl konstant zu halten. Dies ist im reinen Manövriermode die Voraussetzung und eine Vergleichbarkeit ist somit geschaffen. Zur Validierung wurde das Schiff KVLCC2 genutzt, da zum Zeitpunkt der Entwicklung hierfür alle hydrodynamischen Koeffizienten und weiteren Parameter bekannt waren. Es wurden Drehkreis- und Zick-Zack-Manöver simuliert. In Tabelle 12 sind beispielhaft die Ergebnisse eines Drehkreismanövers mit einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ für das reine (links) und das kombinierte Manövriermode dargestellt. Die Berechnung erfolgte, bis eine Kurswinkeländerung von 720° erreicht wurde.

Tabelle 13 zeigt analog die Ergebnisse für ein $35^\circ/35^\circ$ Zick-Zack-Manöver. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Modell bei einer konstanten Propellerdrehzahl und einer Geschwindigkeit, die von den hydrodynamischen Koeffizienten des Abkowitz-Modells abgedeckt ist, gültig ist.

Tabelle 12: Ergebnisse eines Drehkreis-Manövers mit einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ und einem Abbruchkriterium von 720° für das reine und das kombinierte Manövriermode

Parameter	Reines Manövriermode	Kombiniertes Modell	Abweichung
Längsweg bei 90° Kurswinkeländerung	922,00 m	920,12 m	0,24 %
Querversatz bei 90° Kurswinkeländerung	421,55 m	421,37 m	0,002 %
Taktischer Durchmesser	1038,28 m	1041,2 m	0,28 %

Tabelle 13: Ergebnisse eines Zick-Zack-Manövers mit einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ und einer Kurswinkeländerung von $\Psi = 35^\circ$ für das reine und das kombinierte Manövriermode

Parameter	Reines Manövriermode	Kombiniertes Modell	Abweichung
Ruderlegezeit	15 s	15 s	0 %
Anschwenkzeit	77,8 s	77,8 s	0 %
Stützzeit	139,0 s	139,0 s	0 %
Überschwingwinkel	22,41 $^\circ$	22,40 $^\circ$	0,04 %

15.2 Modellierung des Testschiffs

15.2.1 Modellversuche und Validierung der numerischen Simulationen

Mit dem Testschiff "Ernst Kramer" wurden Manövrierversuche im Modellmaßstab durchgeführt. Die Versuchsmatrix für die Modellversuche wurde von der UDE entwickelt und mit dem DST abgestimmt. Es wurde ein Modell im Maßstab 1:15,3 verwendet. Die Versuche wurden für Geschwindigkeiten durchgeführt, die in der Großausführung 6, 8 und 10 km/h entsprechen. Insofern wurden die für die Fahrt auf dem Rhein und in Kanälen relevanten Geschwindigkeiten abgedeckt. Die untersuchten Verhältnisse zwischen Wassertiefe und Tiefgang wurden so ausgewählt, dass sowohl typische Bedingungen der Kanalfahrt als auch der Fahrt auf dem Rhein abgedeckt wurden. Es wurden also auch Versuche für Flachwasserbedingungen durchgeführt. Die Versuche wurden durchgeführt, um einerseits die von der UDE durchzuführenden numerischen Simulationen des Testschiffs zu validieren und andererseits, um eine Auswahl hydrodynamischer Koeffizienten zu ermitteln. Ausgewählte Versuche wurden mehrfach wiederholt. Es wurden gefesselte Modellversuche durchgeführt. Dabei wurde das Schiff an einer PMM-Anlage (engl. Planar Motion Mechanism) befestigt, so dass dem Modell während der Fahrt in der Schlepprinne vordefinierte Bewegungen aufgeprägt werden konnten und die Reaktionskräfte an der Einspannung sowie die Bahnverläufe gemessen wurden. Vorläufige Ergebnisse liegen der UDE bereits vor.

Um geeignete Randbedingungen zu finden, wurden die Berechnungen unter zwei Hauptbedingungen durchgeführt: gefesselte Ruder- und Driftversuche. Sobald die Randbedingungen validiert sind, kann mit der systematischen Berechnung der hydrodynamischen Koeffizienten fortgefahren werden.

Die Berechnungen für gefesselte Ruderversuche werden mit dem Zweikörperansatz durchgeführt, da das Schiff mit einer kleinen Froude-Zahl ($F_n = 0,086$) fährt. Die Abmessungen des Rechengebiets entsprechen den seitlichen Abmessungen der Schlepprinne des DST. Es wurden zwei Turbulenzmodelle eingesetzt, das $k-\omega$ - und das Reynolds-Spannungs-Turbulenzmodell (RST-Modell). Abbildung 105 zeigt den Vergleich zwischen den Messergebnissen des DST und den RANS-Berechnungen mit dem Reynolds-Spannungstensor. Ein quantitativer Vergleich zwischen experimentellen Messungen und Berechnungen ist in Tabelle 14 für einen Ruderwinkel von $\delta = 40^\circ$ dargestellt.

Die Simulationen mit dem $k-\omega$ -Modell ergaben Fehler von über 20 % für die Längskraft und das Giermoment. Die Fehler für das Reynolds-Spannungs-Turbulenzmodell betragen 1,8 % für die Längskraft und 8,7 % für das Giermoment. Diese ersten Tests zeigen, dass die Methode in der Lage ist, die wichtigsten physikalischen Phänomene des gefesselten Ruderversuches zu erfassen. Es ist jedoch möglich, dass die Ergebnisse nach Durchführung einer Diskretisierungsstudie weiter verbessert werden können.

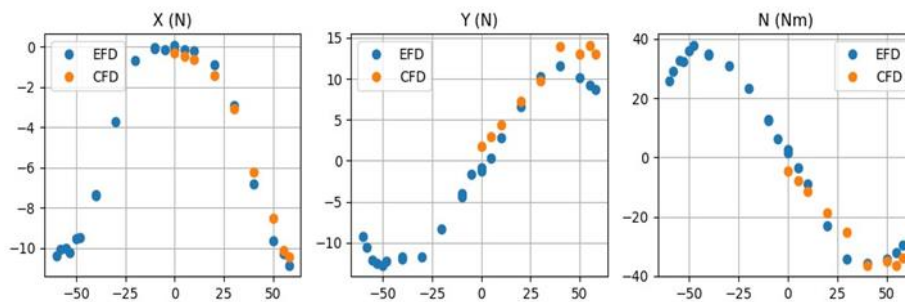


Abbildung 105 Kräfte und Momente bei einem gefesselten Ruderversuch. In blau die experimentellen Messungen (EFD) und in orange die RANS-Berechnungen mit dem Reynold-Stress-Turbulenzmodell (CFD)

Tabelle 14 Ergebnisse der Simulation ($\delta = 40$)

-	DST	Simulation mit RST-Modell	Erste Validierung (Instationär)	Einheit
X	-6,815	-6,223	-4,287	N
Y	11,554	13,986	10,556	N
N	-35,6904	-36,335	-27,935	Nm

Der gefesselte Driftversuch stellt ein komplexeres Strömungsphänomen dar, insbesondere wenn große Driftwinkel vorliegen. Aus diesem Grund wird die freie Oberfläche mit der Volume-of-Fluid-Methode simuliert. Abbildung 106 zeigt einen Vergleich von Querkraft, Giermoment, Trim und Absenkung zwischen CFD (Modellmaßstab) und Modellversuch für $h/T = 1,43$. Sowohl die Kräfte und Momente als auch die Veränderungen der Schwimmlage stimmen für nahezu alle Driftwinkel gut überein. Lediglich bei 0° Driftwinkel weicht die Absenkung etwas ab.

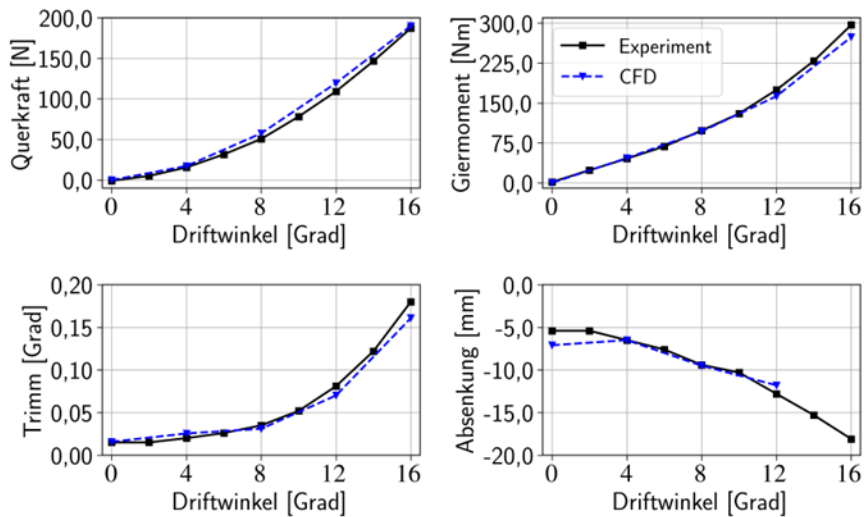


Abbildung 106 Vergleich der numerischen Schrägschleppversuche mit Modellversuchen bei $h/T = 1,43$

15.2.2 Manövrieren im Tief- und Flachwasser

Nach der dargestellten Validierung für Flachwasser, wurden die numerischen Schrägschleppversuche für vier weitere Verhältnisse zwischen Wassertiefe und Tiefgang ($h/T = 1,79, 2, 4$ und 8) durchgeführt, um die Basis der existierenden Modellversuchsdaten zu erweitern. Abbildung 107 zeigt die Ergebnisse der numerischen Schrägschleppversuche. Die hydrodynamischen Kräfte und Momente unterscheiden sich zwischen $h/T = 4$ und 8 kaum, wenngleich die Absenkung unterschiedlich ist. Daraus wurde gefolgert, dass ab $h/T = 4$ unter hydrodynamischen Gesichtspunkten von einer Tiefwasser-Situation ausgegangen werden kann.

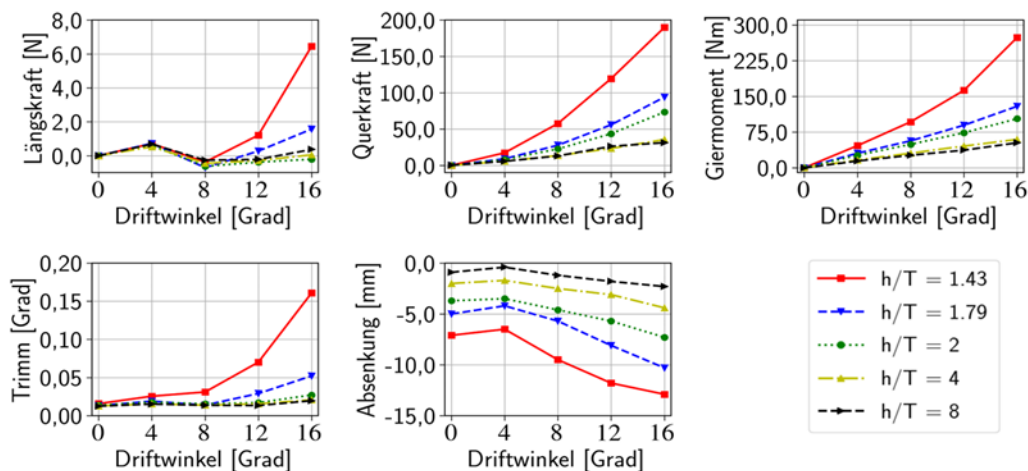


Abbildung 107 Ergebnisse der numerischen Schrägschleppversuche bei verschiedenen h/T

Die Ergebnisse der Kräfte und Momente und der dynamischen Bewegungen sind in Abbildung 108 dargestellt. Es fällt auf, dass Querkraft und Gierrmoment bei etwa 40° Ruderwinkel ein Maximum annehmen (sog. Stall Bedingungen). Der Einfluss des Flachwassers ist bei den Ruderversuchen nicht so stark ausgeprägt wie bei den Driftversuchen.

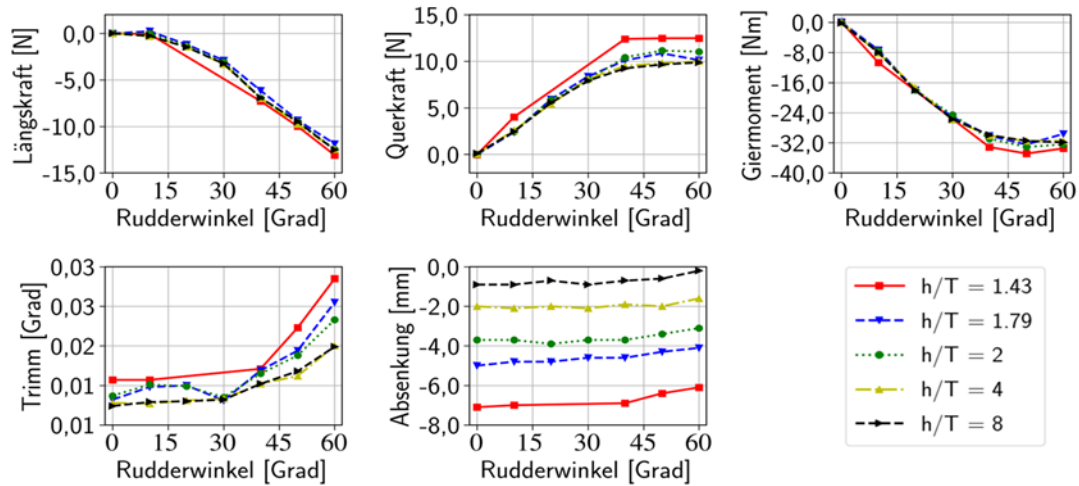


Abbildung 108: Ergebnisse der numerischen Ruderversuche bei verschiedenen Wassertiefen

Die beschleunigungsabhängigen Kräfte wurden mittels numerischen Simulationen (Euler-Gleichungen) berechnet, bei denen das Schiff über einen einzigen, kurzen Zeitschritt mit einer hohen Anzahl innerer Iterationen beschleunigt wurde, siehe el Moctar et al. (2022). Dadurch sind keine geschwindigkeitsabhängigen Kräfte und Momente vorhanden. Die Beschleunigung erfolgt entweder translatorisch oder rotatorisch. Die ermittelte Zusatzmassen bzw. Zusatzträgheitsmomente sind unabhängig von der Frequenz. Die Frequenzabhängigkeit der Zusatzmassen und Zusatzträgheitsmomente mit gängigen PMM-Verfahren wird in Yang und el Moctar (2022) erörtert. In Abbildung 109 sind die hydrodynamischen Zusatzmassen ($X_{\ddot{u}}$, $Y_{\ddot{v}}$, $Y_{\ddot{r}}$) und Zusatzträgheitsmomente ($N_{\ddot{v}}$, $N_{\ddot{r}}$) infolge der Längs-, Quer-, und Gierbewegung in unterschiedlichen Wassertiefen dargestellt.

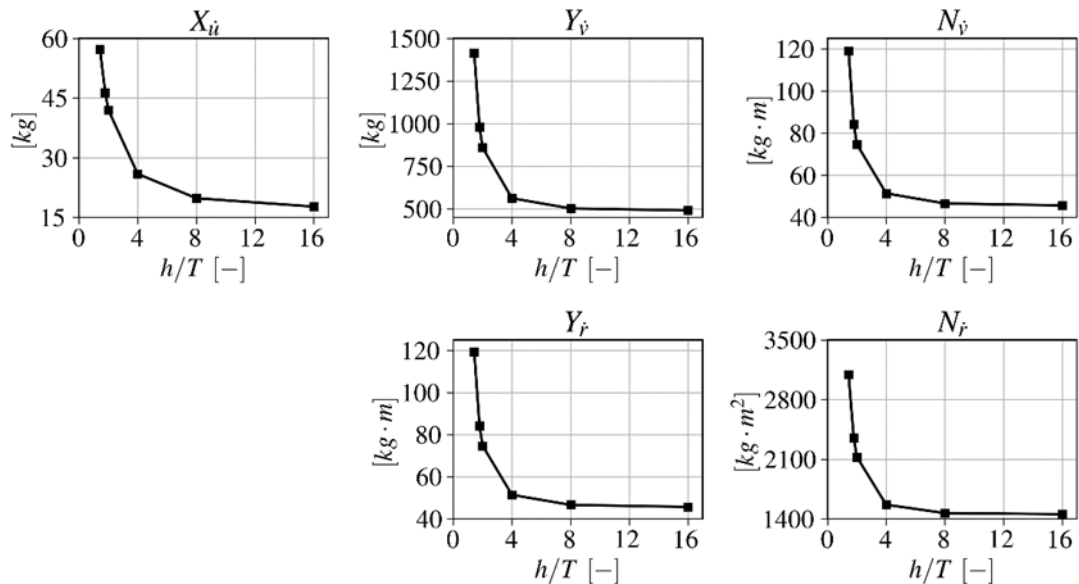


Abbildung 109 Zusatzmassen und Zusatzträgheitsmomente

Das Manövrieren im Flachwasser kann mit dem erweiterten Manövriermodell simuliert werden. Für die Anwendung sind die entsprechenden hydrodynamischen Koeffizienten für jede Wassertiefe zu ermitteln. Tabelle 15 führt die hydrodynamischen Koeffizienten des erweiterten Manövriermodells für fünf Wassertiefen auf.

Tabelle 15: Hydrodynamische Koeffizienten [$\times 10^{-5}$] für das Testschiff für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Wassertiefe und Tiefgang (h/T)

h/T	1,43	1,79	2,00	4,00	8,00
X'_0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X'_u	-35,50	-28,70	-26,10	-16,10	-12,30
X'_v	-174,90	-170,50	-161,60	-150,20	-152,30
X'_{uu}	96,10	89,30	90,40	93,20	93,40
X'_{vv}	-450,30	-332,90	-274,30	-275,70	-222,90
X'_{vvvv}	14108,40	5595,50	2264,70	2697,30	2422,50
X'_{rr}	-32,20	-15,30	-9,80	-6,30	-3,80
X'_{vr}	1593,90	778,50	591,70	243,20	177,90
X'_{vvrr}	7917,10	1024,20	135,10	-416,50	-713,00
$X'_{\delta\delta}$	-105,70	-96,80	-101,00	-103,30	-102,60
$X'_{u\delta\delta}$	377,50	296,70	276,60	254,40	252,90
Y'_0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y'_v	-875,80	-607,10	-532,80	-348,70	-311,70
Y'_r	-10,80	-7,60	-6,80	-4,60	-4,20
Y'_v	-2625,80	-1271,70	-1024,30	-737,70	-805,50
Y'_{vvv}	-43432,50	-21417,80	-16257,30	-4686,60	-2554,90
Y'_r	-56,20	32,20	42,20	43,80	33,50
Y'_{rrr}	1341,10	320,30	192,80	79,50	116,70
Y'_{vrr}	-6745,60	-3502,50	-2469,60	-1256,30	-804,60
Y'_{vvrr}	32524,00	2831,00	1249,30	306,20	132,90
Y'_δ	170,10	148,10	140,80	134,70	131,60
$Y'_{\delta\delta\delta}$	-64,00	-59,30	-45,80	-50,50	-48,60
$Y'_{u\delta}$	-41,10	-57,70	-71,10	-91,00	-100,20
$Y'_{u\delta\delta\delta}$	-698,90	-448,20	-378,40	-270,70	-245,60
N'_0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N'_v	-10,80	-7,60	-6,80	-4,60	-4,20
N'_r	-40,80	-30,90	-28,00	-20,60	-19,30
N'_v	-679,80	-469,30	-425,50	-266,40	-228,30
N'_{vvv}	-7070,70	-1403,00	-423,80	0,00	0,00
N'_r	-129,20	-97,70	-91,00	-80,00	-84,20
N'_{rrr}	-386,50	-154,10	-134,60	-49,20	-39,70
N'_{vrr}	262,70	16,60	23,10	216,30	138,30
N'_{vvrr}	-9318,80	-3638,50	-2646,60	-675,40	-455,70
N'_δ	-65,60	-64,50	-61,90	-62,30	-62,30
$N'_{\delta\delta\delta}$	23,70	26,50	21,30	23,50	23,20
$N'_{u\delta}$	31,90	32,90	38,00	46,50	49,30
$N'_{u\delta\delta\delta}$	250,10	185,10	161,50	124,50	118,00

Zur Simulation des Manövrierens bei beliebigen Wassertiefen kommt das wassertiefenabhängige Manövriermodell zum Einsatz. Tabelle 16 führt die Flachwasserkoeffizienten für das Manövriermodell des Testschiffs auf. Abbildung 110 und Abbildung 111 zeigen die Simulation eines 35 °-Drehkreismanövers und 20/10-Zick-Zack-Manövers bei verschiedenen Wassertiefen mit dem Basismodell („model 1“), mit individuellen Koeffizienten für jede Wassertiefe, und dem Flachwassermodell („model 2“), mit einem einzigen Modell für alle Wassertiefen. Das neu entwickelte Flachwasser-Manövriermodell kann die Drehkreis- bzw. Zickzack-Manöver des Schiffes in sehr guter Näherung abbilden.

Tabelle 16: Flachwasserkoeffizienten für das Testschiff Ernst Kramer

$f(h')$	x	a	b	c	α
$f_{Xu}(h')$	$\dot{u}'$	0	0	3,552	1,717
$f_{Xu}(h')$	$\Delta u'$	0,186	1,013	1,423	3,760
$f_{Xv}(h')$	$ v' $	-664,667	0	21,096	3,661
$f_{Xvr}(h')$	$ v' $	-52,017	-18,278	10,088	2,615
$f_{X\delta}(h')$	$\Delta u'$	-0,369	-0,865	-0,264	1,760
$f_{Y\ddot{v}}(h')$	$\ddot{v}'$	0	0	4,933	2,809
$f_{Y\dot{r}}(h')$	$\dot{r}'$	0	0	4,297	2,847
$f_{Yv}(h')$	$ v' $	96,490	24,697	8,843	4,315
$f_{Yr}(h')$	$ r' $	17,440	30,944	7,680	6,785
$f_{Yvr}(h')$	$ v' $	-239,093	218,306	148,738	6,003
$f_{Y\delta}(h')$	$\Delta u'$	-1,107	-2,781	1,178	4,288
$f_{N\ddot{v}}(h')$	$\ddot{v}'$	0	0	4,292	2,846
$f_{N\dot{r}}(h')$	$\dot{r}'$	0	0	2,936	2,724
$f_{Nv}(h')$	$ v' $	47,870	0	6,268	2,966
$f_{Nr}(h')$	$ r' $	1,267	2,962	3,615	4,353
$f_{Nvr}(h')$	$ v' $	0	0	68,509	4,721
$f_{N\delta}(h')$	$\Delta u'$	-1,218	-3,050	0,167	4,720

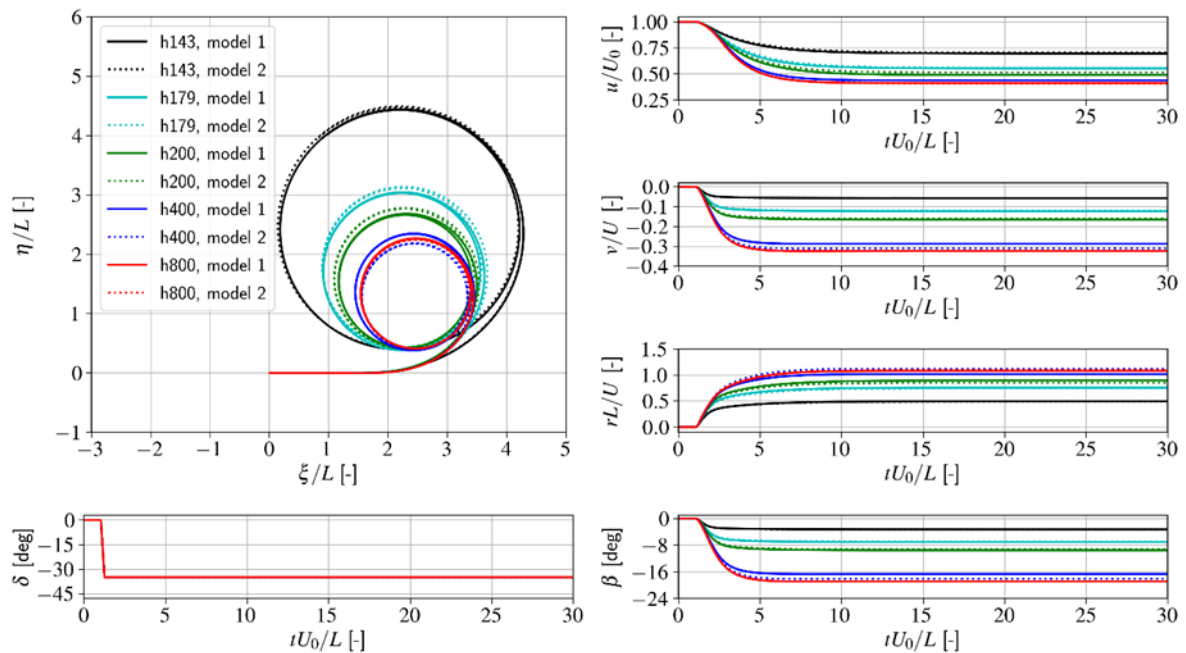


Abbildung 110 Simulation von 35 °-Drehkreismanövern bei verschiedenen Wassertiefen mit dem reinen Abkowitz-Modell („model 1“) und dem Flachwassermodell („model 2“)

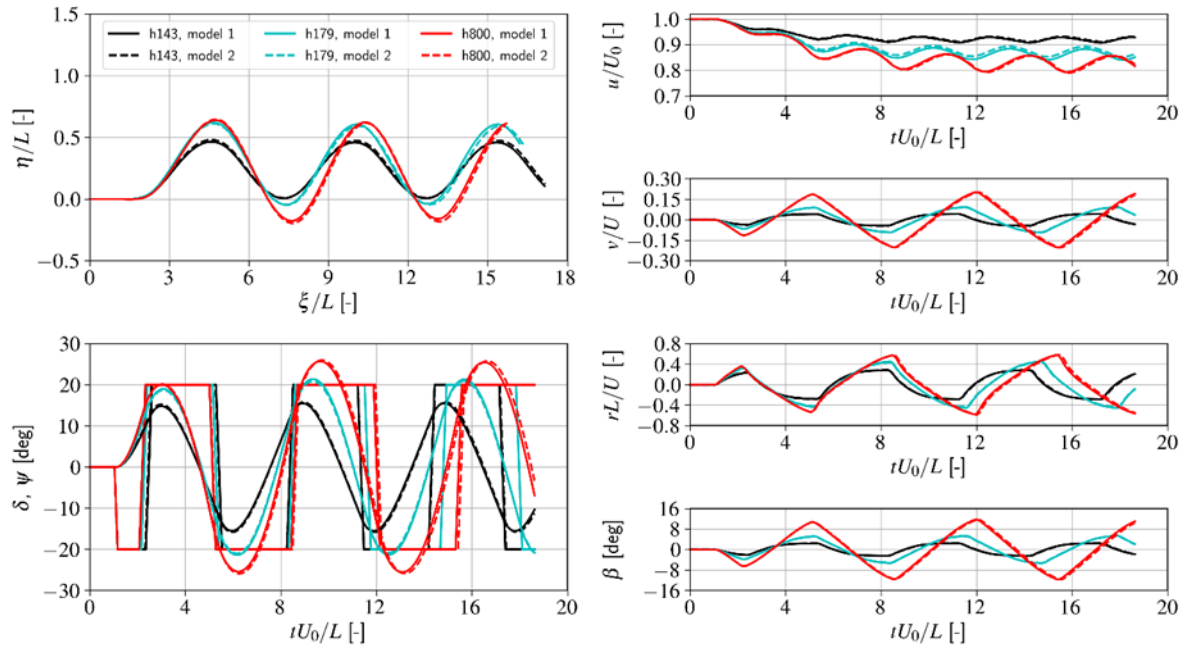


Abbildung 111 Simulation von 20/10 Zick-Zack-Manövern bei verschiedenen Wassertiefen mit dem reinen Abkowitz-Modell („model 1“) und dem Flachwassermodell („model 2“)

15.2.3 Schiff-Schiff-Interaktion beim Überholvorgang im Tief- und Flachwasser

Die Interaktionskräfte und -momente während Überholmanövern werden erheblich durch den seitlichen Abstand zwischen dem eigenen Schiff und dem Zielschiff beeinflusst. Der Einfluss der seitlichen Abstände (normiert mit einem Referenzabstand) lässt sich über Korrekturfaktoren modellieren. Der Referenzabstand wurde auf das 1,5-fache der mittleren Breite der interagierenden Schiffe festgelegt, was nahe genug ist, um die signifikanten Interaktionskräfte und -momente bei geringen seitlichen Abständen zu erfassen, aber weit genug, um Kollisionen der Schiffsmodelle in Experimenten zu vermeiden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Interaktionskräfte und -momente bei kleineren seitlichen Abständen im Allgemeinen ausgeprägtere Spitzen aufweisen und somit mehr harmonische Komponenten im Fourier-basierten Modell erfordern, wird der Korrekturfaktor k_η zur Amplitude der harmonischen Komponenten im Fourier-basierten Modell eingeführt. Der Korrekturfaktor k_η besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil ist das Verhältnis des Referenz-Seitenabstands zum tatsächlichen Seitenabstand, der die Amplitude der harmonischen Komponenten im Fourier-basierten Modell skaliert; der zweite Teil ist die Dämpfung der harmonischen Komponenten bei höherer Ordnung für größere Seitenabstände, die die harmonische Form der Interaktionskräfte und -momente in den Fernfeldbereichen sicherstellt. Der Korrektorexponent κ bestimmt, wie schnell die Interaktionskräfte und -momente bei größeren Seitenabständen abnehmen.

Die auf das Binnenschiff wirkenden Interaktionskräfte und das -moment zeigen unterschiedliche dynamische Verhaltensweisen bei verschiedenen seitlichen Abständen, siehe

Abbildung 112. Bei einem normierten seitlichen Abstand von 1,5 treten mehrere Spitzen und Täler der Interaktionskräfte und des -moments auf, die bei einem großen seitlichen Abstand von 6,0 nicht beobachtet werden. Das Fourier-basierte Modell mit seitlichen Abstandseffekten erfasst dieses unterschiedliche dynamische Verhalten der Interaktionskräfte und des -moments bei verschiedenen seitlichen Abständen genau. Das Fourier-basierte Modell wurde mit fünfzehn harmonischen Komponenten kalibriert, einer Grundfrequenz von $\omega_0 = 2\pi/4$, einem Dämpfungsbereich von $\sigma = 2,0$ und einem Dämpfungsexponenten von $\alpha = 4,0$. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffes wurde auf 0,71 m/s festgelegt,

während das Fremdschiff das eigene Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit überholte. Die harmonischen Koeffizienten a_0 , a_n und b_n wurden beim Referenz-Seitenabstand von 1,5-facher mittlerer Breite der interagierenden Schiffe bestimmt. Der Korrektorexponent κ wurde durch Regression der Interaktionskräfte und -momente bei einem seitlichen Abstand von 6,0-facher mittlerer Breite der interagierenden Schiffe geschätzt. Der Korrekturfaktor k_η wurde dann angewendet, um die Interaktionskräfte und -momente bei anderen seitlichen Abständen zu modellieren.

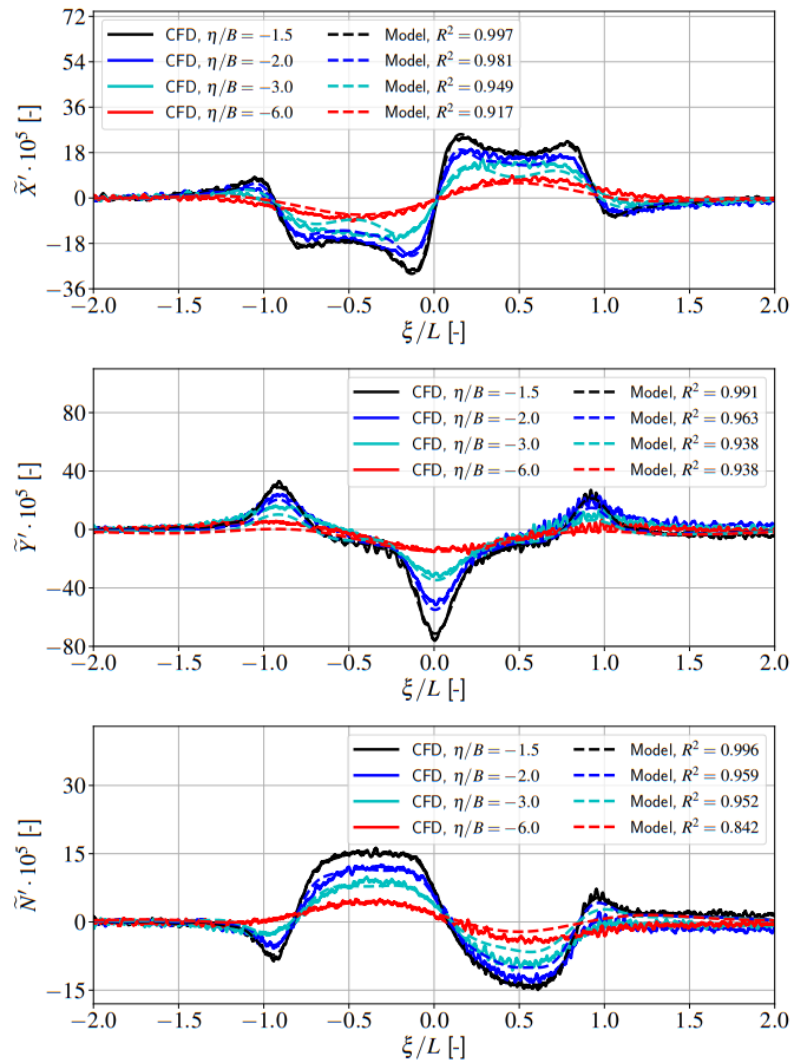


Abbildung 112 Interaktionskräfte und -momente bei verschiedenen seitlichen Abständen. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffs ist auf 0,71 m/s festgelegt. Das Zielschiff überholt das eigene Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit und bei verschiedenen seitlichen Abständen von 1,5, 2,0, 3,0 und 6,0. Das Überholen erfolgt in tiefem Wasser mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von 4,0.

Abbildung 112 zeigt die Modellvorhersagen bei verschiedenen seitlichen Abständen im Vergleich zu hochgenauen CFD-Simulationen. Der Korrektorexponent κ wurde für die Längskräfte, seitlichen Kräfte und Giermomente mit 0,940, 0,973 bzw. 1,038 ermittelt. Das Fourier-basierte Modell mit seitlichen Abstandseffekten sagt das dynamische Verhalten der Interaktionskräfte und -momente bei kleineren seitlichen Abständen von 2,0 und 3,0 genau voraus, mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 größer als 0,93. Bei größeren seitlichen Abständen von 6,0 werden die Interaktionskräfte und -momente weniger genau vorhergesagt, insbesondere bei den Giermomenten, mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,84. Dennoch sind die Modellvorhersagen für praktische Anwendungen weiterhin akzeptabel, da die Interaktionskräfte und das -moment bei größeren seitlichen Abständen im Allgemeinen klein sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Fourier-basierte Modell mit seitlichen Abstandseffekten das dynamische Verhalten der Interaktionskräfte und des -moments bei verschiedenen seitlichen Abständen genau erfasst.

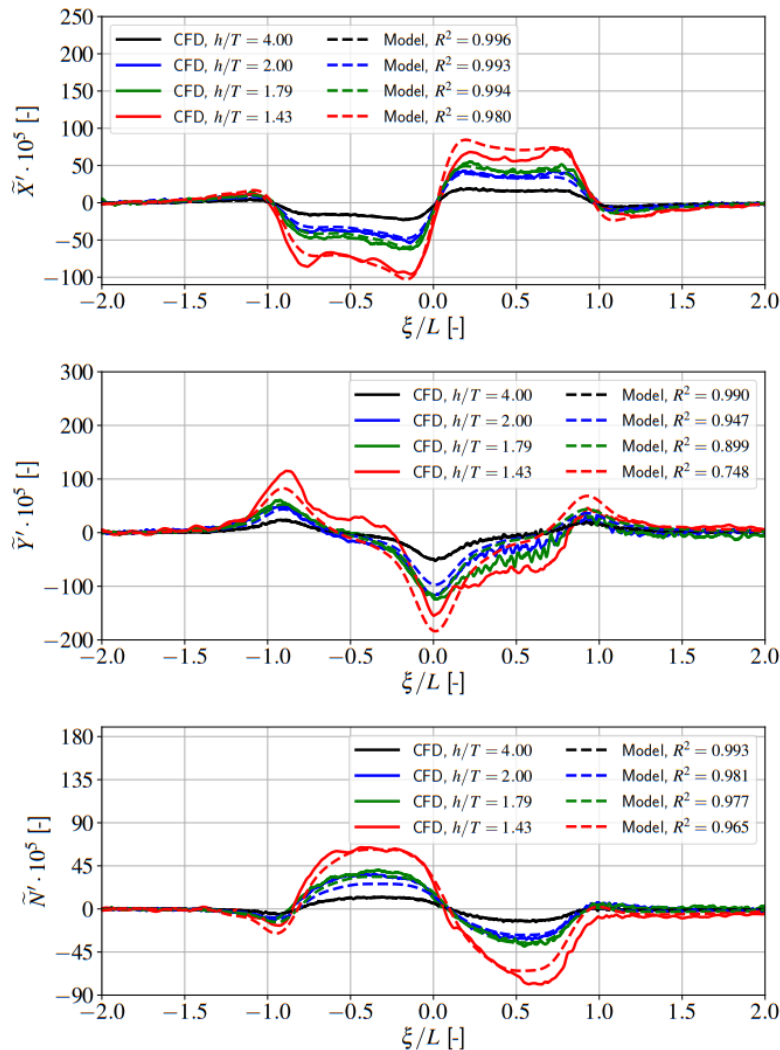


Abbildung 113 Interaktionskräfte und -momente bei verschiedenen Wassertiefen. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffs ist auf 0,71 m/s festgelegt. Das Fremdschiff überholt das eigene Schiff mit 20 % höherer Geschwindigkeit und bei einem normierten seitlichen Abstand von 2,0. Das Überholen erfolgt bei verschiedenen Verhältnissen von Wassertiefe zu Tiefgang von 1,43, 1,79, 2,00 und 4,00.

Im Gegensatz zu den Effekten des seitlichen Abstands beeinflussen die Flachwassereffekte die Verläufe der dynamischen Interaktionskräfte und des -moments nicht signifikant, sondern verstärken vielmehr die Größenordnungen der Interaktionskräfte und des -moments. Das Fourier-basierte Modell wurde mit fünfzehn harmonischen Komponenten kalibriert, um das komplexe dynamische Verhalten der Interaktionskräfte und -momente mit mehreren Spitzen und Tälern zu erfassen. Die Flachwasserkorrekturkoeffizienten k_1 und k_2 wurden durch Regression der Interaktionskräfte und -momente in Flachwasser bei verschiedenen Verhältnissen von Wassertiefe zu Tiefgang von 1,79, 2,00 und 4,00 geschätzt. Anschließend wurde das Fourier-basierte Modell mit Flachwassereffekten angewendet, um die Interaktionskräfte und -momente bei unterschiedlichen Wassertiefen zu modellieren. Die Korrekturkoeffizienten k_1 und k_2 wurden mit 11,676 und -3,252 für die Längskräfte, 7,788 und -2,831 für die Seitenkräfte sowie 15,478 und -3,575 für die Giermomente ermittelt. Insgesamt haben die Modellvorhersagen für die Längskräfte und das Giermoment bei allen Wassertiefen ein Bestimmtheitsmaß R^2 von über 0,96. Für

die Seitenkräfte haben die Modellvorhersagen bei einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von 1,43 ein Bestimmtheitsmaß von 0,75. Allerdings sind die Interaktionskräfte und -momente des Schiffes stark von der Wassertiefe abhängig, insbesondere in flachen Gewässern mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von weniger als 1,5. Selbst die CFD-Simulationen weisen in solch flachen Gewässern große Unsicherheiten auf, die weiter durch experimentelle Daten validiert werden sollten. Zusammenfassend erfasst das Fourier-basierte Modell mit Flachwassereffekten effektiv das dynamische Verhalten der Interaktionskräfte und -momente bei unterschiedlichen Wassertiefen. Allerdings wäre für das Modell eine weitere Validierung durch experimentelle Daten sinnvoll, insbesondere in sehr flachen Gewässern mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu Tiefgang von weniger als 1,5.

15.2.4 Indirekte Systemidentifikation

Bei der indirekten Systemidentifikation werden die Bewegungen und Ruder- sowie Maschineneinstellungen freifahrender Schiffe in der Großausführung oder im Modellmaßstab verwendet, um die hydrodynamischen Koeffizienten des Manövriermodells zu ermitteln. Das Ablaufschema der indirekten Systemidentifikation ist in Abbildung 114 dargestellt. Im Zuge der indirekten Systemidentifikation sind zunächst Testmanöver festzulegen, die eine Variation sämtlicher Bewegungsgrößen, der Ruderlage und der Maschineneinstellungen beinhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Durchführung der Versuche Störgrößen (z. B. Wind oder Strömung) Einfluss auf die Messungen haben können. Während der Versuche werden Zeitreihen der Schiffsposition, -geschwindigkeit und -beschleunigung, des Ruderwinkels und der Drehzahl des Propellers aufgezeichnet. Die anschließende Auswertung der Daten und Identifikation der hydrodynamischen Koeffizienten erfolgt danach für alle erfassten Messreihen.

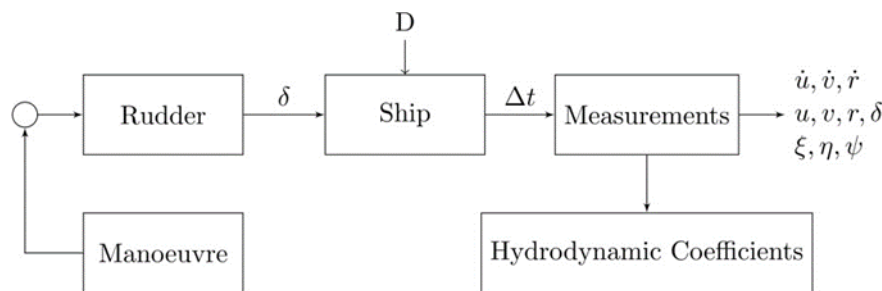


Abbildung 114 Ablaufschema der indirekten Systemidentifikation

Im Rahmen des Projekts wurde ein datenbasierter Ansatz für die indirekte Systemidentifikation entwickelt. Die Bewegungsgleichungen des Schiffes werden nach Freiheitsgraden entkoppelt betrachtet.

$$m\dot{u} - m(vr + x_G r^2) = X(\dot{u}, u, v, r, \delta) \quad (45)$$

$$m\dot{v} + mx_G \dot{r} + mur = Y(\dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta) \quad (46)$$

$$mx_G \dot{v} + I_{zz} \dot{r} + mx_G ur = N(\dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta) \quad (47)$$

Dabei stehen X , Y und N für die auf das Schiff wirkende Kraft in Längs- und Querrichtung sowie für das Giermoment. m steht für die Schiffsmasse, x_G für die Längslage des Gewichtsschwerpunkts, u , v und r für die Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit, I_{zz} für das Massenträgheitsmoment um die Vertikalachse und δ für den Ruderwinkel. Punkte über den Symbolen kennzeichnen Ableitungen der beschriebenen Größen nach der Zeit. Die Kräfte und das Moment können nun durch die hydrodynamischen Koeffizienten näherungsweise ermittelt werden. Für die Längskraft ist dies beispielsweise:

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr + X_{\delta\delta}\delta^2 \quad (48)$$

Unter der Annahme, dass aus den Messungen die Bewegungsgrößen und Ruderinformationen vorliegen, kann die Bewegungsgleichung für die Längsbewegung in Matrixschreibweise aufgestellt werden:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & \Delta u & \Delta u^2 & v^2 & r^2 & vr & \delta^2 \\ | & | & | & | & | & | & | \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ | & | & | & | & | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} \\ X_u \\ X_{uu} \\ X_{vv} \\ X_{rr} \\ X_{vr} \\ X_{\delta\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) \\ | \\ \vdots \\ | \end{bmatrix} \quad (49)$$

Zusammengefasst ergibt sich das Gleichungssystem:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (50)$$

In dem Gleichungssystem wird $\mathbf{A}$ als Geschwindigkeitsmatrix für die Längsrichtung, $\mathbf{x}$ als Vektor der hydrodynamischen Koeffizienten in Längsrichtung und $\mathbf{b}$ als Vektor der bekannten Kräfte in Längsrichtung bezeichnet. Die Gleichungssysteme für die Quer- und Gierbewegung lassen sich in ähnlicher Weise aufstellen. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt hier nach dem Verfahren der Singulärwertzerlegung. Die genannte Vorgehensweise kann unter Nutzung entsprechender Messdaten aus Propulsionsversuchen zur Ermittlung der hydrodynamischen Zusatzmasse des Schiffes verwendet werden.

Zwei Typen von Daten werden benötigt, um die Systemidentifikation durchzuführen (siehe Tabelle 17). Der erste Typ beinhaltet eine Zeitreihe, bestehend aus der Position des Schiffes, der Geschwindigkeit, der Beschleunigung und dem Ruderwinkel. Der zweite Datentyp beinhaltet schiffsbezogene Parameter, wie zum Beispiel die Masse und die Trägheitsmomente.

Tabelle 17: Benötigte Daten für die indirekte Systemidentifikation

Beschreibung	Symbol	Einheit
Zeit	t	s
Position des Schiffes	ξ, η	m
Orientierung des Schiffes	ψ	°
Geschwindigkeit des Schiffes	u, v	ms^{-1}
Gierrate des Schiffes	r	$^{\circ}s^{-1}$
Beschleunigung des Schiffskörpers	$\dot{u}, \dot{v}$	ms^{-2}
Gierbeschleunigung des Schiffskörpers	$\dot{r}$	$^{\circ}s^{-2}$
Ruderwinkel	δ	°
Bezugsvorwärtsgeschwindigkeit	U_0	ms^{-1}
Masse des Schiffes	m	kg
Massenschwerpunkt (x-Richtung)	x_G	m
Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zz}	kgm^2

Es wurde eine Python-Klasse mit den erforderlichen Methoden zur Durchführung der indirekten Systemidentifikation entwickelt. Die Validierung wurde mit dem Tanker KVLCC2 durchgeführt. Für dieses Schiff sind die hydrodynamischen Koeffizienten verfügbar und in Tabelle 18 dargestellt. Die Schritte für die Validierung waren:

1. Simulation eines 35 °/35 ° Zick-Zack-Manövers.
2. Erstellung der Eingangsdaten für die Systemidentifikation aus dem Zick-Zack-Manöver.

3. Durchführung der indirekten Systemidentifikation.
4. Vergleich der hydrodynamischen Koeffizienten, die durch die Systemidentifikation berechnet wurden, mit den bereits bekannten hydrodynamischen Koeffizienten.

Simulation eines Drehkreismanövers mit den vorhergesagten hydrodynamischen Koeffizienten.

Tabelle 18: Hydrodynamische Koeffizienten des KVLCC2. Alle Koeffizienten sind dimensionslos und wurden mit 10^3 multipliziert werden.

X0	0,0	Y0	-0,150	N0	0,0661
Xup	-0,0011	Yvp	-20,140	Nvp	-3,0473
Xu	-1,970	Yrp	-1,734	Nrp	-0,5316
Xuu	0,990	Yv	-24,900	Nv	-8,800
Xvv	-5,000	Yvvv	-30,200	Nvvv	8,000
Xrr	0,480	Yr	4,758	Nr	-3,250
Xvr	7,540	Yrrr	-1,224	Nrrr	-0,920
Xdd	-1,820	Yvrr	-40,300	Nvrr	7,0
		Yrvv	-9,900	Nrvv	-7,1
		Yd	-3,768	Nd	1,788
		Yddd	3,326	Nddd	-1,6227
		Ydu	4,562	Ndu	-2,3209

Ein $35^\circ/35^\circ$ Zick-Zack-Manöver wurde mit den hydrodynamischen Koeffizienten aus Tabelle 18 durchgeführt. Der Bahnverlauf des Tankers ist in Abbildung 115 dargestellt. Zusätzlich wurden der Ruderwinkel, die Orientierung des Tankers und die Geschwindigkeit berechnet.

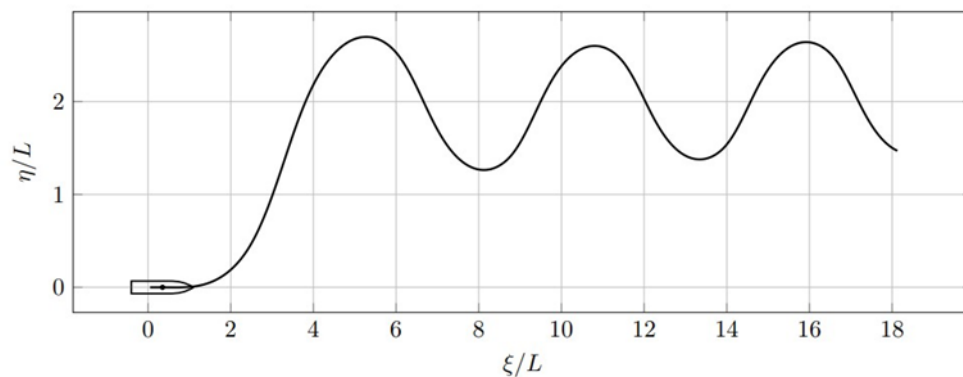


Abbildung 115 Bahnverlauf des KVLCC2 während eines $35^\circ/35^\circ$ Zick-Zack-Manövers

Die aus dem Zick-Zack-Manöver berechnete Zeitreihe wurde anschließend als Eingangsdatensatz für die indirekte Systemidentifikation genutzt. Die Ergebnisse der indirekten Systemidentifikation sind in Tabelle 19 dargestellt. Die Spalte *Input* stellt die ursprünglichen hydrodynamischen Koeffizienten dar. In der Spalte *Linear* werden die Koeffizienten, die mit der linearen Methode der kleinsten Quadrate ermittelt wurden, dargestellt. In den Spalten *Ridge* werden die Koeffizienten, die mit der Ridge-Regressionsmethode ermittelt wurden, dargestellt. *Ridge v1* ist die erste Version des Programms. *Ridge v2* ist die zweite Version, bei der Stabilität und Genauigkeit gegenüber der ersten Version verbessert wurden. Abbildung 116 zeigt die Bahn eines simulierten Drehkreismanövers unter Verwendung der in Tabelle 19 dargestellten hydrodynamischen Koeffizienten. Die mit dem Code *Ridge v2* erreichte Genauigkeit ist gut.

Tabelle 19: Hydrodynamische Koeffizienten des KVLCC2, die durch die indirekte Systemidentifikation berechnet wurden. Koeffizienten aus der Literatur (Spalte Input), Lineare Korrelation zu linearer Regression (Spalte Linear) und Ridge-to-Ridge-Regression (Spalte Ridge v1: Version 1, Spalte Ridge v2: Version 2). Koeffizienten multipliziert mit 10^3

	Input	Linear	Ridge v1	Ridge v2
Xu	-1,97	-2,00	-2,00	-2,0014460
Xuu	0,99	1,02	1,02	1,0209478
Xvv	-5,00	-5,53	-5,35	-5,3589868
Xrr	0,48	0,54	0,56	0,5552195
Xvr	7,54	7,71	7,80	7,7949034
Xdd	-1,82	-1,84	-1,83	-1,8317697
Y0	-0,15	-0,15	0,00	-0,1506251
Yv	-24,90	-25,44	-25,43	-25,4532931
Yr	4,76	4,94	4,94	4,9280216
Yd	-3,77	-3,82	-3,82	-3,8140560
Yvvv	-30,20	-30,92	-31,09	-30,2090902
Yrrr	-1,22	-1,14	-1,15	-1,0977272
Yvvr	-9,90	-9,55	-9,75	-8,8630247
Yvrr	-40,30	-40,04	-40,13	-39,7936877
Yddd	3,33	3,46	3,46	3,4623491
Ydu	4,56	4,58	4,58	4,5837832
N0	0,07	0,07	0,00	0,0673730
Nv	-8,80	-8,86	-8,86	-8,8553013
Nr	-3,25	-3,27	-3,27	-3,2657820
Nd	1,79	1,85	1,85	1,8475217
Nvvv	8,00	8,67	8,77	8,6691336
Nrrr	-0,92	-0,93	-0,92	-0,9321339
Nvvr	-7,10	-6,61	-6,51	-6,6082025
Nvrr	7,00	7,27	7,31	7,2665477
Nddd	-1,62	-1,72	-1,73	-1,7239015
Ndu	-2,32	-2,36	-2,36	-2,3619804

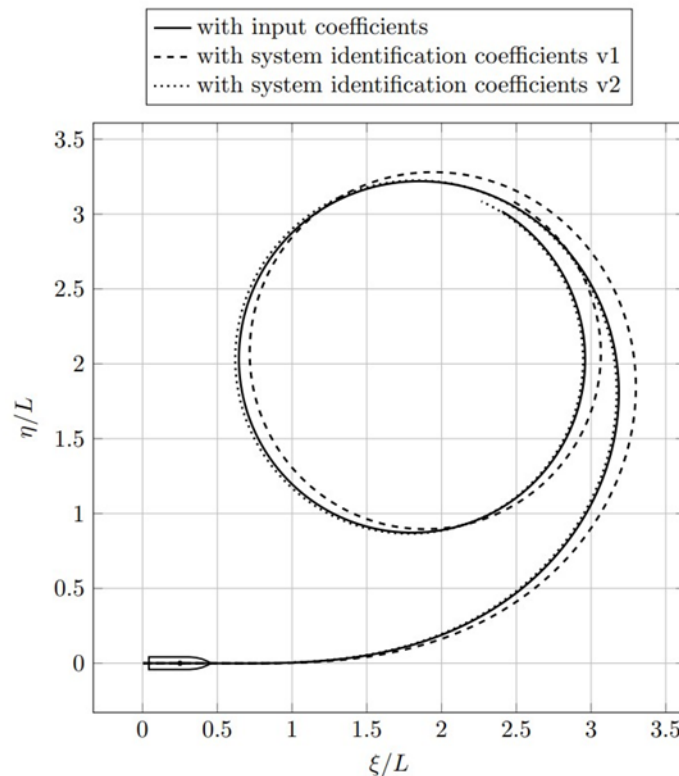


Abbildung 116 KVLCC2. Drehkreismanöver $\delta = 35^\circ$ nach Backbord

15.3 Echtzeitfähige Trajektorienprädiktion

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

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

15.4 Digitaler Zwilling

Die entwickelten und im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Modellgleichungen für die Schiffsdynamik sind für die Erprobung von einzelnen Teilsystemen in eine virtuelle Testumgebung implementiert worden. Dieser virtuelle Zwilling der Ernst-Kramer wurde in einer Simulationsumgebung in der Unity Spiele-Engine eingebettet. Diese Simulationsumgebung bildet das Testgebiet auf dem Dortmund-Ems-Kanal (Hafen Dortmund bis Schleuse Waltrop) ab. Die Verwendung der Unity-Engine hat hierbei den Vorteil, dass zwischen der Live-Video-Anzeige des realen Schiffes, welche ebenfalls in der Unity-Engine implementiert ist (vgl. Kapitel 12.2.3), und der Simulationsumgebung umgeschaltet werden kann.

Die Simulationsumgebung mit dem digitalen Zwilling ist in Abbildung 117 dargestellt. Das Schiff in dieser Simulationsumgebung kann sowohl über virtuelle Bedienelemente gesteuert werden, z.B. digitale Schieberegler für den Schub, als auch über die physischen Hebel an den Fernsteuerständen. Gerade letztere Option wurde für die Funktionstests der Fernsteuerstand-Software genutzt.

Weiterhin besteht in der Simulationsumgebung die Möglichkeit, dem digitalen Zwilling vereinfachte Sensoren hinzuzufügen, etwa GPS, Beschleunigungssensoren oder bildgebende Sensorik wie Kameras oder Radar. Somit kann gleichzeitig auch die Anzeige dieser Sensorwerte in der graphischen Benutzeroberfläche der Fernsteuerstände getestet werden.

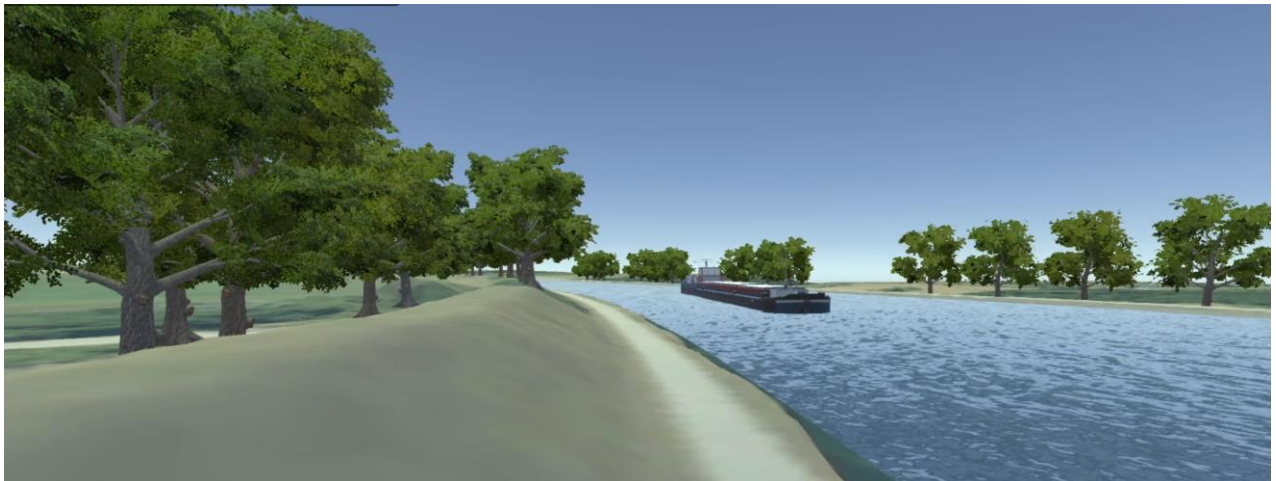


Abbildung 117 Digitaler Zwilling in virtueller Testumgebung

16 Analysen zum Fahrverhalten (Fremdschiffe)

Aufgrund der eingeschränkten Platzverfügbarkeit in der Binnenschifffahrt ist eine Einschätzung des zukünftigen Verhaltens anderer Schiffe essenziell, um rechtzeitig Manöver zur Kollisionsvermeidung einleiten zu können.

16.1 Bereitstellung und Auswertung der AIS-Daten

16.1.1 Entwicklung und Konfiguration der AIS-Logger

Im Rahmen des Projekts wurden von der Universität Duisburg-Essen (UDE) eigene AIS-Logger entwickelt und auf dem Rhein in der näheren Umgebung von Duisburg eingesetzt. Das Ziel bei der Entwicklung der Logger bestand in der gleichzeitigen Bereitstellung von Echtzeit-AIS-Daten für die Leitstelle, deren sicherer Übertragung sowie der Akquise und anonymisierten Bereitstellung von nahzeitlichen AIS-Daten für die Entwicklungen des Projekts. Insgesamt standen sechs AIS-Logger zur Verfügung. Diese wurden durch weitere Logger des Projektpartners DST und des Ingenieurbüros Kauppert

ergänzt. Die Logger des DST sind ebenfalls mit dem von der UDE entwickelten System zur Datenerfassung und Übertragung ausgerüstet. Das System zeichnet sich dadurch aus, dass die erfassten AIS-Daten bei bestehender Mobilfunkverbindung unmittelbar nach dem Empfang über einen sicheren Kommunikationskanal an eine zentrale Datenbank übertragen werden. Aus dieser temporären Rohdatenbank können die Daten wahlweise für die Echtzeit-Anzeige im Leitstand abgerufen oder anonymisiert, geprüft und bereinigt in eine Speicherdatenbank überführt werden.

Die Daten werden erst nach einer Prüfung durch den serverseitigen Prozess in der Datenbank abgespeichert. Dabei werden die AIS-Daten mit bereits empfangenen Daten verglichen, damit keine Dopplungen in der Datenbank gespeichert werden. Außerdem werden die AIS-Daten um wasserstraßenorientierte Positionsinformationen erweitert. Hierfür werden die GPS- Koordinaten aus den AIS-Daten genutzt und mit Kartendaten aus dem ELWIS-Portal verrechnet. Dadurch entstanden drei zusätzliche Spalten, welche die Fluss-ID, den Flusskilometer und den Abstand zur Flussachse umfassen. Zusätzlich werden alle 15 Minuten die Pegelstände der einzelnen Messstationen an den Gewässern im Projektbereich aus dem ELWIS-Portal abgerufen und in der Datenbank gespeichert. Diese Daten können dann über SQL-Abfragen direkt in die Abrufe der AIS-Daten integriert werden.

Für die Verarbeitung durch Projektpartner ist ein Server beim DST eingerichtet worden, der die aufgenommenen Daten in Echtzeit empfängt und in einer Datenbank speichert. Als Datenbank wird eine MariaDB-Instanz verwendet. Eine Datenbank dieses Typs wird für Geofencing-Auswertungen des DST benötigt. Eine schematische Darstellung der entwickelten AIS-Logger ist in Abbildung 118 dargestellt. Die Abdeckung mit den AIS-Loggern ist in Abbildung 119 inklusive einer Markierung der Standorte dargestellt.

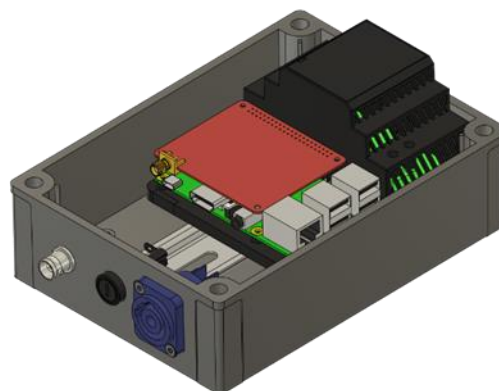


Abbildung 118 Schematische Darstellung eines AIS-Loggers

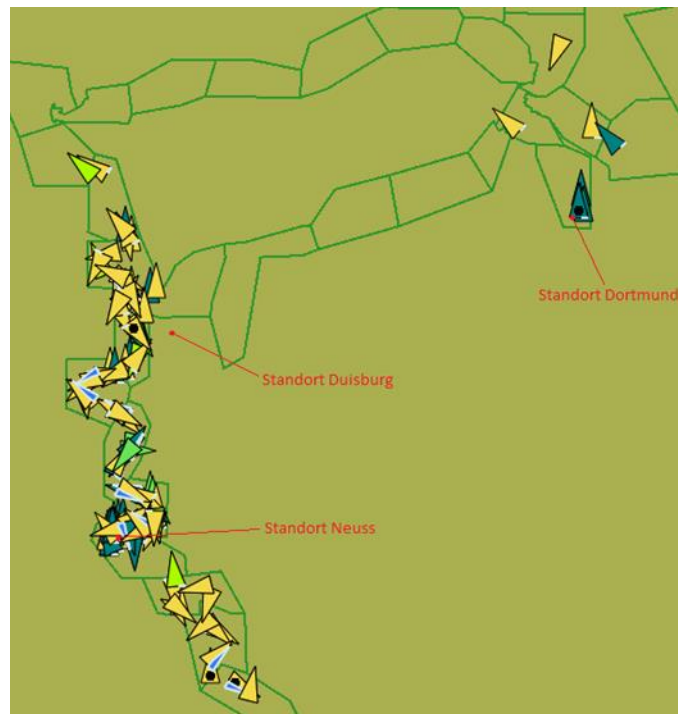


Abbildung 119 Abdeckung des Rheins mit AIS-Loggern

16.1.2 Auswertung von AIS-Daten

Zunächst wurden Methoden entwickelt, um typisches Fahrverhalten von Binnenschiffen statistisch aus AIS-Daten zu ermitteln. Des Weiteren wurde ein auf künstlichen neuronalen Netzen basierendes Modell entwickelt, welches in der Lage ist, Trajektorien eines Schiffes zu prognostizieren, wobei der räumliche Kontext sowie die Fremdschiffe des betrachteten Schiffes berücksichtigt werden. Eine Visualisierung möglicher zukünftiger Trajektorien in der in AP 9500 entwickelten Anzeigenschnittstelle soll schließlich als Unterstützung der Fernsteuerung dienen.

16.1.2.1 Ansatz I: Bewegungs-/Verhaltensmodell

Für die Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer wird ein **Bewegungs- / Verhaltensmodell** benötigt. Dieses Modell wird auf Basis historischer Trajektorien trainiert. In der finalen Version werden die benötigten Trajektorien über AIS-Daten vorab ermittelt. Im aktuellen Vorhaben werden hierfür alternativ Daten der BAW aus einem anderen Projekt verwendet. Als weiteres (lokales) Modell wird eine Proportionalssystem in der Form mit y als Ausgang und u als Eingang angenommen und mit Messdaten parametrisiert. Zur Bestimmung der Parameter werden vergangene Zeitschritte herangezogen. Durch die kontinuierliche Anpassung der Parameter kann die Schiffsdynamik lokal approximiert und zukünftiges Verhalten geschätzt werden. Das lokale Modell wird kontinuierlich aktualisiert. Der Ansatz wurde anhand realer AIS-Daten in verschiedene Szenarien getestet.

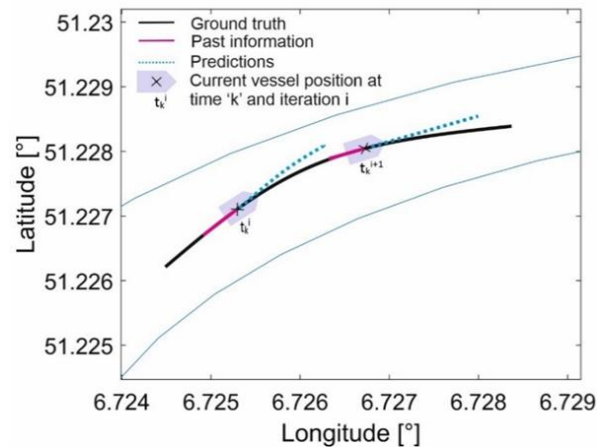


Abbildung 120 Beispiel der Verhaltensvorhersage basierend auf einem lokal gültigen Bewegungsmodell

16.1.2.2 Ansatz II: Clustering

Clustering basierend auf Übergangswahrscheinlichkeiten: Es wird angenommen, dass das Verhalten des Kapitäns von der Geometrie des Flusses, der Wassertiefe, der Fließgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung des Schiffes abhängig ist. Um die Abhängigkeit der Parameter vom Verhalten der Kapitäne zu bestimmen, wird das Fahrwasser in verschiedene Abschnitte entsprechend der Hektometersteinkartierung an den beiden Enden unterteilt (siehe Abbildung 121a). Die unterschiedliche Anzahl der Transitionen wird aus den historischen Daten der Trajektorien berechnet (Abbildung 121 b). Die Wahrscheinlichkeit der Übergänge wird für jede Transition berechnet. Für das betrachtete Schiff wird die Transition berechnet und mit den historischen Transitionen verglichen. Die Trajektorien, die den wahrscheinlichsten entsprechen, werden als beste Trajektorie definiert.

Mit Hilfe des Transitions-wahrscheinlichkeitenansatzes wird die wahrscheinlichste Trajektorie für das betrachtete Schiff ermittelt. Da es wahrscheinlich ist, dass die Vorhersagen mit Hilfe des Transitions-wahrscheinlichkeitenalgorithmus aufgrund lokaler Effekte (Wind, Strömung, etc.) mit Fehlern behaftet sind, wurde zur Fehlerreduktion ein erweiterter, neuer Ansatz entwickelt. Dabei wurde ein zusätzliches Modell zur Berücksichtigung der Schiffs-dynamik implementiert. Die Vorhersage des Bewegungsverhaltens auf Basis des Transitions-wahrscheinlichkeitenansatzes wird mittels der lokalen Schiffs-dynamik korrigiert. Die Längen- und Breitenfehler sind in Abbildung 121 dargestellt.

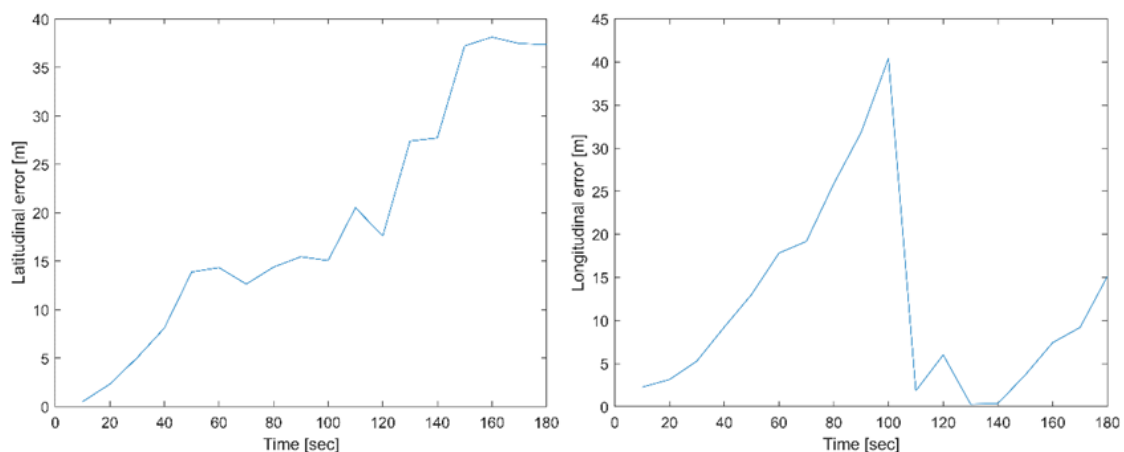


Abbildung 121 Längen-(links) und Breiten-(rechts) Fehler (links) und longitudinale (rechts) Fehler für Kombinationen aus Modell plus Transitions-wahrscheinlichkeiten

16.1.2.3 Ansatz III: Rekursiver Schätzalgorithmus zur Vorhersage des Trajektorienverlaufs von Schiffen

Mittels der Clusterverfahren werden aus den AIS-Daten repräsentative Trajektorien generiert, die dann zur Vorhersage der Bewegung von Schiffen verwendet werden können. Hierzu muss ein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des betrachteten Schiffes und den repräsentativen n Trajektorien hergestellt werden. Es wird angenommen, dass zunächst Wissen in Form von Vorabwahrscheinlichkeiten genutzt und entsprechend bestimmt wird (Abbildung 122).

Vorabwahrscheinlichkeiten werden durch zwei Methoden bestimmt: i) auf Distanzmaßen basierend sowie ii) auf der Verteilung von Trajektorien in verschiedenen Abschnitten zwischen Hektometersteinen basierenden Clustern. Beide Methoden werden auf Daten verschiedener Schiffe getestet und verglichen. Hierbei wird für die Vorgehensweise i eine Gleichverteilung angenommen, wobei hier m Cluster der n Trajektorien erzeugt werden. Bei der zweiten Vorgehensweise werden die Anwesenheitswahrscheinlichkeiten zu jedem Hektometerstein berechnet. Hierzu wird die Fahrrinne linear zwischen 0 (linker Hektometerstein) und 1 (rechter Hektometerstein) skaliert.

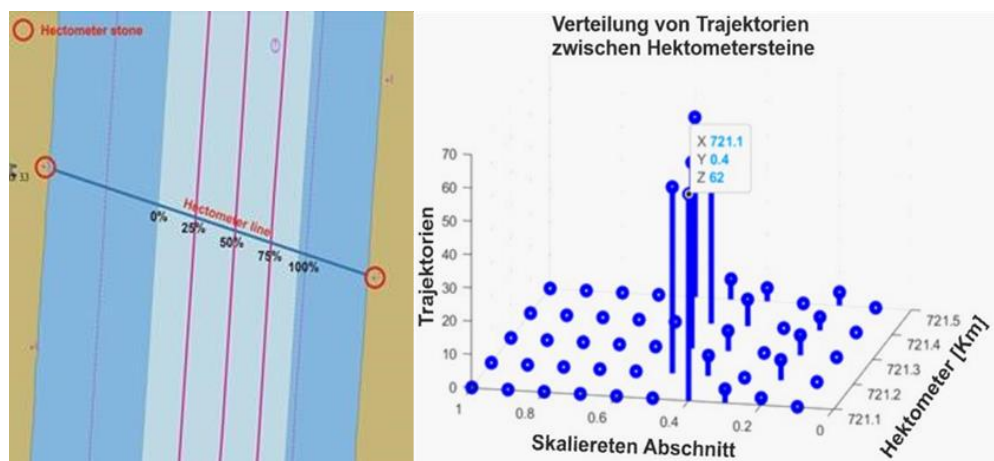


Abbildung 122 a) Unterteilung der Fahrrinne in mehrere Abschnitte zwischen den Hektometersteinen (rote Kreise) (oben), b) Verteilung der Trajektorien über verschiedene Regionen

Die Bayessche Rekursion wird angewandt, um die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Der Entwurf eines rekursiven Schätzalgorithmus zur Vorhersage des Trajektorienverlaufs von Schiffen wurde im letzten Bericht erläutert.

Mit Hilfe des Bayes-Ansatzes wird die wahrscheinlichste Trajektorie für das betrachtete Schiff bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass das zukünftige Verhalten des Schiffes der bestimmten Trajektorie folgen wird. Unter der Annahme, dass aufgrund lokaler Effekte die Vorhersagen mit Hilfe des Bayes-Algorithmus mit Fehlern behaftet sind, wird zur Fehlerreduktion ein geeigneter, neuer Ansatz entwickelt. Hierzu wird ein Modell zur Berücksichtigung der Schiffsdynamik bestimmt, um die Trajektorie anhand der zukünftigen Zustände aus dem Bayes-Algorithmus vorherzusagen. Dieser Ansatz berücksichtigt das zukünftige Verhalten von Schiffen mit Hilfe des Bayes-Ansatzes korrigiert mit der lokalen Schiffsdynamik. Das experimentell bestimmte lokale Modell passt sich entsprechend den Betriebsbedingungen lokal an.

Der entwickelte, neue Modellansatz basiert auf einem mathematischen Modell zur Beschreibung des Ein- Ausgangesverhaltens. Liegt ein lokal identifizierte/bestimmtes Modell vor, dann kann das kommende Verhalten bzw. die kommende Fahrtrajektorie anhand der letzten Sekunden der gemessenen Positionsvariablen vorhergesagt werden. Die Idee besteht darin, die Modellparameter des Schiffes global und zusätzlich einen Parameter für die lokale Anpassung zu bestimmen. Das lokale Modell wird

dynamisch aktualisiert. Der Ansatz wird anhand realer AIS/GPS-basierter Messungen des deutschen Gütermotorschiffs "Monika Deymann" für verschiedene Szenarien und Fahrbedingungen einschließlich "beladener" und "leerer" Fahrten getestet.

Die Struktur des Modells wird geeignet gewählt mit y als Ausgang und u als Eingang.

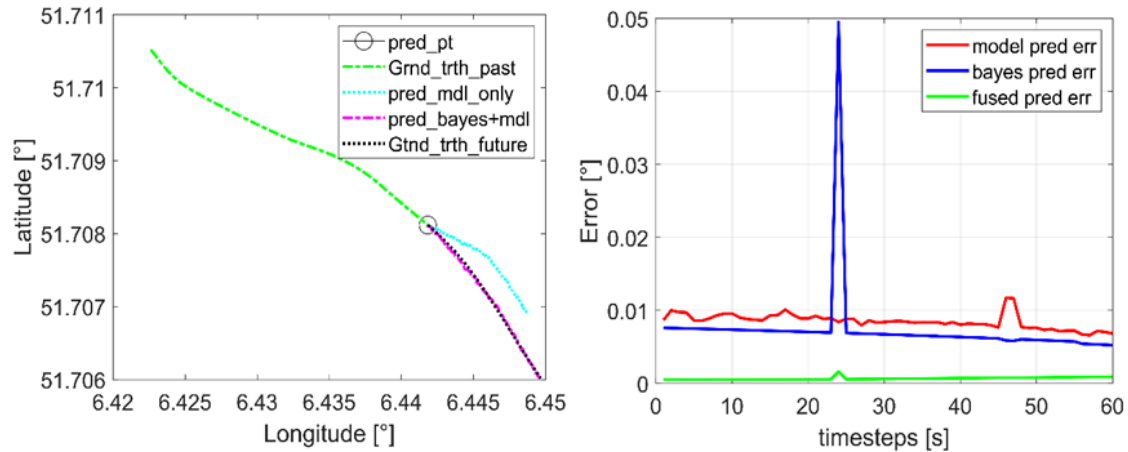


Abbildung 123 Vorhersagen der Modelle und des neuen Ansatzes (Modell + Bayes) (links), b) Fehler der Vorhersage von i) Modell ii) Bayes iii) Fusioniertes (Modell + Bayes) Ansätze

16.1.2.4 Evaluierung, Bestimmung der Verlässlichkeit der Vorgehensweisen, Fusion der Vorgehensweisen

Es wurden Arbeiten zur Fusion der Prognoseverfahren durchgeführt. In AP 8110 wurden zwei Ansätze entwickelt: signalbasierter **Ansatz 1** und datenbasierter **Ansatz 2**. Der Vorhersagehorizont beträgt bei beiden Ansätzen 180 Sekunden. Der Fusionsansatz wird unter Verwendung der „Probability of detection“ entwickelt. Der POD-Ansatz definiert das Intervall, bis zu dem die Vorhersage mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 90 % und einer Zuverlässigkeit von 95 % zuverlässig ist. Die Vorhersagen der beiden Ansätze sind in der Abbildung 124 dargestellt. Die Vorhersagen beider Ansätze werden mit einer linearen Pooling-Funktion fusioniert und ist in Abbildung 124 oben in Schwarzer Farbe dargestellt. Die Zuverlässigkeit der fusionierten Vorhersagen wird berechnet und ist in der Abbildung 124 unten dargestellt. Das zuverlässige Intervall wird immer als $180 - t_{90/95}$ berechnet.

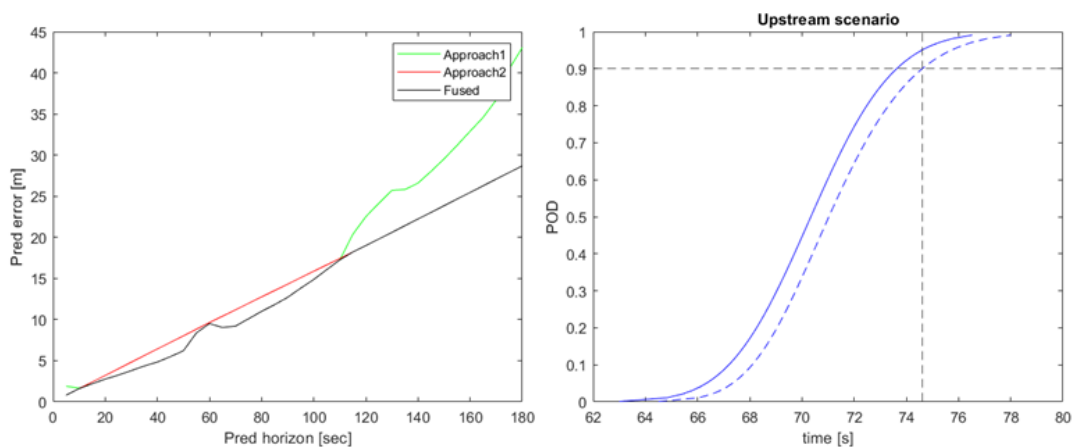


Abbildung 124 links: Vorhersagegenauigkeit der Modelle; recht: POD-Ergebnis für Ansatz 1

	Zuverlässigkeit 180-t _{90/95}
Ansatz 1	105.92 s
Ansatz 2	118 s
Fusionsansatz	122 s

Durch die Anwendung einer linearen Pooling-Funktion erhöhte die Fusion beider Ansätze die Gesamtzuverlässigkeit, wie im Vergleich in der Tabelle gezeigt wird, wobei der fusionierte Ansatz die höchste Zuverlässigkeit (122 s) im Vergleich zu den einzelnen Ansätzen (105,92 s für Ansatz 1 und 118 s für Ansatz 2) erreichte. Die Fusion verbesserte somit die Zuverlässigkeit der Vorhersagen effektiv. Abschließend lässt sich sagen, dass die Fusion der signalbasierten und datenbasierten Ansätze eine deutliche Verbesserung der Zuverlässigkeit der Prognosen zeigte, was die Effektivität der Kombination beider Methoden zur Erzielung besserer Ergebnisse unterstreicht.

16.2 Fahrdynamische Modellierung

16.2.1 Systemidentifikation anhand von AIS-Daten

Eine genaue Vorhersage der Schiffsbewegungen ist für verschiedene maritime Anwendungen unerlässlich, einschließlich der Kollisionsvermeidung, der Routenoptimierung und der maritimen Überwachung. Anfänglich basierten die Bestrebungen des INAM zur Trajektorienvorhersage auf der Nutzung eines Manövriermodells. Allerdings zeigten sich im Laufe der Entwicklungen erhebliche Herausforderungen bei der effektiven Anwendung des Modells auf Fremdschiffen.

Das Hauptproblem bestand in der Approximation der Koeffizienten für das Manövriermodell. Diese Koeffizienten sind entscheidend für eine genaue Vorhersage der Schiffsbewegungen und erfordern detaillierte Messdaten, die für Fremdschiffe typischerweise nicht verfügbar sind. Primär fehlte der Ruderwinkel, mit dem anhand einiger Schiffsinformationen und der Bahn der Fremdschiffe aus den AIS-Daten mittels indirekter Systemidentifikation die Koeffizienten des Manövriermodells hätten ermittelt werden können. Versuche, den Verlauf des Ruderwinkels über Verfahren des Maschinellen Lernens in einem eigenen Modell abzubilden und für die indirekte Systemidentifikation zu nutzen, beanspruchten erhebliche Zeit, schlugen allerdings letztendlich fehl. Für die fahrdynamische Modellierung von Fremdschiffen wurde seitens des INAM daraufhin folgende Vorgehensweise verfolgt:

- Entwicklung einer vereinfachten Theorie für das Manövrieren in Flüssen
- Verarbeitung von AIS-Datenschätzung der fehlenden Daten
- Systemidentifikation anhand von AIS-Daten
- Vorhersage des Pfades auf der Grundlage von AIS-Daten

Die meisten über AIS übermittelten Daten können nicht direkt verwendet werden. Die Schiffsposition ist bspw. im WGS-84-Standard angegeben, aber die Manöveranalyse verwendet ein lokales Koordinatensystem (O, ξ, η, ζ). Daher muss vor der Analyse eine Transformation der AIS-Daten vorgenommen werden. Abbildung 125 zeigt das Koordinatensystem, welches für die Analyse des Manövrierverhaltens auf Flüssen genutzt wird im Vergleich zum WGS-84-Koordinatensystem.

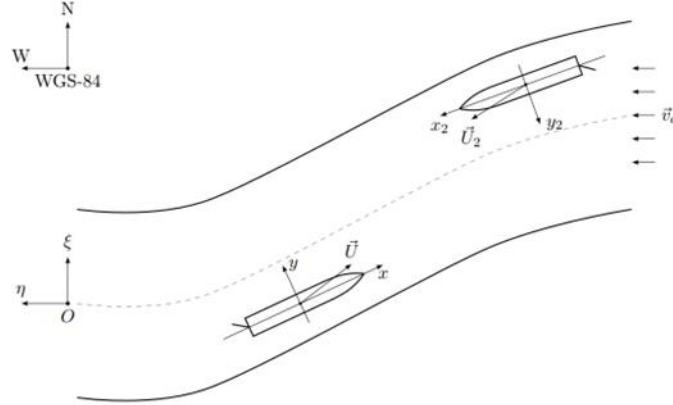


Abbildung 125 Koordinatensystem für die Simulation von Schiffsmanövern auf Flüssen

Im Folgenden wird ein Beispiel für den Transformationsprozess anhand der Schiffsposition erläutert. Für die Ernst Kramer wird die Position mit einem GNSS-Sensor nach dem WGS-84-Standard aufgezeichnet. Der Sensor befindet sich am Bug des Schiffes. Das bedeutet, dass die Position des Schiffsbugs als geografischer Breiten- und Längengrad angegeben wird. Die relevanten Punkte und ihre Abhängigkeiten sind in Abbildung 126 dargestellt.

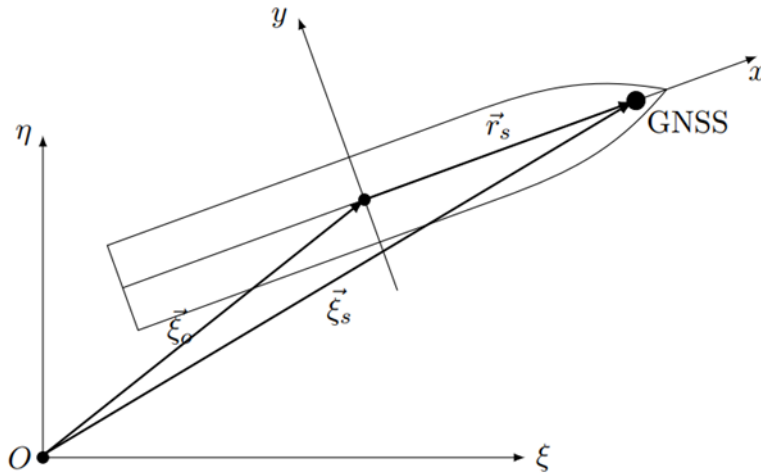


Abbildung 126 Positionsmessung am Bug

Der Referenzpunkt des GNSS-Empfängers befindet sich im schiffsfesten Koordinatensystem an der Position $\vec{r}_s$. Die Position dieses Punktes im Inertial-Koordinatensystem wird mit $\vec{\xi}_s$ bezeichnet. Um die Mittschiffsposition zu erhalten, wird die folgende Transformation durchgeführt:

$$\vec{\xi}_o = \vec{\xi}_s - \mathbf{T}(\psi)\vec{r}_s$$

$$\begin{bmatrix} \xi_o \\ \eta_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_s \\ \eta_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix}$$

Ein Verfahren zur Prognose der Schiffstrajektorien anderer Schiffe (Fremdschiffe) wurde unter Verwendung von AIS-Daten entwickelt. Der Ansatz beruht auf dem entwickelten Manövermodell. Die Herausforderung besteht darin, dass die Manövrierkoeffizienten der Fremdschiffe zunächst unbekannt sind. Daher wird zuerst eine Methode entwickelt, mit der die Manövrierkoeffizienten durch indirekte Systemidentifikation abgeschätzt werden. Da Messdaten für Fremdschiffe in der Regel nicht immer verfügbar sind, werden AIS-Daten genutzt. Die AIS-Daten enthalten Informationen über die

Abmessungen des Schiffes, den Tiefgang und den Schiffstyp und ermöglichen damit eine erste Schätzung einiger Manövrierkoeffizienten. Anschließend wird die prognostizierte Trajektorie eines Fremdschiffes unter Verwendung seiner vorherigen Bahn, den abgeschätzten Koeffizienten und einen ebenfalls prognostizierten Ruderwinkel berechnet.

Die Herausforderung bei den Entwicklungen besteht darin, die erwähnten fehlenden Parameter zu schätzen. Daher wird ein hoher Aufwand für die Entwicklung der Methoden für die Ermittlung der fehlenden Größen, die AIS-Auswertung, die Anpassung der Methoden für die indirekte Systemidentifikation und für die Validierung der Vorhersagen betrieben. Um den Ruderwinkel zu approximieren, wurde ein Neuronales Netzwerk trainiert, welches auf den Großausführungsversuchen mit der Ernst Kramer basiert. Für das Training wurden Daten verwendet, die zwischen April 2022 und September 2023 bei Fahrten auf dem Rhein aufgezeichnet wurden. Abbildung 127 zeigt die Trajektorie des Schiffes Ernst Kramer auf einem Abschnitt des Rheins. Abbildung 127 zeigt die Zeitreihen der Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeiten sowie der Längs-, Quer- und Gierbeschleunigungen des Schiffes.

Abbildung 128 zeigt den zeitlichen Verlauf des tatsächlichen Ruderwinkels der Ernst Kramer während der Messung und den vorhergesagten Ruderwinkel mithilfe des Neuronalen Netzwerks. Mit Hilfe des neuronalen Netzwerks konnte der Ruderwinkel in guter Näherung approximiert werden. Gegenwärtig wird der bisherige Ansatz so weiterentwickelt, dass die Bahnen der Fremdschiffe approximiert werden.

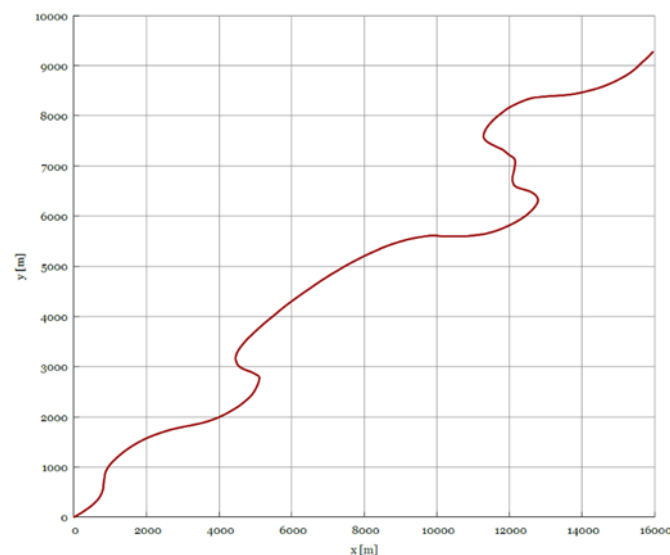


Abbildung 127 Ausschnitt einer aufgezeichneten Trajektorie der Ernst Kramer auf dem Rhein

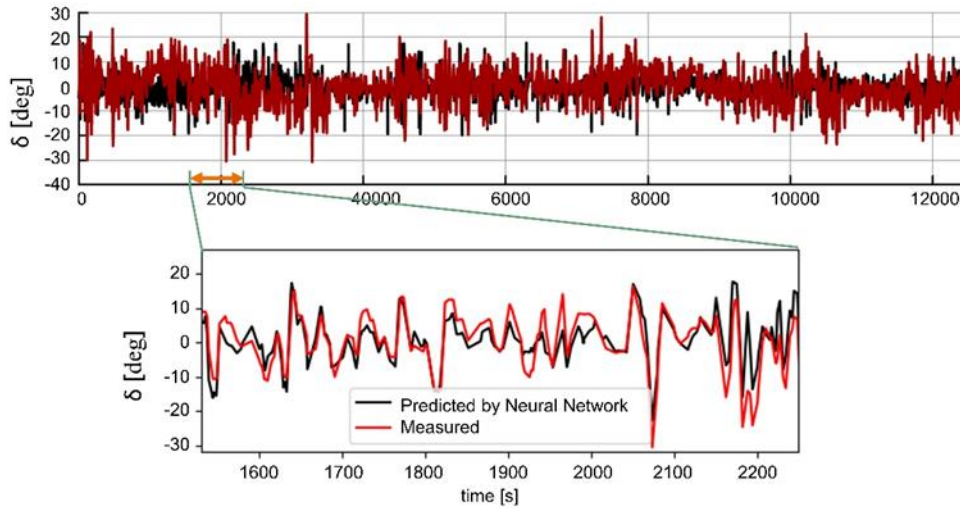


Abbildung 128 Vergleich zwischen gemessenem (rot) und mittels Neuronalem Netzwerk approximiertem Ruderwinkel (schwarz)

Trotz unserer Bemühungen, diese fehlenden Variablen indirekt abzuleiten und in die Manövriervermodelle zu integrieren, waren die Approximationen unzureichend. Die daraus resultierenden Vorhersagen stimmten nicht genau mit den tatsächlichen Schiffstrajektorien überein, was darauf hinwies, dass die Manövriervermodelle unter diesen Bedingungen nicht geeignet waren. Letztendlich verhinderte die Schwierigkeit, genaue Manöverkoeffizienten zu erhalten, und die Begrenzungen indirekter Approximationen den Erfolg des auf Manövriervermodellen basierenden Ansatzes. Dies führte dazu, dass wir alternative Methoden zur Trajektorienvorhersage untersuchten, was schließlich zur Entwicklung unserer statistischen Methode unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) führte.

Der statistische Ansatz verwendet Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, um die Unsicherheiten in Bezug auf Schiffsbewegungen zu modellieren. Zur Bereitstellung eines räumlichen Kontexts und als Bezugspunkt für die Schiffspositionierung zeigt Abbildung 129 die Flussmittellinie (in Blau), die Koordinaten s (Richtung entlang der Flussmittellinie) und x (den senkrechten Abstand der Schiffe von der Flussmittellinie).

Die Binnenschiffe werden in drei Gruppen basierend auf ihrer Länge (L), die aus der AIS-Datenbank entnommen wurde, kategorisiert. Anschließend klassifizierten wir sie weiter nach ihrer Fahrtrichtung entlang des Rheins, was zu sechs verschiedenen Gruppen führte (Tabelle 20). Für jede Gruppe berechneten wir statistische Parameter, um die Verteilung der Schiffspositionen zu charakterisieren. Der Mittelwert (μ) und die Standardabweichung (σ) wurden berechnet, um die zentrale Tendenz und die Streuung der Schiffspositionen zu erfassen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) des Abstands (x) zwischen dem Schiff und der Flussmittellinie wurde dann anhand der folgenden Gleichung bestimmt:

$$PDF(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (51)$$

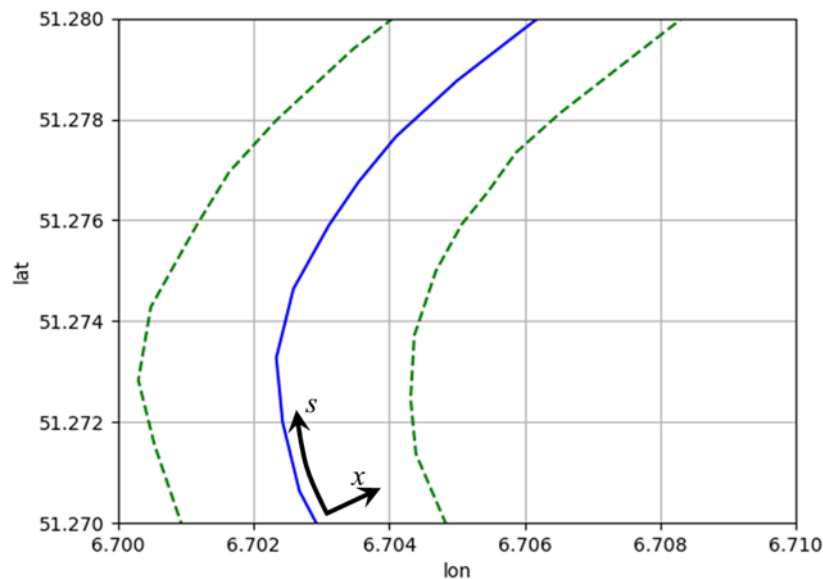


Abbildung 129 Flussmittellinie und Koordinaten. Diese Abbildung veranschaulicht die Flussmittellinie, die durch die blaue Linie dargestellt wird und als Bezugspunkt für die Schiffspositionierung dient. Darüber hinaus wird die s -Richtung entlang der Flussmittellinie sowie die x -Richtung hervorgehoben, die den senkrechten Abstand des Schiffs von der Flussmittellinie repräsentiert.

Tabelle 20: Sechs unterschiedliche Gruppen, die sich aus der Kombination von Länge und Fahrtrichtung ergeben.

Kategorie	Beschreibung
Schiffslänge	Gruppe 1: Schiffe mit einer Länge von 75 m bis 90 m
	Gruppe 2: Schiffe mit einer Länge von 90 m bis 120 m
	Gruppe 3: Schiffe mit einer Länge von 120 m bis 150 m
Fahrtrichtung	Gruppe d: Schiffe, die stromabwärts fahren
	Gruppe u: Schiffe, die stromaufwärts fahren

Für ein Fremdschiff, nachdem dessen Abstand zur Flussmittellinie (x) bestimmt und die PDF an verschiedenen Positionen des Flusses (s) berechnet wurde, sagten wir seine zukünftige Trajektorie voraus, indem wir annahmen, dass es einer Route mit einer ähnlichen PDF folgen würde. Dieser Prozess stellt sicher, dass unsere Vorhersagen durch die probabilistische Verteilung der Schiffspositionen gestützt werden, was robuste Trajektorienvorhersagen auch bei Unsicherheiten ermöglicht.

Wie bereits erwähnt, sind die Schiffe nun in verschiedene Gruppen unterteilt: Zunächst haben wir sie in drei Hauptkategorien basierend auf ihrer Länge segmentiert: Gruppe 1 umfasst Schiffe mit einer Länge von 75 bis 90 Metern, Gruppe 2 Schiffe mit einer Länge von 90 bis 120 Metern und Gruppe 3 Schiffe mit einer Länge von 120 bis 150 Metern. Anschließend haben wir die Kategorisierung weiter verfeinert, indem wir die Fahrtrichtung jedes Schiffs berücksichtigten. Dies führte zur Schaffung von zwei zusätzlichen Untergruppen innerhalb der Hauptlängenkategorien: Gruppe „u“, die Schiffe repräsentiert, die stromaufwärts fahren, und Gruppe „d“, die Schiffe repräsentiert, die stromabwärts fahren. Es ist wichtig zu betonen, dass unser Kategorisierungssystem nicht auf Trainingsdaten basiert. Stattdessen stützt es sich ausschließlich auf AIS-Daten und die inhärenten Eigenschaften der Schiffe.

Die Gruppen in unserem Kategorisierungssystem sind so benannt, dass sie klare und prägnante Informationen über die Eigenschaften der Schiffe vermitteln, die sie repräsentieren. Zum Beispiel bezieht sich Gruppe „1u“ auf Schiffe mit einer Länge von 75 bis 90 Metern, bezeichnet mit „1“, die stromaufwärts fahren, gekennzeichnet mit „u“. Ähnlich steht Gruppe „2d“ für Schiffe mit einer Länge von 90 bis 120 Metern, dargestellt durch „2“, die stromabwärts fahren, dargestellt durch „d“. Diese

Namenskonventionen ermöglichen eine einfache Identifizierung und ein besseres Verständnis der spezifischen Merkmale jeder Gruppe, was eine effiziente Analyse und Interpretation der Daten zu Schiffsbewegungen erleichtert.

Wir präsentieren die Validierung unseres Modells zur Vorhersage von Schiffsbewegungen und konzentrieren uns dabei auf einen Testfall aus Gruppe „1d“. Diese Gruppe umfasst Schiffe mit einer Länge von 75 bis 90 Metern, die stromabwärts entlang des Rheins fahren. Zur Validierung unseres Modells verwendeten wir Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs), die aus Mittelwerten (μ) und Standardabweichungen (σ) berechnet wurden, welche aus AIS-Daten abgeleitet sind. Diese PDFs ermöglichen uns, die Verteilung der Schiffspeditionen relativ zur Flussmittellinie vorherzusagen.

Für den ersten Validierungstest wählten wir repräsentative Schiffe aus Gruppe „1d“ und sagten deren Trajektorien an vier spezifischen Positionen des Flusses voraus: 751,3 km, 751,6 km, 751,9 km und 752,4 km. An jedem dieser Standorte nutzte das Modell die PDFs, um vorherzusagen, wo die Schiffe entlang des Flusses positioniert sein würden. Die Vorhersagen basierten auf historischen AIS-Daten, die Informationen über Schiffspeditionen, Geschwindigkeiten und Kurse lieferten, jedoch keine direkten Messungen wie Ruderwinkel enthielten.

Wir verglichen die vorhergesagten Schiffspeditionen mit den tatsächlichen Routen, die in den AIS-Daten für dieselben Flusspositionen aufgezeichnet wurden. Dieser Vergleich beinhaltete das Überlagern der vorhergesagten Trajektorien mit den tatsächlichen Trajektorien, um visuell und quantitativ zu bewerten, wie gut die Vorhersagen des Modells mit den beobachteten Daten übereinstimmen. Ziel war es, die Genauigkeit unseres Modells bei der Vorhersage von Schiffsbewegungen zu evaluieren, indem wir Abweichungen untersuchten und prüften, ob die Vorhersagen des Modells zuverlässig und konsistent mit realen Beobachtungen waren. Durch die Analyse dieser Vergleiche bewerteten wir die Effektivität unseres Modells bei der Vorhersage von Schiffsbewegungen für Gruppe „1d“ und validierten seine Genauigkeit im Hinblick auf reale Schiffsbewegungen entlang des Rheins.

Abbildung 130 zeigt Visualisierungen zum Vergleich der vom Modell generierten vorhergesagten Routen mit den tatsächlichen Schiffsbewegungen. Das erste Set von Visualisierungen enthält PDF-Diagramme (Unterdiagramme a1-a4) für jede Position, die die Verteilung der vorhergesagten Schiffspeditionen basierend auf den Werten von σ und μ veranschaulichen. Zusätzlich zeigt das Unterdiagramm (b) den Vergleich zwischen der vorhergesagten Schiffsrouten und der tatsächlichen Routen, die aus den AIS-Daten entnommen wurde. Dies ermöglicht eine visuelle Bewertung der Genauigkeit unserer Modellvorhersagen. Weiterhin zeigt das Unterdiagramm (c) die Differenz zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen x-Positionen der Schiffe, was Einblicke in Abweichungen zwischen den Modellvorhersagen und den realen Beobachtungen gibt. Zusammen bieten diese Visualisierungen eine Bewertung der Leistung unseres Modells zur Vorhersage von Schiffsbewegungen für Gruppe „1d“.

Bei der Vorhersage der Trajektorie eines Schiffs über einen längeren Zeitraum neigt die Genauigkeit unseres Modells dazu, abzunehmen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Unsicherheiten und möglichen Änderungen im Schiffsverhalten sowie in den Umwelteinflüssen (wie Strömungen) mit der Zeit stärker ausgeprägt werden. Die Vorhersagen des Modells basieren auf der Annahme, dass das Schiff weiterhin einem ähnlichen Pfad folgt, wie es die vergangenen Daten anzeigen. Über längere Zeiträume sind Abweichungen von diesem Muster jedoch wahrscheinlicher, beispielsweise durch Navigationsanpassungen der Besatzung oder unvorhergesehene Hindernisse.

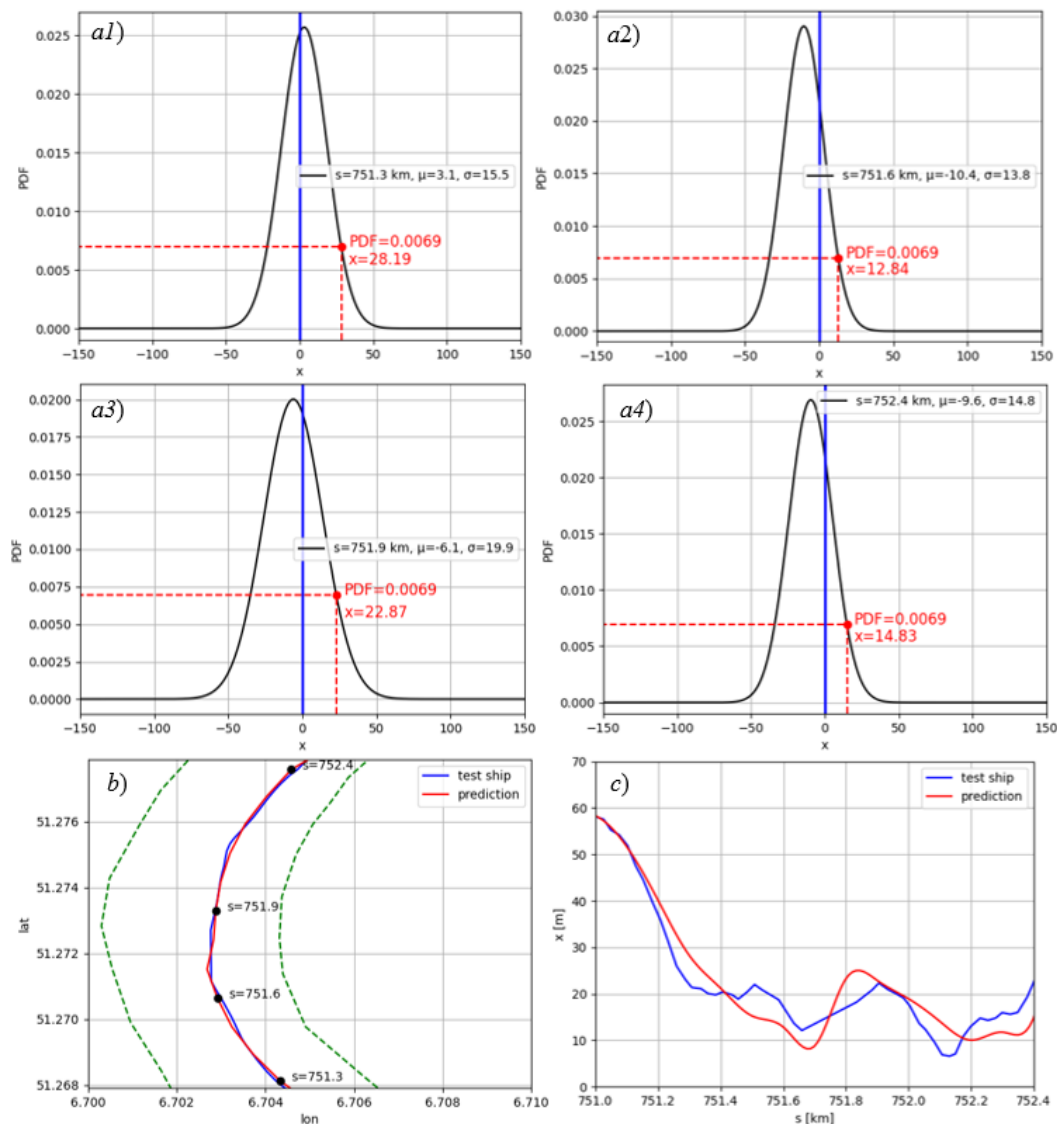


Abbildung 130 Vorhergesagte Schiffsbewegungen und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für Gruppe „1d“. Die Unterdiagramme (a1-a4) zeigen die PDFs der vorhergesagten Schiffspositionen an vier verschiedenen Flusspositionen entlang des Rheins: 751,3 km, 751,6 km, 751,9 km und 752,4 km. Diese veranschaulichen die Verteilung der vorhergesagten Schiffspositionen basierend auf den σ - und μ -Werten. Das Unterdiagramm (b) zeigt den Vergleich zwischen der vorhergesagten Schiffsroute und der tatsächlichen Route, die aus den AIS-Daten gewonnen wurde. Schließlich zeigt das Unterdiagramm (c) die Differenz zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen x-Positionen der Schiffe und hebt Abweichungen zwischen den Modellvorhersagen und den realen Beobachtungen hervor.

Auch erhebliche Änderungen des Wasserstands können die Genauigkeit unserer Vorhersagen beeinflussen. Das Modell stützt sich auf historische AIS-Daten, um die PDF der Schiffspositionen relativ zur Flussmittellinie zu schätzen. Wenn der Wasserstand erheblich schwankt, kann dies die Trajektorie des Schiffs aufgrund veränderter Strömungsdynamik und Wassertiefe beeinflussen. Solche Variationen werden möglicherweise nicht ausreichend durch die historischen Daten, die zur Erstellung der PDFs verwendet wurden, erfasst, was zu potenziellen Abweichungen in den vorhergesagten Trajektorien führen kann.

Wir validieren unser Modell zur Vorhersage von Schiffsbewegungen weiter mit einem Schiff aus der Gruppe „2u“. Abbildung 131 zeigt die vorhergesagten Schiffsbewegungen und die PDF für Gruppe „2u“, die Schiffe mit einer Länge von 90 bis 120 Metern umfasst, die stromaufwärts fahren. Ähnlich

wie in Abbildung 130 erfasst unser Modell effektiv die Verteilung der projizierten Schiffspeditionen an vier verschiedenen Positionen entlang des Rheins. Der Vergleich zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen Schiffsbewegungen unterstreicht die Leistungsfähigkeit des Modells bei der Vorhersage von Schiffsbewegungen für Gruppe „2u“. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse aus Abbildung 131 die Zuverlässigkeit und Präzision unseres Modells zur Vorhersage von Schiffsbewegungen für verschiedene Schiffskategorien, die auf dem Rhein unterwegs sind.

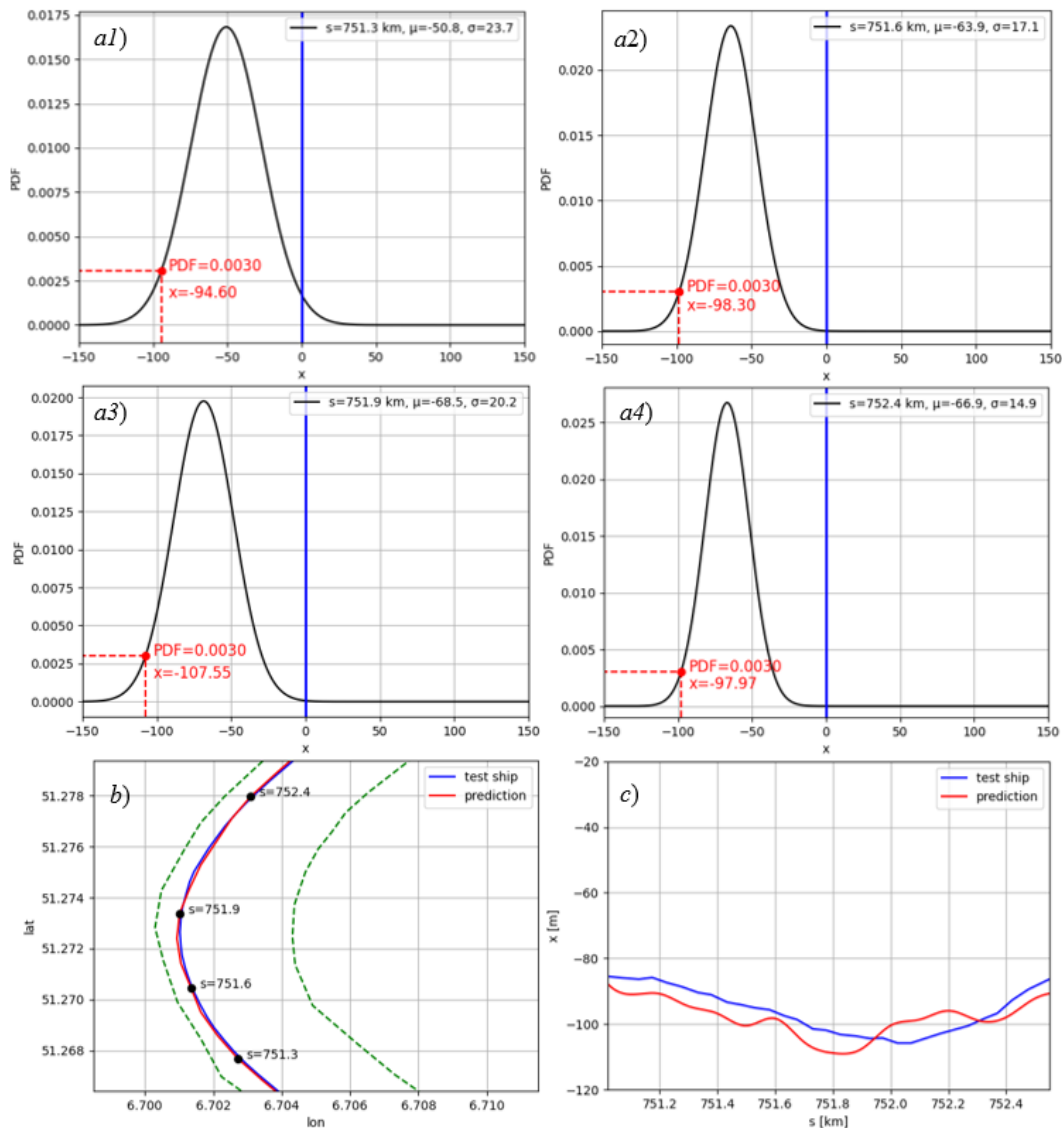


Abbildung 131 Vorhergesagte Schiffsbewegungen und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für Gruppe „2u“. Die Unterdiagramme (a1-a4) zeigen die PDFs der vorhergesagten Schiffspeditionen an vier verschiedenen Flusspositionen entlang des Rheins: 751,3 km, 751,6 km, 751,9 km und 752,4 km. Unterdiagramm b) zeigt den Vergleich zwischen der vorhergesagten Schiffsrouten und der tatsächlichen Route, die aus den AIS-Daten gewonnen wurde. Schließlich zeigt Unterdiagramm c) die Differenz zwischen den vorhergesagten und tatsächlichen x-Positionen der Schiffe und hebt Abweichungen zwischen den Modellvorhersagen und den realen Beobachtungen hervor.

Unsere vorgeschlagene Vorhersagemethode zeigt eine starke Übereinstimmung mit den tatsächlichen Schiffsbewegungen, wie der Vergleich zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Routen belegt. Durch die Nutzung von PDFs, die aus AIS-Daten berechnet wurden, sagt unser Modell die Verteilung der Schiffspeditionen entlang des Rheins genau voraus. Visuelle Vergleiche der vorhergesagten

Routen mit den tatsächlichen Schiffsbewegungen (Abbildung 130 und Abbildung 131) zeigen nur minimale Abweichungen, wobei der maximale Fehler beim ersten Validierungstestfall aus Gruppe „1d“ etwa 8 Meter und beim zweiten Testfall aus Gruppe „2u“ etwa 10 Meter beträgt. Diese Ergebnisse weisen auf eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit unserer Vorhersagen hin.

Die Erprobung dieser Methode an mehreren Schiffen verschiedener Kategorien zeigte eine hohe Genauigkeit bei der Vorhersage von Schiffsbewegungen innerhalb des nächsten Kilometers. Zusammenfassend hat unser Projekt erfolgreich eine statistische Methode zur Vorhersage von Schiffsbewegungen unter Verwendung von AIS-Daten entwickelt. Durch die Kategorisierung der Schiffe nach Länge und Fahrtrichtung sowie die Nutzung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen konnten wir präzise Trajektorienvorhersagen erreichen. Diese Methodik bietet ein robustes Rahmenwerk für maritime Anwendungen und trägt zur Verbesserung von Sicherheit und Effizienz in der Navigation bei.

16.2.2 Typische Routen & Geschwindigkeiten

Zunächst wurde statistisch ermittelt, wo und wie schnell Schiffe typischerweise pro Fahrtrichtung und Wasserstraßenkilometer fahren. Hierzu wurden ein Jahr an AIS-Daten von Rhein- und Donau-Abschnitten herangezogen. Zur Ermittlung typischer Routen wurden die Koordinaten nach aufsteigendem Wasserstraßenkilometer sortiert und anschließend mittels Savitzky-Golay-Filter geglättet. Lücken zwischen den geglätteten Koordinaten wurden durch Interpolation geschlossen. In Abbildung 23 sind die erhaltenen typischen Routen als rote und grüne Linie (Bergfahrt / Talfahrt) auf einem Rheinabschnitt eingezeichnet. Die Kreuzung der typischen Routen nach der Brücke (ca. Rhein-km 599) stimmt mit der im Rhein-Radar-Atlas [KARM2004] für dort vermerkten Empfehlung eines Richtungswechsels überein.



Abbildung 132 Typische Routen nach Fahrtrichtung zwischen Rhein-km 598 und 603 (ca.) (rot: Bergfahrt, grün: Talfahrt). Kartendaten unterliegen dem Urheberrecht von OpenStreetMap-Mitwirkenden und sind unter <https://www.openstreetmap.org> verfügbar, die Kartenkacheln stammen von CartoDB und sind unter CC-BY-3.0 lizenziert.

Die Information darüber, wie schnell Schiffe typischerweise fahren, wurde annähernd durch die pro Minute zurückgelegte Wasserstraßenkilometer-Differenz (WW-km/min) ermittelt. Hierfür wurden zunächst die Mediane der pro Wasserstraßendekameter gemessenen WW-km/min mittels Savitzky-Golay-Filter geglättet und die geglätteten Werte interpoliert. In Abbildung 24 sind die Mediane und die durch Glättung und Interpolation erhaltenen WW-km/min über dem Wasserstraßenkilometer für die Bergfahrt auf einem Donau-Abschnitt nahe der Isar-Mündung aufgetragen. Nach Passieren der Mündung und somit der Überwindung der höheren Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 134) können

die Bergfahrer wieder schneller fahren, wie am Anstieg der WW-km/min um den Donau-km 2282 zu erkennen ist. Neben der fahrtrichtungsspezifischen Bestimmung typischer Routen und „Geschwindigkeiten“ können auch weitere Filter wie z.B. Schiffstyp oder Abfluss angewandt werden. Typische Routen/„Geschwindigkeiten“ stellen allerdings nur eine eingeschränkte Möglichkeit der Repräsentation von Schiffsverhalten dar, da die Verteilung in den Daten unberücksichtigt bleibt. Daher wurde eine auf Gaussian Mixture Modellen (Gaußsche Mischmodelle GMM) basierende Auswertung implementiert.

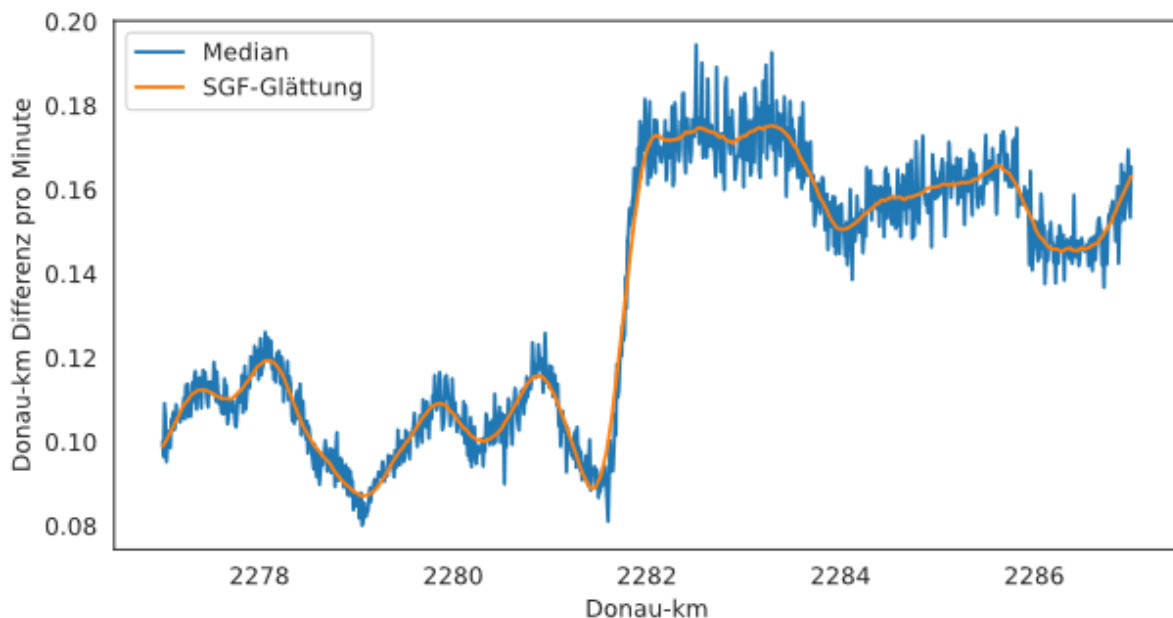


Abbildung 133 Wasserstraßenkilometerdifferenz pro Minute in der Bergfahrt - Donau-km 2279-2285

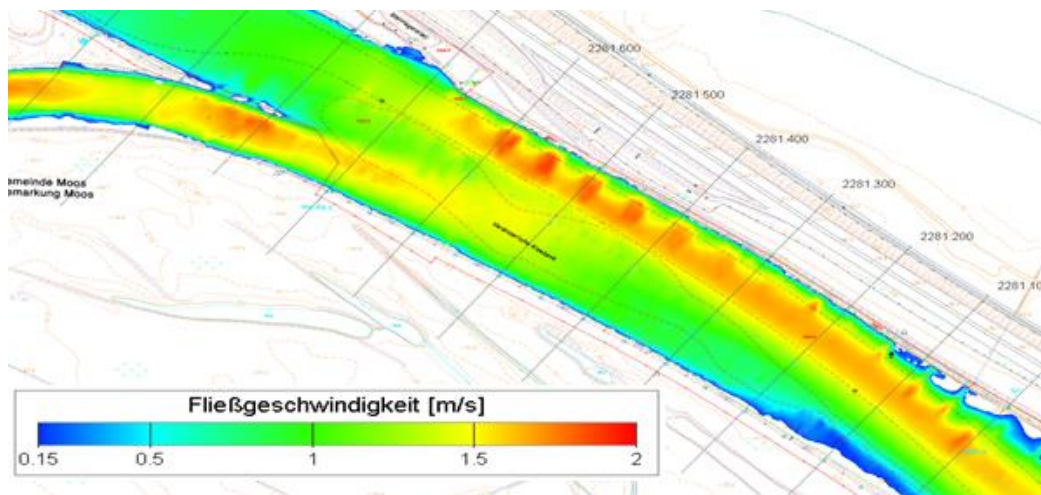


Abbildung 134 Fließgeschwindigkeiten nahe Isarmündung (© L. Backhaus).

Für eine differenziertere Repräsentation von typischem Schiffsfahrverhalten wurden die Verteilungen der gemessenen AIS-Koordinaten über die Fahrrinnenbreite und pro Wasserstraßenhektometer bestimmt. Eine Approximation der Verteilungsfunktion wurden durch Kombination mehrere Gauß-Verteilungen mittels des sogenannten Gaussian Mixture Modells realisiert. Die Anzahl der bis zu vier zu kombinierenden Gauß-Verteilungen und deren Parameter werden automatisiert bestimmt. Das Maximum von 4 sich überlappenden Gauß-Verteilung wurde empirisch als sinnvoll erachtet. In Abbildung

26 ist beispielsweise die Verteilung der gemessenen Abstände von der Fahrinnenmitte in der Bergfahrt am Rhein-km 606,1. durch eine Kombination von vier Gauß-Verteilungen approximiert.

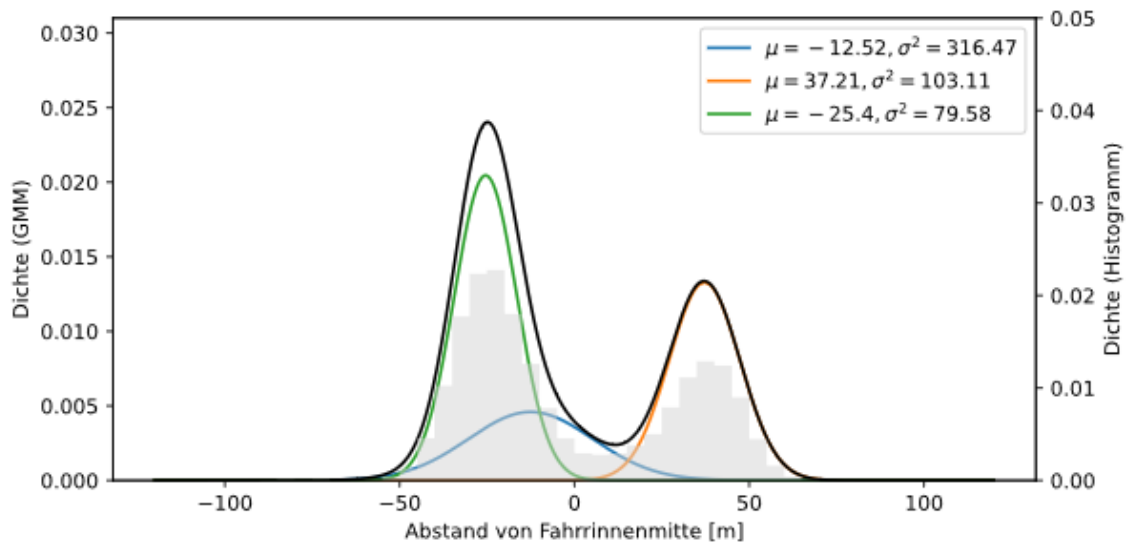


Abbildung 135 Verteilung des Abstands von der Fahrinnenmitte am Rhein-km 606,1 (Bergfahrt).

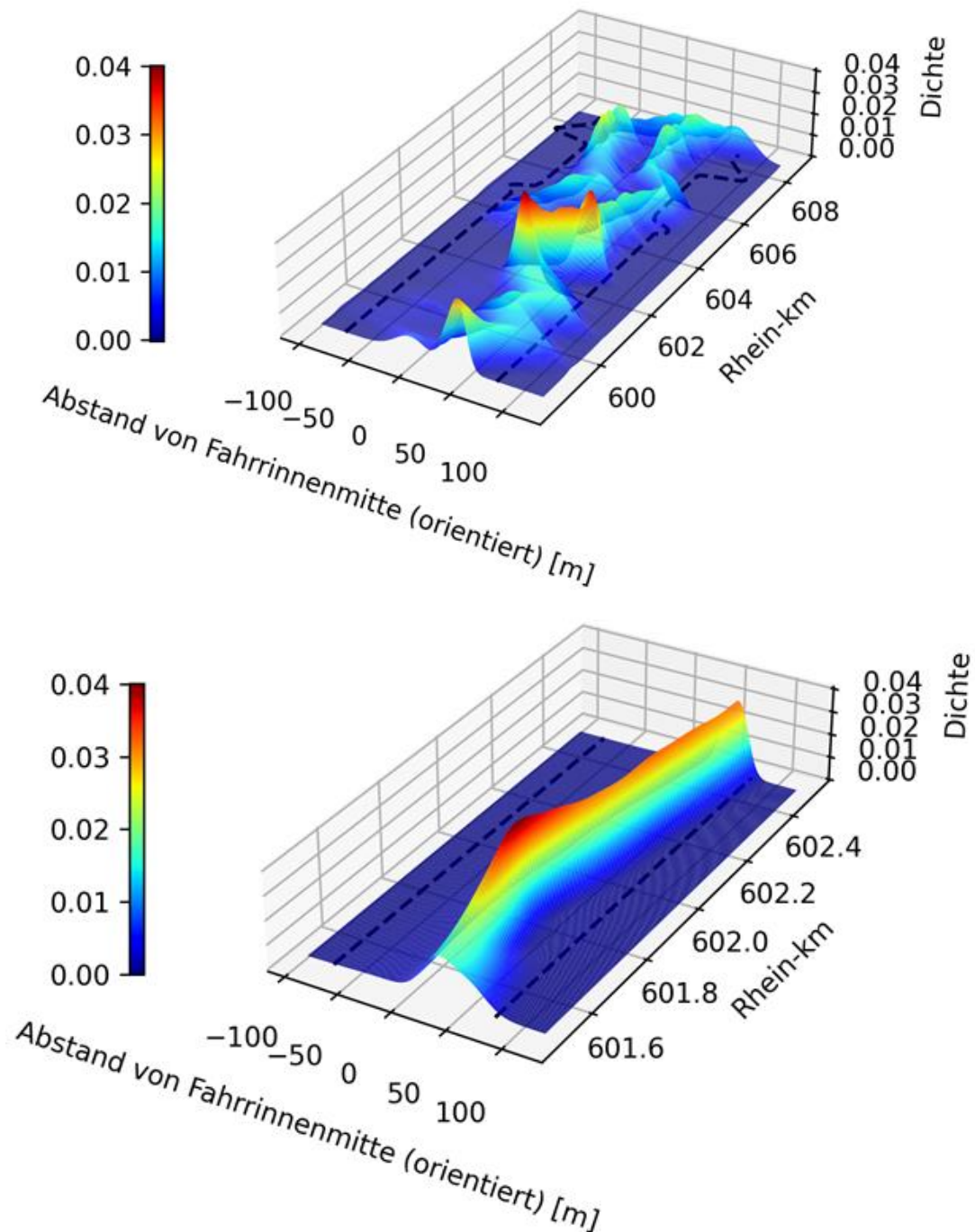


Abbildung 136 Verteilungen des Abstands von der Fahrinnenmitte zwischen Rhein-km 598,5 und 608,5.

In Abbildung 135 sind die Verteilungen dieser Abstände von der Fahrinnenmitte (negativ bedeutet links, positiv rechts (in Stationierungsrichtung)) in der Bergfahrt im Bereich von Rhein-km 599,5-608,5 visualisiert. In Abbildung 28 ist ein Ausschnitt dieses Abschnitts (Rhein-km 601,5 bis 602,5) aufgeführt. Die geringe Standardabweichung in der hier nur aus einer Gaußkurve bestehenden Verteilungsfunktion ist auf eine Brückendurchfahrt zurückzuführen. In einem weiteren Schritt wurden abflussspezifische Verteilungen berechnet. Ein Vergleich von Abbildung 134 bis Abbildung 136 zeigt, wie sich die Verteilungen bei den Abflüssen $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $1750 \text{ m}^3/\text{s}$ und $2250 \text{ m}^3/\text{s}$ unterscheiden. Es ist zu erkennen, dass hier mit steigendem Abfluss die Schifffahrt sich zunehmend auf die rechte Seite der Fahrinne verlagert.

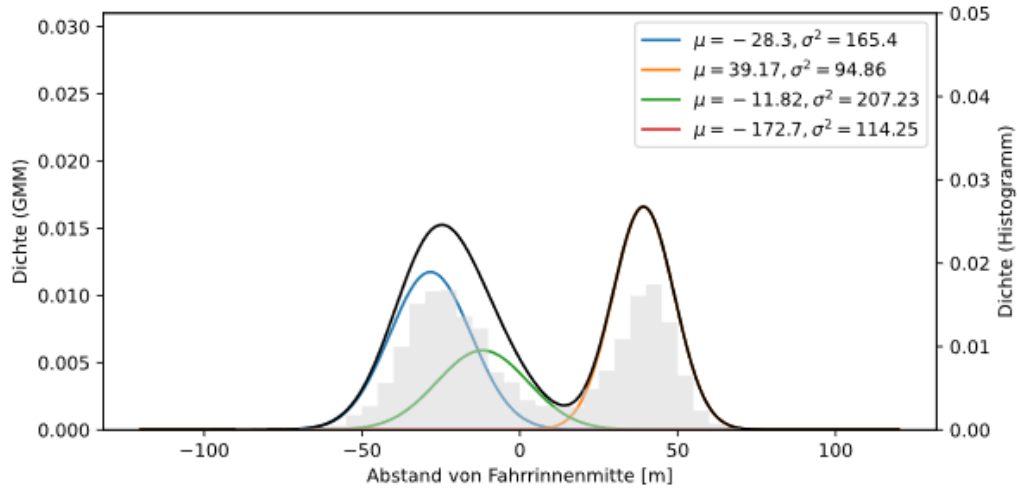


Abbildung 137 Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 1000 m³/s (Rhein-km 606).

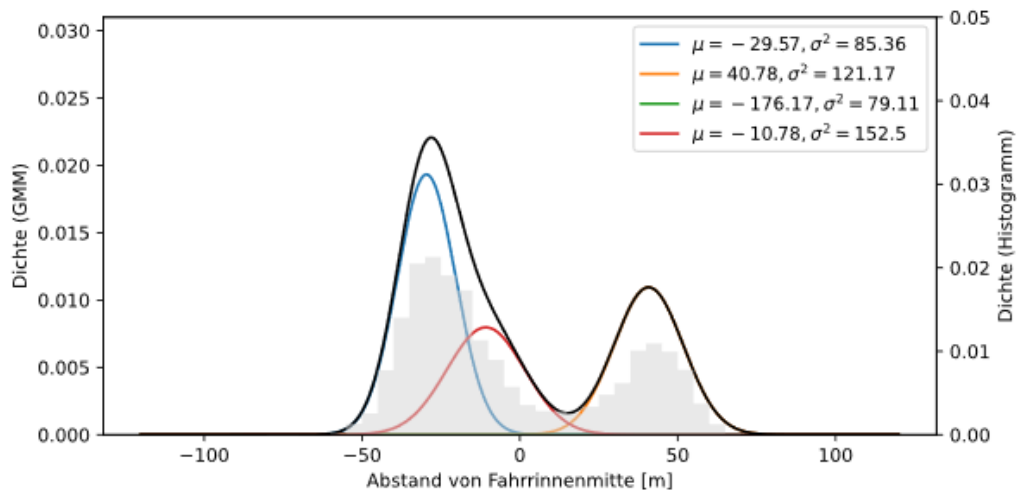


Abbildung 138 Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 1750 m³/s (Rhein-km 606).

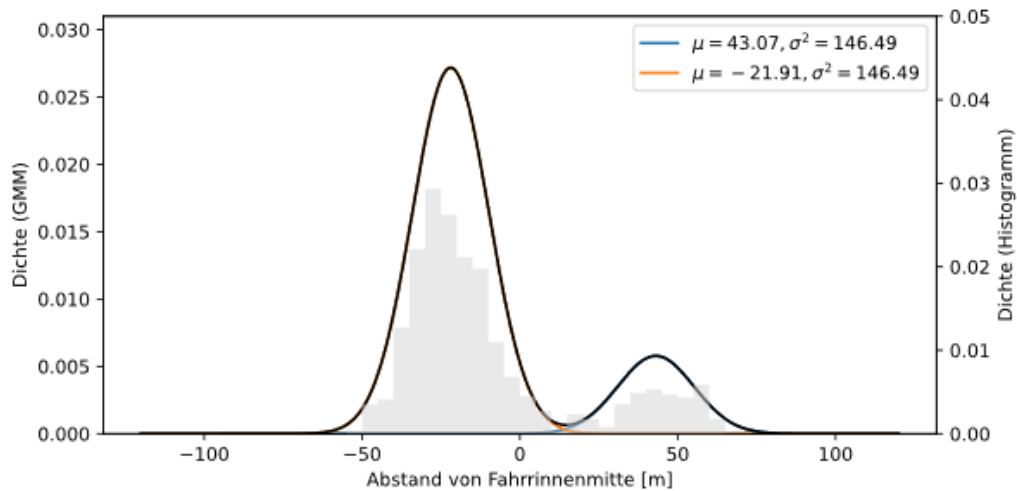


Abbildung 139 Verteilung des Abstands zur Fahrrinnenmitte bei einem Abfluss von 2250 m³/s (Rhein-km 606).

Die Ergebnisse der beschriebenen statistischen Auswertungen von AIS-Daten wurden zur Optimierung des Trajektorienprognosemodells, welches im nächsten Abschnitt näher erläutert wird, verwendet.

16.2.3 Trajektorienprognose

Der zeitintensivste Teil des Arbeitspaketes bestand darin, zu untersuchen, ob es mittels maschineller Lernverfahren durch Erkennen von Mustern in großen Mengen von AIS-Daten möglich ist, präzise Prognosen von Schiffsverhalten zu generieren, die sowohl kollisionsfrei als auch physikalisch sinnvoll sind. Die Berücksichtigung des räumlichen Kontextes und anderer Schiffe, das sog. Situationsbewusstsein, wurde hierbei schrittweise implementiert. Desweiteren wurde die Unsicherheit der implementierten Modelle analysiert.

16.2.3.1 Räumliches Situationsbewusstsein

Ein erster Versuch der Trajektorienprognose mittels maschineller Lernverfahren wurde in [DONA2022] vorgestellt. Das implementierte Modell, der context-sensitive classification transformer (CSCT), verwendete die Transformer-Encoder-Decoder-Architektur. Basierend auf einer vergangenen Trajektorie von 5–10 min wurde eine zukünftige Trajektorie von 15–30 min vorhergesagt. Die Trajektorien wurden durch Zeitreihen beschrieben, deren Elemente aus gepaarten, diskretisierten euklidischen Distanzen und Kursänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Schiffspositionen bestanden.

Die Diskretisierung der Zeitreihenelemente wurde in Anlehnung an [NGUY2018] durchgeführt, da ein Regressionsmodell, welches kontinuierliche Werte vorhersagt, keine akzeptablen Ergebnisse lieferte. Die gewählte Auflösung von 1–10 m (je nach betrachteter Trajektorienlänge) und 1 Grad verursachte teilweise hohe Diskretisierungsfehler, d.h. euklidische Distanzen zwischen ursprünglicher Schiffspositionen und der durch diskretisierte euklidische Distanzen und Kursänderungen rekonstruierte Schiffspositionen, von im Mittel 25 m nach 20 min (1 m Auflösung) und 70 m nach 40 min (10 m Auflösung). In einer Folgepublikation (Donandt et al., 2023) wurde die Auflösung der Kursänderung auf 0,5 Grad herabgesetzt, die Auflösung der euklidischen Distanz bei 1 Meter belassen und der Prognosehorizont auf 10 min beschränkt. Der Diskretisierungsfehler des CSCT betrug nach 10 min im Mittel schließlich ca. 5 m.

Eine Berücksichtigung des räumlichen Kontextes wurde im CSCT bereits implementiert und die Effektivität der Methode zur Integration räumlichen Situationsbewusstseins wurde in Donandt et al. (2022) gezeigt. Es wurden hierbei Krümmungswerte der Flussachse im Abschnitt, auf den das betrachtete Schiff zusteuert, berücksichtigt.

Für ein verbessertes räumliches Situationsbewusstsein wurden in der erwähnten Folgepublikation (Donandt et al., 2023) zwei alternative Referenzsysteme für die Definition der Zeitreihenelemente (insb. der longitudinalen und lateralen Fortbewegung des Schiffes) vorgestellt. Statt euklidischer Distanz und Kursänderung, d. h. $\|p_{(t+1)} - p_t\|$ und $\alpha_{(t+1)} - \alpha_t$ (Abbildung 140 links) wurde in Alternative 1 die Wasserstraßenkilometerdistanz (WW-km-Distanz) und die Differenz der relativen Distanzen zum rechten Fahrrinnenrand zwischen aufeinanderfolgenden Schiffspositionen (k_t und $\frac{f_{t+1}}{w_{t+1}} - \frac{f_t}{w_t}$ in Abbildung 140 Mitte) verwendet. In Alternative 2 wurde für die longitudinale Fortbewegungskomponente die Differenz zwischen tatsächlicher WW-km-Distanz und der am aktuellen WW-km gegebenen typischen WW-km pro Minute statt der euklidischen Distanz verwendet. Für die Beschreibung der lateralen Fortbewegung wurde die Differenz der Abstände zur typischen Route von aufeinanderfolgenden Schiffspositionen ($k_t - z_t$ und $s_{t+1} - s_t$) in Abbildung 140 rechts) herangezogen. Durch diese Definitionen der Fortbewegung des Schiffes in Relation zur Fahrrinne bzw. zum typischen Fahrverhalten konnte ein (erweitertes) räumliches Situationsbewusstsein implizit integriert werden.

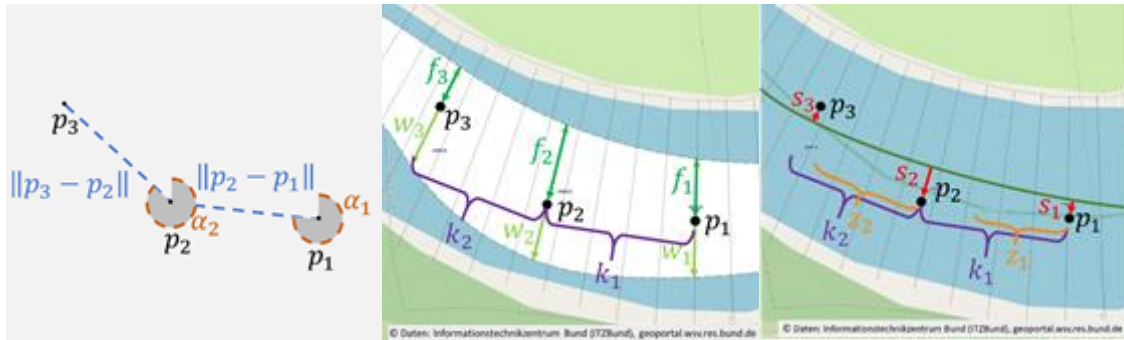


Abbildung 140: Möglichkeiten der Definition der longitudinalen und lateralen Fortbewegung eines Schiffes (vgl. [DONA2023]).

Die Auflösungen der lateralen und longitudinalen Fortbewegungsinformationen und die resultierenden Diskretisierungsfehler nach 10 min sind für das originale Referenzsystem und die 2 Alternativen in Tabelle 21 aufgeführt. Eine deutlich geringerer Diskretisierungsfehler konnte durch die Verwendung der alternativen Referenzsysteme erzielt werden.

Tabelle 21: Auflösung und Diskretisierungsfehler unterschiedlicher Referenzsysteme zur Definition der lateralen und longitudinalen Fortbewegung eines Schiffes.

	Referenzsystem		
	Global	Alternative 1	Alternative 2
Longitudinale Auflösung	1 m	0,001 WW-km	0,001 WW-km
Laterale Auflösung	0,5 °	0,005	1 m
Diskretisierungsfehler (nach 10 min)	5,15 m	1,00 m	1,19 m

Das Modell, das nach Alternative 1 definierten Zeitreihenelementen übergeben bekommt, wird hier als R-CSCT bezeichnet (Fluss-(engl. river) spezifisches Referenzsystem), und das Modell, welches nach Alternative 2 definierte Zeitreihenelemente erhält, N-CSCT (Navigations-spezifisches Referenzsystem). Das ursprüngliche Modell wird hier auch als G-CSCT bezeichnet, da es auf der Verwendung eines globales Referenzsystem ohne jegliche Information über den lokalen Kontext basiert. Ein Vergleich der Vorhersageperformanz (absolute trajectory error (ATE), vgl. [DIJT2020]) dieser 3 Modellvarianten und einer auf Statistik beruhenden Baseline ist in Abbildung 141 aufgeführt. Für die Baseline wurden die in der Eingabetrajektorie vorhandenen Abweichung von der typischen Route und den typischen WW-km-Distanzen pro Minute (vgl. 2.4.1.1) für die Vorhersage herangezogen. Während G-CSCT und R-CSCT nach 5 bzw. 7 Minuten schlechtere Vorhersagen liefern als die Baseline, erhält man mittels N-CSCT bessere Vorhersagen über den gesamten betrachteten Vorhersagezeitraum.

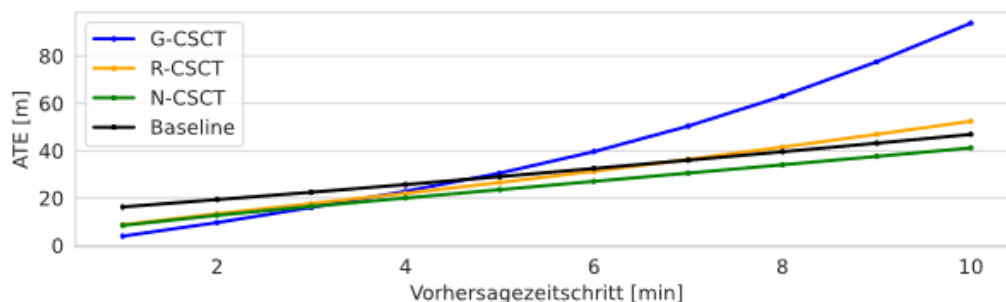


Abbildung 141 Vergleich des Vorhersagefehlers verschiedener Trajektorienprognosenmodellvarianten für zu Berg fahrende Schiffe auf dem Rhein (WWKM 556-562, 570-579, 598-608).

16.2.3.2 Soziales Situationsbewusstsein

Eine Erweiterung des R-CSCT-Modells um soziales Situationsbewusstsein, d.h. der Berücksichtigung von Umgebungsschiffen, wurde in [DONA2023] vorgestellt. Hierfür wurden zu jedem Zeitschritt der beobachteten Trajektorie (d.h. der Modelleingabe) die in einem abgegrenzten Bereich um das Zielschiff fahrenden Schiffe betrachtet. Dieser Bereich wurde als Gitter repräsentiert. Für die folgende Beschreibung des Gitters sei auf Abbildung 142 verwiesen. Die longitudinale Ausdehnung des Gitters wurde für zu Berg fahrende Schiffe auf 1,5 WW-km flussabwärts (d.h. hinter dem Schiff) und 3 WW-km flussaufwärts (d.h. vor dem Schiff) festgesetzt. Die Auswahl eines längeren Abschnitts flussaufwärts ist darin begründet, dass entgegenkommende, zu Tal fahrenden Schiffe in der Regel mit einer höheren Geschwindigkeit fahren als die sich von hinten nähernden, zu Berg fahrenden Schiffe. Die laterale Ausdehnung des Gitters wurde auf 300% relativen Fahrrinnenrandabstands festgelegt. Hierdurch sollten alle möglichen Begegnungskonstellationen, bspw. auch mit außerhalb der Fahrrinne (von Liegestellen losfahrende) Schiffen, mitberücksichtigt werden können. Die Dimensionen einer Gitterzelle wurden auf $c_l = 0,01 \cdot WW - km$ WW-km (ca. 10 m) und $c_w = 10\%$ relativen Fahrrinnenrandabstand festgelegt (d. h. bei einer Fahrrinnenbreite von 150 m ca. 15 m). Da auf den betrachteten Rheinabschnitten (WW-km 556-562, 570-579, 598-608, vgl. AIS-Benchmark-Datensatz (Abschnitt AIS-Benchmark-Datensatz)) eine relativ konstante Fahrrinnenbreite vorherrscht, weisen die um die beobachteten Positionen des Zielschiffes jeweils generierten Gitter eine entsprechend uniforme Ausdehnung und Zellengröße auf. Die in den Bereich des Gitters fallenden Umgebungsschiffe wurden in die den aktuellen longitudinalen und lateralen Abständen (und für Schiff zum Zeitpunkt t) entsprechenden Gitterzellen platziert. Außerdem wurden die Umgebungsschiffe neben der Position durch die Änderungsraten der lateralen und longitudinalen Distanzen beschrieben ($\Delta l_{i,t} = l_{i,t} - l_{i,t-1}$ und $\Delta w_{i,t} = w_{i,t} - w_{i,t-1}$).

Diese Positionen und Änderungsraten wurden durch eine zusätzliche Modellkomponente, die ebenfalls auf der Transformer-Architektur, insbesondere dem Attention Mechanismus (vgl. [VASW2017]) basiert, im R-CSCT Modell verarbeitet. Durch Verwendung des Attention Mechanismus sollte ermöglicht werden, während des Modelltrainings eine Gewichtung der Umgebungsschiffe gemäß ihrem Einfluss auf das Verhalten des Zielschiffes auf Basis der beobachteten Interaktion zu erlernen. In Abbildung 143 sind die Gewichte, die das Modell den Umgebungsschiffen während des Beobachtungszeitraums zuweist, visualisiert. Es ist zu erkennen, dass das entgegenkommende Schiff mit geringer werdendem Abstand ein wachsendes Gewicht zugeteilt bekommt. Außerdem steigt die Gewichtung des vorausfahrenden, zu überholenden Schiffs zum Zeitpunkt der sichtbaren Einleitung des Überholmanövers (Abbildung 143, $t_{obs} = 5$) stark an. Das Prognosemodell produziert basierend auf der beobachteten Trajektorie des Zielschiffs und der gewichteten Kombination der Umgebungsschiffe zu jedem Beobachtungszeitschritt die zukünftige Trajektorie, wie in Abbildung 143, $t_{pred} = 5$ in dunkelgrün visualisiert ist. Die tatsächlich gefahrene Trajektorie ist in hellgrün dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in diesem Beispiel durch die Integration des sozialen Situationsbewusstsein eine kollisionsfreie Trajektorienprognose erzielt werden kann, das ursprüngliche Modell, R-CSCT, hingegen, dessen Vorhersage in Abbildung 143, $t_{pred} = 5$, blau markiert ist, eine auf Kollisionskurs gehende Trajektorie vorhersagt.



Abbildung 142 Beispiel einer Verkehrssituation um Zielschiff (grün) zum Zeitpunkt t_1 (oben) und t_{obs} (unten). Die Zellenanzahl ist zu Visualisierungszwecken geringgehalten.

Die Performanz des in [DONA2023] vorgestellten Prognosemodells – das Social Tensor Transformer R-CSCT (STT-R-CSCT) und des nicht die Umgebungsschiffe berücksichtigenden R-CSCT wurde anschließend mit state-of-the-art Trajek-to-ri-en-pro-gno-se-mo-del-len mit sozialem Situationsbewusstsein verglichen. Der Begriff „Social Tensor“ wurde in Alahi et al. (2016) verwendet und steht im weitesten Sinne für die die Repräsentation der Verkehrssituation als Gitter, welches mit Beschreibungen der Verkehrsteilnehmer (z.B. deren Historie) befüllt ist. Der Social Tensor Transformer (STT) bezeichnet die ins R-CSCT integrierte Modellkomponente zur Interaktionsberücksichtigung. Eine Alternative zur STT-Komponente, die in etwa der in [MESS2021] vorgestellten Methode zur Verarbeitung der Informationen anderer Verkehrsteilnehmer entspricht, wurde ebenfalls implementiert. Hierbei wurde nur das Gitter des letzten Beobachtungszeit-schrittes berücksichtigt. Die Trajektorien der Umgebungsschiffe während des Beobachtungszeitraums wurden mittels LSTM kodiert. Schließlich wurde der Attention Mechanismus zur Gewichtung dieser LSTM-Kodierungen der Umgebungsschiffshistorien verwendet. Die Abkürzung STLSTMattn-R-CSCT steht folglich für Social Tensor LSTM Attention R-CSCT. Die state-of-the-art Modelle, die zusätzlich zur Evaluation des entwickelten Trajektorienprognosemodells herangezogen wurden, sind das in [SEKH2020] vorgestellte Modell für Trajektorienvorhersagen maritimer Schiffe in Küstennähe und das in [HUAN2022] zur Prognose von Fußgängertrajektorien vorgeschlagene Gumbel social transformer (GST) Modell. Ersteres verwendet spezielle Attention Mechanismen (räumlich (engl. spatial) – wobei sich räumlich hier auf andere Schiffe in der Umgebung bezieht und zeitlich (engl. temporal)) in einem LSTM-basierten Modell (Abkürzung SpatTempLSTM). Letzteres verwendet zunächst *Gumbel softmax* [JANG2017] für das Sampling

reduzierter Interaktionsgraphen, welche weniger Redundanzen und irrelevante Kanten enthalten. Schließlich verarbeitet ein auf der Transformer-Architektur basierendes Graph Neural Network diese Interaktionsgraphen.

Alle Modelle (R-CSCT, STT-R-CSCT, STLSTMattn-R-CSCT, SpatTempLSTM, GST) wurden auf den gleichen Daten trainiert und anschließend auf dem gleichen Testdatensatz getestet. Wie in Abbildung 144 zu sehen ist, schneidet einerseits STT-R-CSCT nur gering besser ab als R-CSCT. Andererseits weisen alle anderen Modelle einen höheren durchschnittlichen Fehler auf. Der Grund des geringen Performanzgewinns durch Berücksichtigung von Umgebungsschiffen könnte einerseits am Datensatz liegen, der auch Begegnungssituationen enthält, bei denen kein sichtbarer Einfluss auf das Verhalten der teilnehmenden Schiffe erkenntlich ist, beispielsweise bei einer Begegnung mit ausreichendem Platz. Daher muss in zukünftigen Arbeiten ein überarbeiteter Datensatz mit relevanten Begegnungssituationen für das Training eines die Interaktion berücksichtigenden Modells erarbeitet werden. Ein anderer Grund könnte in der Art der Einbindung der Interaktionsinformation selbst liegen. Auch wenn erlernte Gewichtung der Umgebungsschiffe während des Beobachtungszeitraums sinnvoll erscheint, mag diese Information nicht ausreichend sein, um daraus basierend die zukünftige Trajektorie vorherzusagen – ohne jegliches Wissen über das mögliche zukünftige Verhalten der Umgebungsschiffe (die nur während der Beobachtung sichtbar sind). Modelle wie das SpatTempLSTM und GST, die die Interaktion selbst vorhersagen und nicht nur deren Einfluss auf das Verhalten eines einzelnen Zielagenten modellieren, sind erwartungsgemäß besser geeignet, erfolgreich Trajektorien von interagierenden Agenten vorherzusagen. Die geringere Performanz dieser Modelle mag einerseits ebenfalls in der Datenauswahl begründet sein. Ein weiterer Grund liegt darin, dass die Hyperparameter der ursprünglichen Implementierung beibehalten wurden und nicht für den vorliegenden Anwendungsfall der Trajektorienprädiktion für Binnenschiffe optimiert wurden. Weiterhin muss die STT-Modellkomponente dahingehend überarbeitet werden, dass es auch auf Wasserstraßen(-Sektionen) mit variierender Fahrrinnenbreite anwendbar ist.

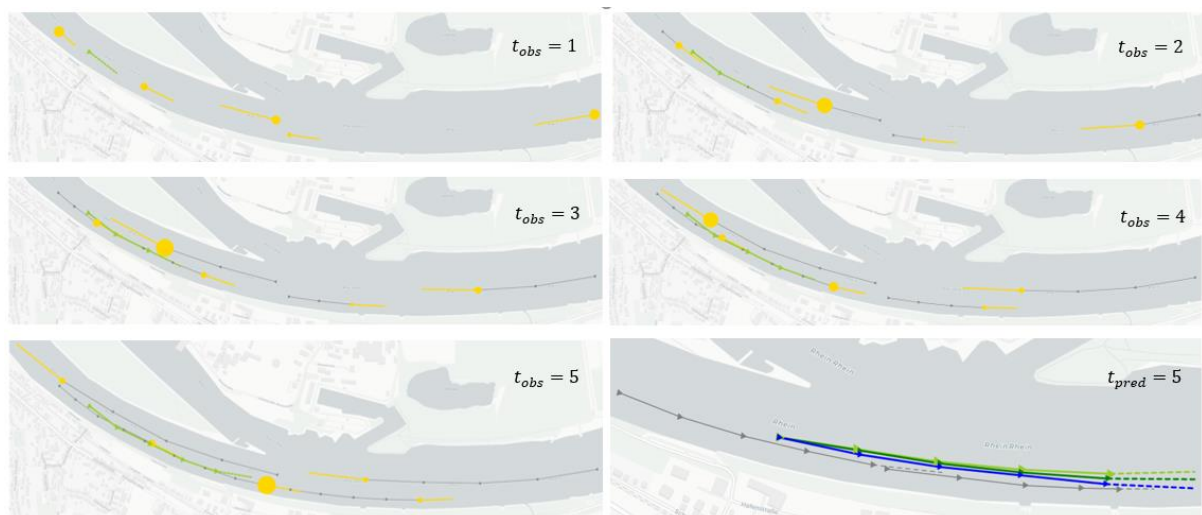


Abbildung 143 Visualisierung der vom STT-R-CSCT Modell den Umgebungsschiffen pro Beobachtungszeit-schritt (t_{obs}) zugeteilten Gewichten und Trajektorienprognose von R-CSCT (blau) und STT-R-CSCT (dunkelgrün). Gestrichelte Linien repräsentieren aktuelle Modelleingaben (bzw. Ausgaben unten rechts) für das Zielschiff (hellgrün) und die Umgebungsschiffe (gelb/grau). Die Größe der Kreise ist proportional zum Gewicht. Kartenkacheln von CartoDB unter CC-BY-3.0, Kartendaten von OpenStreetMap.

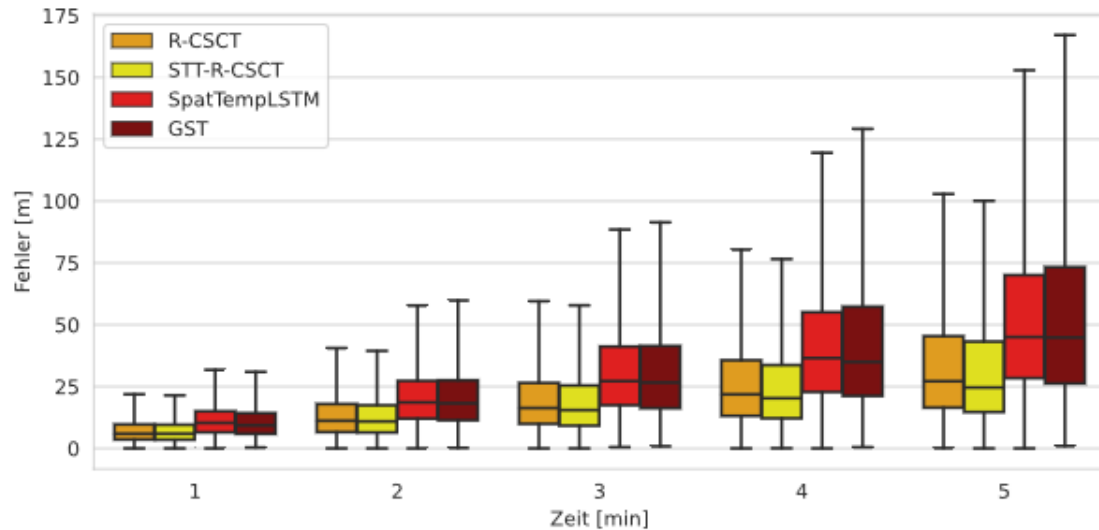


Abbildung 144: Vergleich des Vorhersagefehlers über den Vorhersagezeitraum von vorgeschlagenen Modellen und state-of-the-art Modellen.

16.2.3.3 Unsicherheitsanalyse

Um die Unsicherheit des entwickelten Trajektorienprognosemodells zu analysieren, wurde in [DONA2023] Monte Carlo Dropout ([SRIV2014] MC Dropout) nicht nur während des Trainings zur Vermeidung der Überanpassung sondern auch bei der Anwendung des trainierten Modells verwendet (vgl. [GAL2016]). Für ein und dieselbe Eingabe wurden so N verschiedene Ausgaben generiert, und die Streuung in den vorhergesagten Koordinaten lieferten Aufschluss über die Unsicherheit des Modells. In Abbildung 143 sind die Unsicherheiten der Modellvarianten G-CSCT, R-CSCT und N-CSCT (vgl. Abschnitt „Räumliches Situationsbewusstsein“, d.h. Modelle ohne Berücksichtigung von Interaktion) für eine Beispielergebnisse visualisiert.

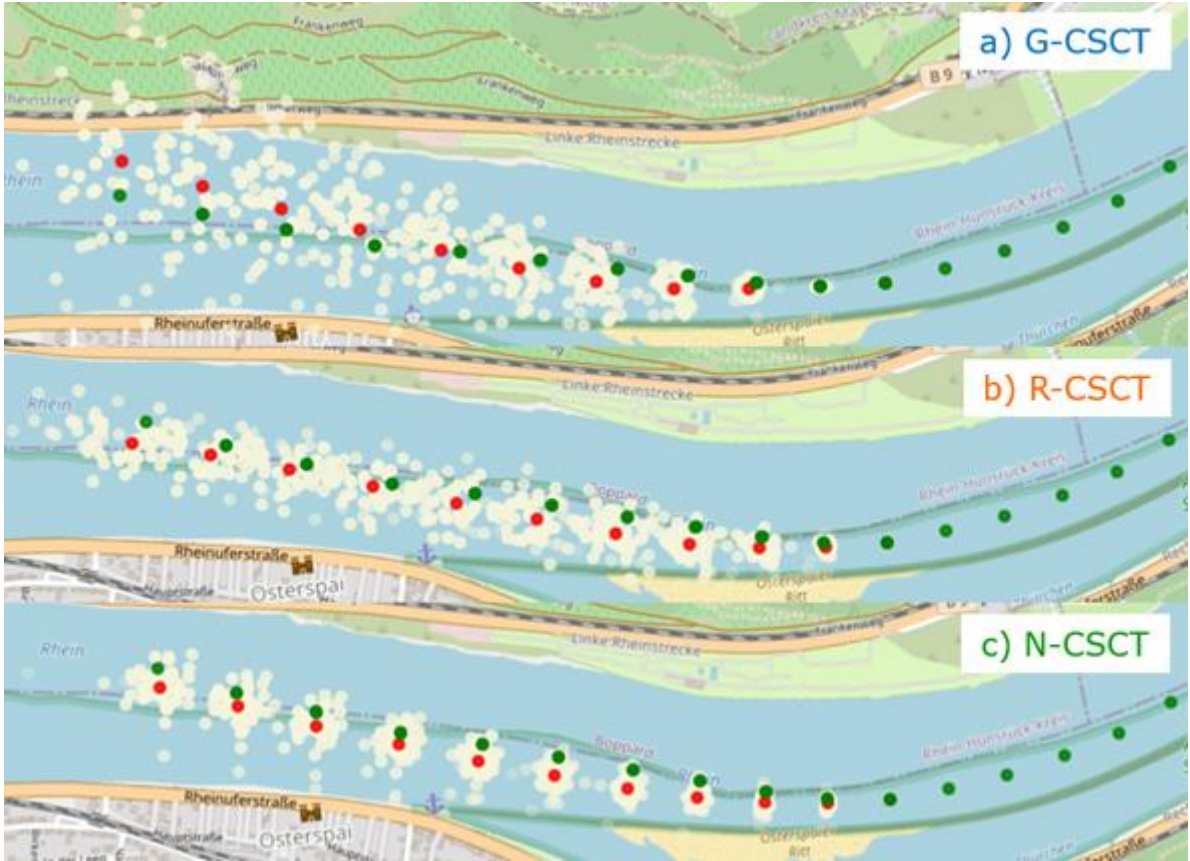


Abbildung 145: Vorhersage pro Modellvariante mit Unsicherheit. Grün: Eingabe und Zielausgabe, rot: finale Trajektorienprognose, beige: mittels MC Dropout erhaltene Trajektorienprognosen. Kartendaten unterliegen dem Urheberrecht von OpenStreetMap-Mitwirkenden und sind unter <https://www.openstreetmap.org> verfügbar.

Neben der schon durch Abbildung 141 ersichtlichen schlechteren Vorhersagen der Modellvarianten G-CSCT und R-CSCT weisen diese auch eine höhere Unsicherheit auf. Die Unsicherheit steigt außerdem erwartungsgemäß mit zunehmendem Vorhersagehorizont, wie in Abbildung 146 zu sehen ist. Die Unsicherheit zum Zeitpunkt ist definiert als die euklidische Norm der Standardabweichungen der Rechts- und Hochwerte der vorhergesagten Koordinaten:

$$u_t = \left\| \begin{matrix} \sigma_t^{\text{east}} \\ \sigma_t^{\text{north}} \end{matrix} \right\|$$

mit

$$\sigma_t^{\text{east}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{e}_t^i - \bar{\hat{e}}_t)^2}$$

und $\hat{e}_t^i$ der Rechtswerte der i -ten vorhergesagten Koordinate für Zeitschritt t ist, und $\bar{\hat{e}}_t$ das Mittel der Rechtswerte der vorhergesagten N Koordinaten für Zeitschritt t .

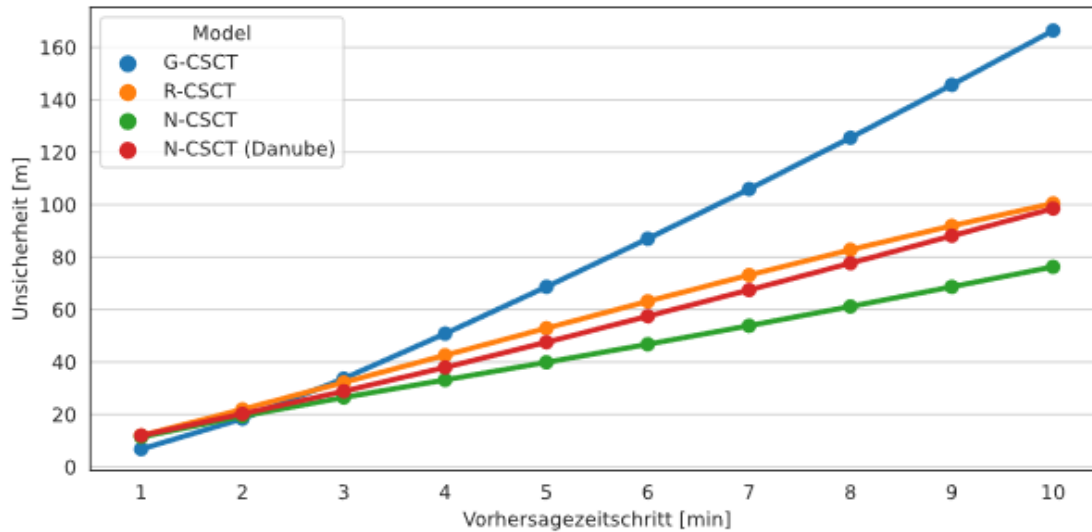


Abbildung 146 Entwicklung der Unsicherheit über den Vorhersagezeitraum hinweg. N-CSCT (Danube) bezeichnet ein für die Donau trainierte N-CSCT.

Der Zusammenhang zwischen Höhe des Vorhersagefehlers und Höhe der Unsicherheit wurde ebenfalls analysiert. Hierfür wurde als Vorhersagefehlermaß der ATE herangezogen und für ein analog definiertes Trajektorienvorhersage -Unsicherheitsmaß, die absolute trajectory uncertainty (ATU):

$$ATU = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n u_t^2}{n}}$$

wobei n die Anzahl der vorhergesagten Zeitschritte ist. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Modellvarianten herzustellen, wurden ATE und ATU pro Modellvariante normalisiert. In Abbildung 147 ist der ATE über ATU-Intervallen visualisiert.

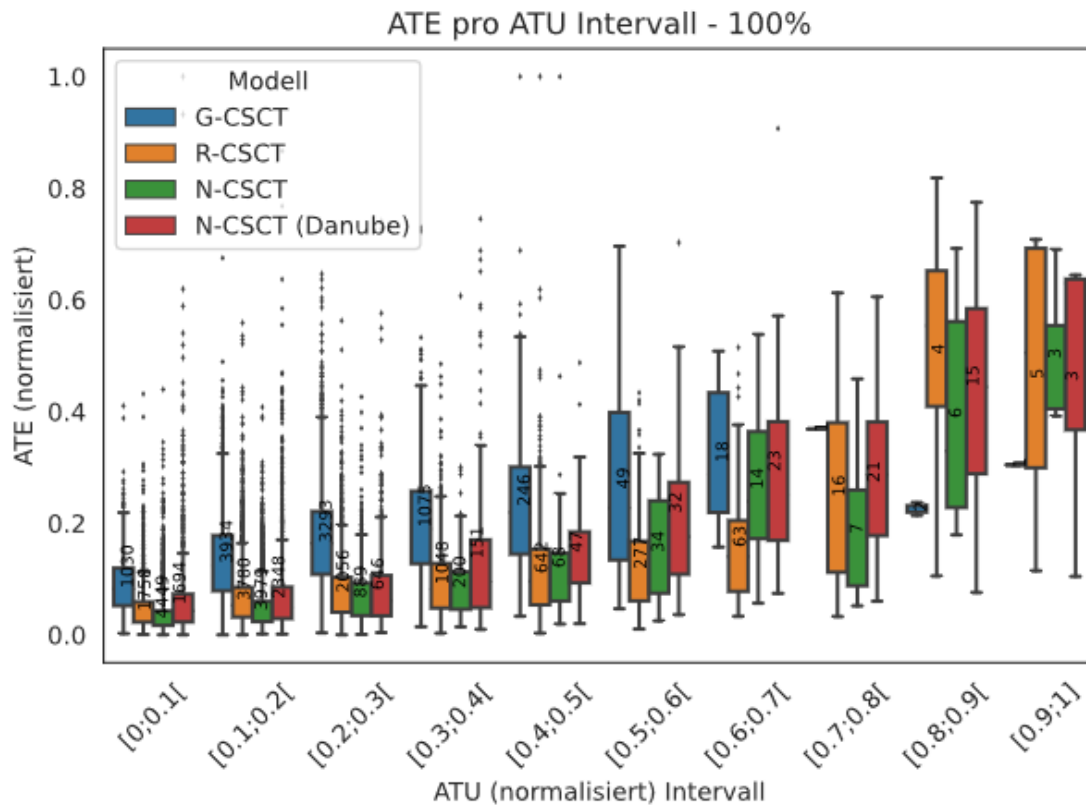


Abbildung 147 ATE pro ATU Intervall.

Es zeigt sich, dass ATU und ATE generell positiv korrelieren, d.h. dass eine höhere Unsicherheit des Modells in vielen Fällen auch eine höherer Vorhersagefehler bedeutet. Wie an den Whiskerlängen und Ausreißern zu sehen ist, gibt es aber auch Fälle, bei denen das Modell eine hohe Sicherheit bei schlechten Vorhersagen aufweist, und umgekehrt eine hohe Unsicherheit bei guten Vorhersagen aufweist. In zukünftigen Entwicklungen muss diese Problematik weiter analysiert werden.

16.3 Datenbank für Manövrierkoeffizienten

Für die Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Fremdschiffe wurden im Projekt verschiedene Ansätze verfolgt. Neben den oben beschriebenen datenbasierten Beschreibungen besteht ein weiterer Weg, das Bewegungsverhalten von Schiffen zu prognostizieren, indem einerseits das Steuerverhalten des Schiffsführers und andererseits das Bewegungsverhalten des Schiffs prognostiziert wird. Das Bewegungsverhalten des Schiffs wird durch ein parametrisches Manövriermodell beschrieben. In diesem Modell sind die Steuergrößen δ (Ruderwinkel) und n (Propellerdrehzahl) diejenigen, die der Schiffsführer beeinflussen kann. Die Prognose des Steuerverhaltens des Schiffsführers besteht also in der Prognose, mit welchem Ruderwinkel und welcher Propellerdrehzahl der Schiffsführer fährt.

Hierfür wurde aus den Bestandsdaten des DST Typschiffe identifiziert, für die Manövriermodelle vorlagen und diese in die mathematische Beschreibung des von der UDE erstellten Manövriermodells übertragen.

In der weiteren Entwicklung stellte sich heraus, dass eine konkrete „Modellierung“ des Schiffsführers außerhalb des Rahmens dieses Projekts liegt. Allerdings bietet der Ansatz die Möglichkeit von einer gegebenen Verkehrssituation aus mit den Manövriereigenschaften des Schiffs zu extrapolieren. Aus den über AIS empfangenen Daten wird ein dem betrachteten Fremdschiff möglichst ähnliches Typschiff aus der Datenbank ausgewählt. Ausgehend der aktuellen Position, Lage und Geschwindigkeit des

Fremdschiffes können dann die möglichen Bahnen des Schiffes für alle Ruderwinkel und Propellerdrehzahlen extrapoliert werden. In diesem Strauß möglicher Bahnen kann die wahrscheinlichste identifiziert werden. Mit einem individuellen Modell des Schiffsführers könnte in Zukunft nicht nur eine einfache Bahn, sondern auch ein sich aus der Verkehrssituation ergebendes Manöver (z. B. Überholen oder Ausweichen), extrapoliert werden.

17 Entwicklung von Algorithmen für eine sichere und assistierte Schiffsführung

17.1 Implementierung Navigationsfilter

Die Zustandsbestimmung des aktuellen Schiffszustands (Position, Lage, Geschwindigkeit und Drehraten) wird als eine unverzichtbare Grundlage bei der Schiffsführung eingestuft. Für das Binnenschiff, welches in der Regel eine große Bauform darstellt, ist eine Positionierungsgenauigkeit in Zentimeterbereich und ein Orientierungsfehler unterhalb eines Grads in engen Bereichen (z. B., Hafenbereich) erforderlich, um die automatischen Anlegevorgänge zu ermöglichen. Zustandsdaten dieser Präzision sind meist nur durch die Nutzung einer Kombination von Sensorbeobachtungen im Rahmen eines Fusionsalgorithmus bestimmbar. Häufig wird eine Kombination von GNSS-Daten und Inertialsensordaten (IMU) verwendet, was eine geschickte Ausnutzung der Vorteile der Einzelsensoren erlaubt. Im Projekt wurde die Navigationslösung auf Basis der Sensorfusion mit einem Dual-Antennen-GNSS-Empfänger und einer kommerziellen Inertialmesseinheit (IMU) entwickelt. Als inertielle Messeinheit wird eine 9-DOF-MEMS-IMU des Modells LORD Microstrain 3DM-GX5-25 verwendet, welche mit der Industriesteuerung via RS-232 kommuniziert. Diese liefert Beschleunigungen in drei Raumrichtungen, die Orientierung in drei Raumrichtungen und als GNSS-Empfänger wird ein Novatel PwrPak 7D mit zwei GPS1000-Antennen der Marke Harxon verwendet, welche im Abstand von 4 m auf dem Dach des Steuerhauses montiert sind. Durch die zwei Antennen stellt der Novatel einen GNSS-Kompass zur Verfügung. Die GNSS-Korrekturdaten aus dem Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS) der unterschiedlichen Bundesländer wurden zum Pre-Processing der GNSS-Beobachtungen online abgerufen. Da eine hochgenaue Zeitreferenz der unterschiedlichen Hardware nicht vorhanden ist, wurde das 1-Pulse-per-Second (1PPS) Signal vom GNSS-Empfänger benutzt, um die Sensordaten zu synchronisieren. Abbildung 148 stellt eine grobe Hardwarestruktur der Navigationslösung dar.

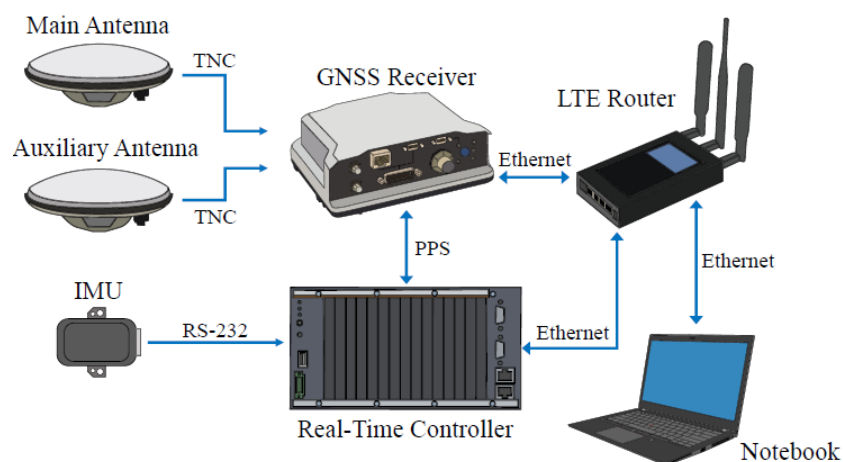


Abbildung 148 Sensor und Rechenhardware in RWTH-Navigationslösung [RWTH1]

Im Projekt FernBin setzt sich die Navigationslösung generisch aus drei Teilen: Daten-Pre-Processing, Integritätsprüfung, und Navigationsalgorithmus, siehe Abbildung 149. In dem Pre-Processing Modul

werden die rohen Sensordaten transformiert und vorgefiltert. Außerdem werden die notwendigen Zwischengrößen (z. B., Satellitenposition) für die Navigationsalgorithmen berechnet. Anschließend folgt eine Integritätsprüfung, wo die Qualität der einzelnen Satelliten-Beobachtung mithilfe einer klassischen Redundanz-basierten Methode [RWTH2] und einer neuartigen Deep-Learning-basierten Methode [RWTH-IRT3] bewertet wird. Die verarbeiteten Daten werden im Navigationsalgorithmus zur Bestimmung der Schiffszustände zusammen fusioniert. Dazu wurden im Projekt zwei Algorithmentypen implementiert und geforscht. Zum einen wurde eine filterbasierte Basislösung mithilfe eines Unscented Kalman-Filters in der Schifffahrt implementiert. Um die Positionierungsgenauigkeit und -robustheit der Zustandsbestimmung zu erhöhen, wurde parallel ein neuartiger optimierungsbasierter Fusionsalgorithmus entwickelt und mit der Basislösung verglichen.

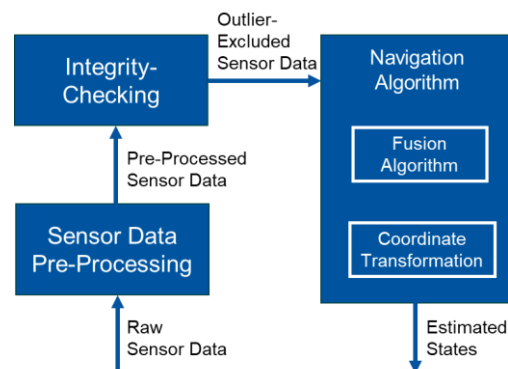


Abbildung 149 Überblick der Navigationslösung

Nachfolgend werden die zwei unterschiedlichen Navigationsalgorithmen und die Integritätsprüfung vorgestellt.

Filterbasierter Navigationsalgorithmus: Als eine Basislösung wurde ein bestehendes Kalman-Filter zur Sensorfusion (Navigationsfilter) dieser Daten für den vorliegenden Fall stark angepasst und um weitere Funktionalitäten erweitert. Abbildung 150 stellt das Software-Modell der filterbasierten Navigationslösung dar. Die Softwareausführung des Navigationsfilters wird dabei auf einer Industriesteuerung des Modells Bachmann MH230 umgesetzt, welche mittels Codegenerierung aus MATLAB/Simulink heraus programmiert wird. Das Pulse-Per-Second (PPS) Signal des GNSS-Empfängers wird zur zeitlichen Synchronisierung der Inertialsensor- und GNSS-Daten genutzt. Das Signal ist mittels eines Optokopplers galvanisch getrennt und auf eine höhere Spannung für die Bachmann MH230 gesetzt. Mittels eines Mobilfunkrouters werden RTCM-Korrekturdaten von externen Servern des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS aus unterschiedlichen Bundesländern bezogen und entweder direkt an den GNSS-Empfänger oder an die Industriesteuerung geleitet.

Der Wirkungsplan des Navigationsfilters lässt sich in Abbildung 151 darstellen. Eine Hybrid-Kopplung der GNSS-Daten wurde im Projekt implementiert, um die Robustheit und Genauigkeit der Zustandsbestimmung gleichlaufend zu gewährleisten. Im offenen Bereich, wo eine komplette Sichtbarkeit zu den Satelliten verfügbar ist, fusioniert das Navigationsfilter die Position, Velocity, und Altitude (PVA)-Lösung des GNSS-Empfängers in einer losen Kopplung, welche einen Positionierungsfehler von maximal 2cm aufweist. Somit können die prädierten Schiffszustände der IMU korrigiert und eine hochgenaue Positionierung (Positionierungsfehler < 2 cm) bereitgestellt werden. In den Szenarien wie z.B., Brückendurchfahrt und Schleusenfahrt, wo die GNSS-PVA-Solution aufgrund der Signalstörungen eine hohe oder inkonsistente Unsicherheit (≥ 5 m) aufweist, werden die vorverarbeiteten rohen GNSS-Beobachtungen (Pseudorange und Dopplerschift) ins Navigationsfilter integriert, um einen schlagartigen Positionierungsfehler zu vermeiden.

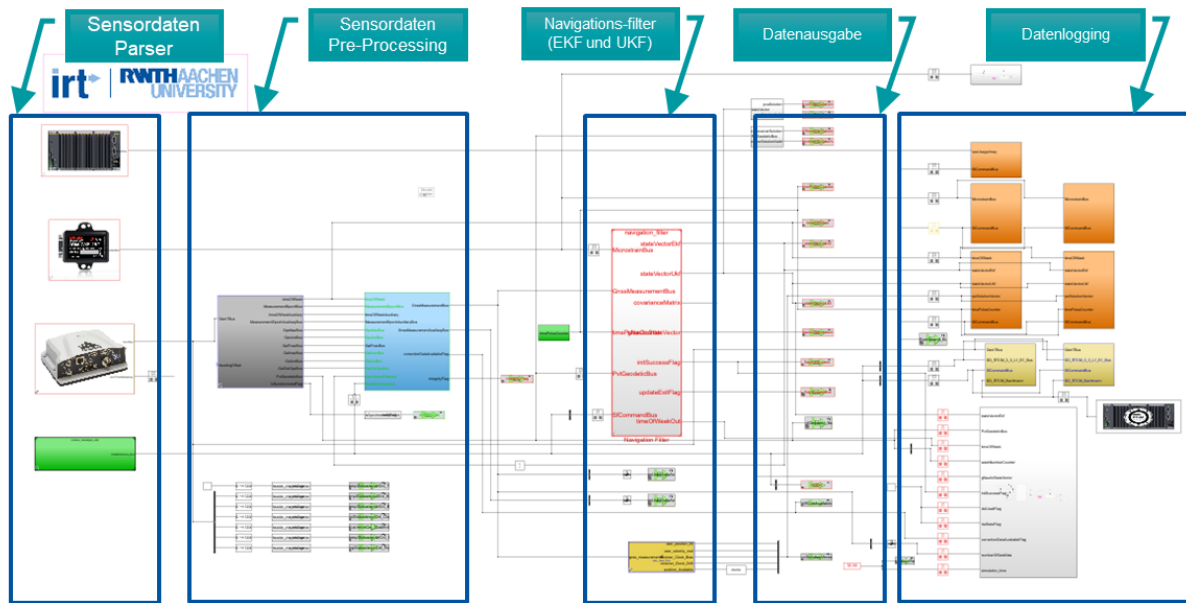


Abbildung 150 Flussdiagramm der Softwareimplementierung des IRT-Navigationsfilters

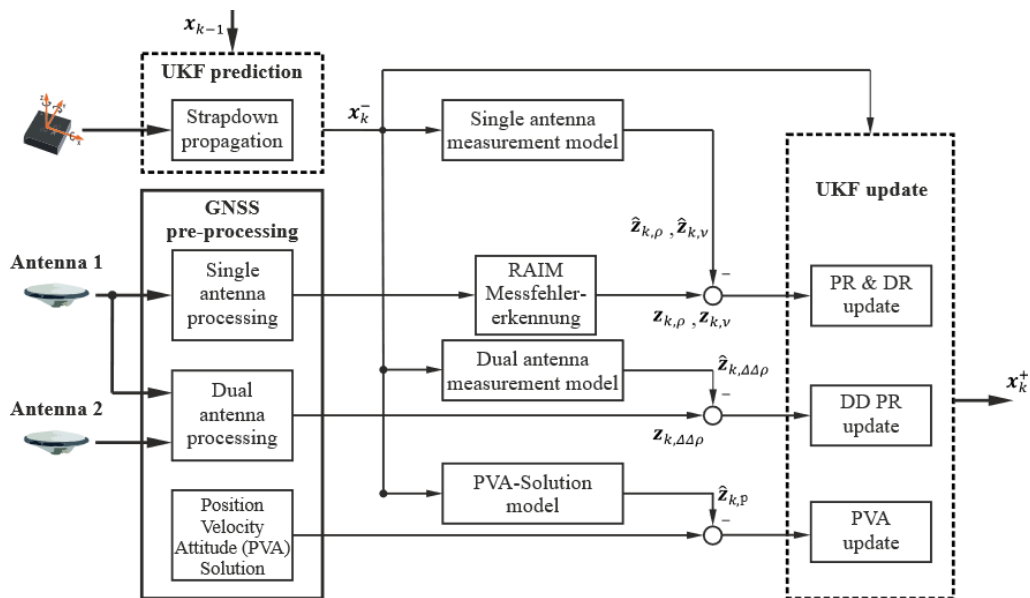


Abbildung 151 Wirkungsplan des IRT-Navigationsfilters

Die Ergebnisse des Navigationsfilters werden mittels Ethernets an den OPC-UA-Server weitergeleitet, über den auch Interaktionsmöglichkeiten mit dem Navigationsfilter möglich sind. Des Weiteren wird die OPC-UA Schnittstelle zum Start des Rohdaten-Loggings und zur Re-Initialisierung des Filters genutzt. Abbildung 152 zeigt die Lokalisierungsergebnisse aus einer Dauertestfahrt am Duisburg-Hafen mit dem IRT-Navigationsfilter. Die Peaks entsprechen dabei den Brückendurchfahrten, die zu einem erhöhten Positionsfehler führen.

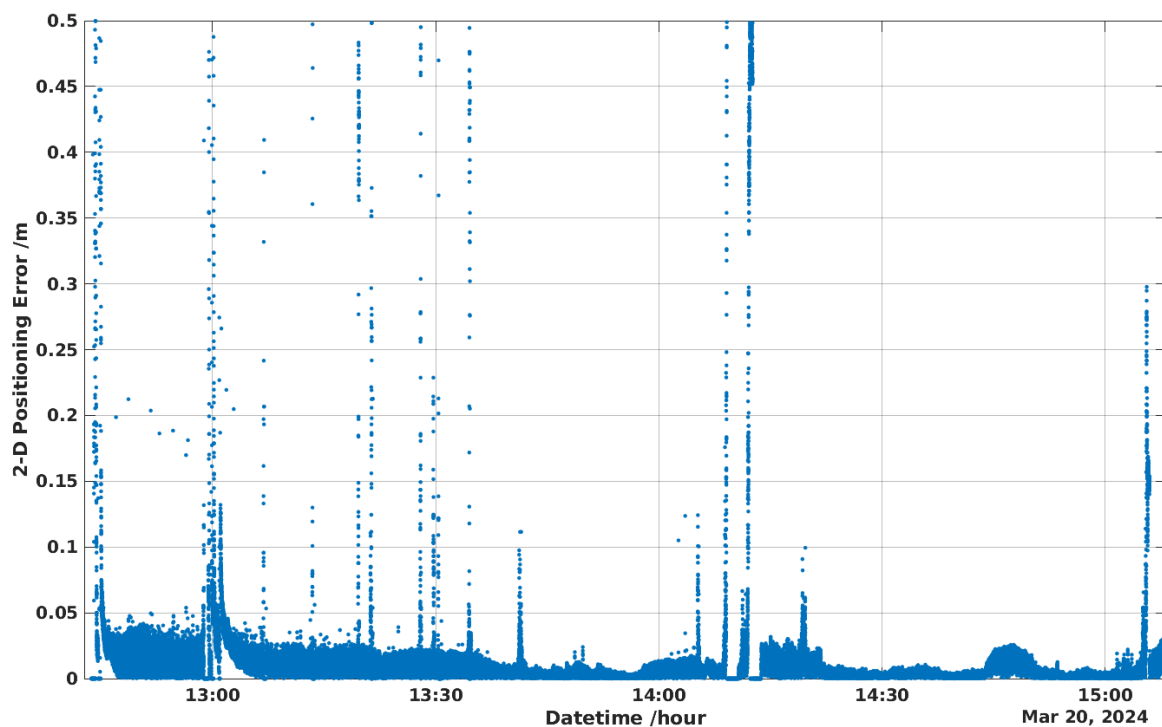


Abbildung 152 2-D Lokalisierungsfehler des Hybrid-Navigationsfilters

Optimierung-basierter Navigationsalgorithmus:

In herausfordernden Szenarien wie der Brückendurchfahrt zeigen sich häufig die Limitierungen einer filterbasierten Navigationslösung, sodass ein signifikanter Lokalisierungsfehler unvermeidbar ist. Dieses Problem lässt sich in der Theorie auch mathematisch abbilden, dass ein Kalman-Filter, unabhängig von den implementierten Methoden der nichtlinearen Transformation (Linearisierung mit Taylorreihen erster Ordnung oder mit Unscented-Transformation), aufgrund der starken Annahmen eine inkonsistente Unsicherheitsabbildung im Messmodell aufweist [RWTH3]. Somit überwiegt ein unbekannter Modellierungsfehler im Kalman-Filter, welcher den geschätzten Zuständen falsch abbildet. Insbesondere führt dieses Problem häufig zu einer kompletten Divergenz des Kalman-Filters. Um dieses Problem zu lösen, wurde im Projekt ein neuartiger Algorithmus zur Multi-Sensor-Fusion basiert auf der Faktor-Graph-Optimierung entwickelt [RWTH-IRT1].

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

Abbildung 153 zeigt den Faktor-Graph Ansatz, welcher im Projekt entwickelt wurde. Das Faktor-Graph besteht aus den unbekannten Schiffszuständen $x_t, t = 0 \dots k$ in k Zeitschritten, die mithilfe von den zuständigen Messgrößen bestimmt werden. Die Messgrößen sind als Faktoren mittels der relevant mathematischen Modellierung im Graph formuliert. Ein nichtlinearer Gauss-Netwon-basierter Solver wird benutzt, um die Schiffszustände zu optimieren. Eine Übersicht der optimierungsbasierten Navigationslösung ist in Abbildung 154 dargestellt. Diese Navigationslösung nutzt die gleichen Eingangsgrößen wie das IRT-Navigationsfilter und stellt die geschätzten Schiffszustände mit 100Hz zur Verfügung.

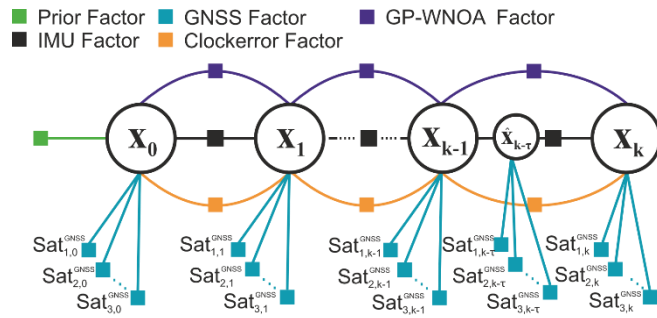


Abbildung 153 Entwickelter Faktor-Graph Ansatz

Der entwickelte Faktor-Graph-Ansatz wurde mit den Daten einer Messfahrt im Dortmund-Ems-Kanal erprobt und gegen die filterbasierte Methode (eng gekoppeltes IRT-Navigationsfilter) evaluiert. Abbildung 158 zeigt den Versuchsträger mit den Sensoren. Eine Messfahrt wurde mit dem Testschiff „Dateln“ vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) durchgeführt, um die Sensordaten im Dortmund-Ems-Kanal aufzunehmen.

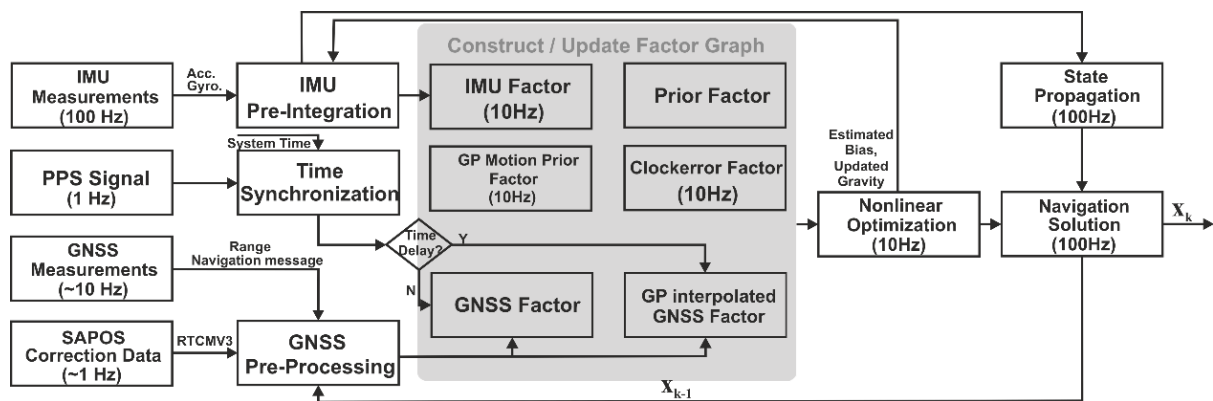


Abbildung 154 Optimierungsbasierte Navigationslösung

In der Messfahrt enthält eine 17km Fahrstrecke zwischen der Waltrop-Schleuse und dem Dortmunder-Hafen. Während der 40-minütigen Fahrt passiert das Schiff mehrere Brücken. Die Ergebnisse dieses Ansatzes sind in Abbildung 156 und Abbildung 155 dargestellt. In Abbildung 156 ist zu beobachten, dass der neue Ansatz mit dem Gaußschen-Prozess-Bewegungsmodell (FGO-GP in Grün) die geringste Abweichung aufweist, während das Navigationsfilter (UKF) einen signifikanten Lokalisierungsfehler zeigt. Abbildung 155 zeigt die 2-D Lokalisierungsfehler beider Algorithmen. Dort ist festzustellen, dass der optimierungsbasierte Ansatz bei den Brückendurchfahrten, wo die GNSS-Messungen stark veräuscht sind, bessere Genauigkeit im Gegensatz zum Navigationsfilter zeigt.

Der neuartige Navigationsalgorithmus basierend auf der Faktor-Graph-Optimierung wurde in der Publikation [RWTH-IRT1] veröffentlicht. Ein Video ist zu diesem Forschungsergebnis verfügbar⁶.

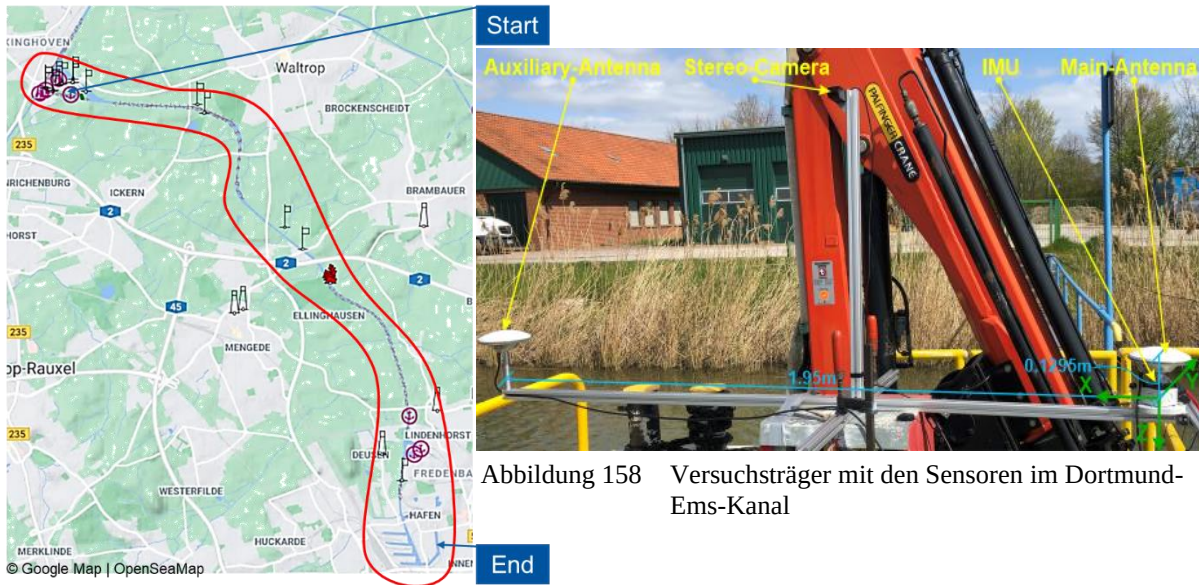


Abbildung 157 Route der Messfahrt



Abbildung 158 Versuchsträger mit den Sensoren im Dortmund-Ems-Kanal

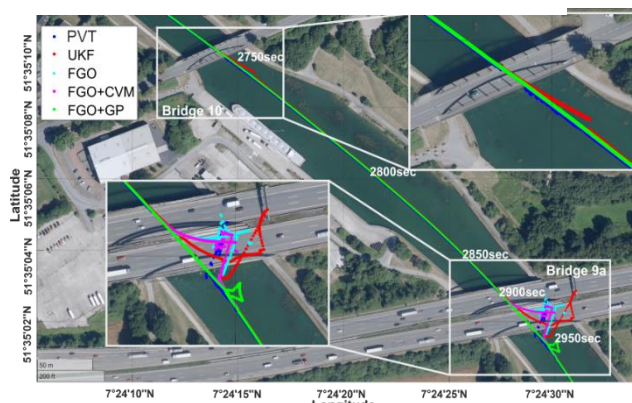


Abbildung 156 Schiffstrajektorien mit unterschiedlichen Algorithmen

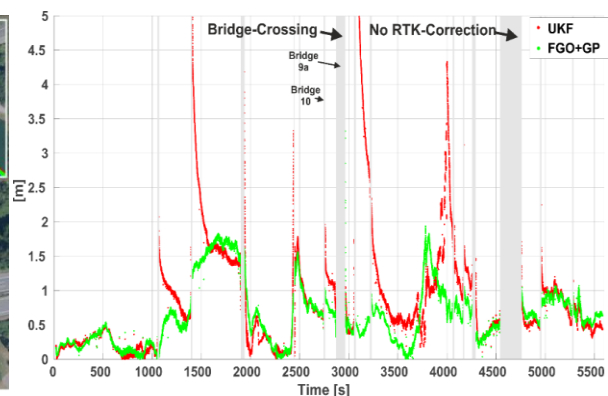


Abbildung 155 Schiffstrajektorien mit unterschiedlichen Algorithmen

Integritätsprüfung: Weiterer Bestandteil der Navigationslösung war die Ergänzung um ein Integritätsprüfungsverfahren der GNSS-Beobachtungen. Dafür hat die RWTH zwei Methoden im Projekt implementiert: ein klassischer Ansatz „Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)“ aus der vergangenen Arbeit [12] und ein neuartiger Ansatz, welcher mittels einer Deep-Learning-Methode die fehlerbehafteten GNSS-Messungen detektiert. Wie Abbildung 15 zeigt, wurde das RAIM-Verfahren nach dem Sensordaten Pre-Processing implementiert, um die fehlerhaften GNSS-Beobachtungen zu erkennen und von der Fusion auszuschließen. Das RAIM-Verfahren überprüft die Integrität der empfangenen GNSS-Beobachtungen basierend auf dem statistischen Chi-Test mit residualen Messabweichungen der GNSS-Pseudoranges. Somit kann die Chi-square-Wahrscheinlichkeitsverteilung in RAIM berechnet werden, um ein Alarm-Level bei der Fehlererkennung zu schätzen [RWTH-IRT3]. Allerdings setzt sich das RAIM-Verfahren den Empfang redundanter GNSS-Messungen (> 6 Beobachtungen) voraus. Daher ist dieser Ansatz in herausfordernden Szenarien, z.B., bei Brücken- und Schleusedurchfahrten, wo eine maßgebliche Signalausstattung nicht vermeidbar ist, nicht einsatzbar.

⁶ https://youtu.be/FgEeISTtr-k?si=CmMV9jee_vOy-WlP

Um diese Limitierung der Integritätsprüfung zu vermeiden, wurde im Projekt ein neuartiges Verfahren zur Integritätsprüfung der GNSS-Beobachtungen basierend auf dem maschinellen Lernen entwickelt. Abbildung 159 stellt das Konzept dieses Verfahrens dar. Dabei wurde ein neues neuronales Netz konstruiert, welches auf Basis der Signaleigenschaften eine raumzeitliche (engl., spatiotemporal) Modellierung der GNSS-Beobachtungen abbildet. Während der Inferenz nutzt das Netz die extrahierten Features aus den rohen GNSS-Messungen als Eingangsgrößen. Als Ausgangsgrößen werden zwei Ergebnisse bereitgestellt: binäre Klassifizierung der Integrität und Regression des möglichen Fehlers der einzelnen Satelliten-Beobachtung in Meter. Abbildung 160 präsentiert die Architektur des entwickelten neuronalen Netzes, welches mit der folgenden Gleichung beschreiben lässt

$$[\mathcal{V}_T^k \ \hat{\varepsilon}_T^k] = \text{NN}(\{\text{El}_\tau^k \ \text{Az}_\tau^k \ \text{C/N0}_\tau^k \ \sigma_\tau^k \ \text{RSS}_\tau^k\}_{\tau=1}^T)$$

wo die Variable $\mathcal{V}_T^k$ die Qualität der GNSS-Beobachtung zum Zeitpunkt T identifiziert und die Größe $\hat{\varepsilon}_T^k$ einen möglichen Messfehler der Messung aus dem Satelliten k in Meter schätzt. Das neuronale Netz $\text{NN}(\cdot)$ nimmt eine zeitliche Sequenz der Feature-Vektoren in einem Zeitfenster von $\tau = 1 \dots T$ als Input. Der Feature-Vektor beinhaltet die Basiskenngrößen über die Messqualität und geometrische Information der Satelliten. Dabei werden die Elevation-Winkel El_τ^k , die Azimuth-Winkel Az_τ^k und die Signalstärke C/N0_τ^k der Satelliten k zum Zeitpunkt τ aus den empfangenen GNSS-Daten berechnet. Die Features σ_τ^k beschreibt den Messfehler aus einem vorverarbeiteten Least-Square Positionierungsalgorithmus und das Feature RSS_τ^k bildet den quadratischen Mittelwert des vergangenen Messfehlers σ_τ^k , $\tau = 1 \dots T$ ab. Das Netz besteht aus drei Komponenten. Das Long-Short-Term-Memory (LSTM)-Netz modelliert die zeitliche Signalvermehrung der GNSS-Beobachtungen. Anschließend verarbeitet ein Attention-Mechanismus die hochdimensionale Featuremap aus dem LSTM-Netz, um eine räumliche Korrelation der zeitlichen Information aufzubauen. Die bearbeiteten Features mit der zeitlichen Information der einzelnen Satelliten werden über ein bidirektionales LSTM-Netz kombiniert. Das Endergebnis lässt sich über zwei Multi-Layer-Perzeptron berechnen. Somit kann eine Klassifizierung der Satellitenintegrität und eine Schätzung des Messfehlers bereitgestellt werden. Zum Antrainieren des neuronalen Netzes wurde ein Teil (80%) der Daten aus herausfordernder urbaner Umgebung in der Stadt Hong Kong (HK) und Aachen (AC) benutzt. Die restlichen Daten wurden zum Testen des Netzes eingesetzt.

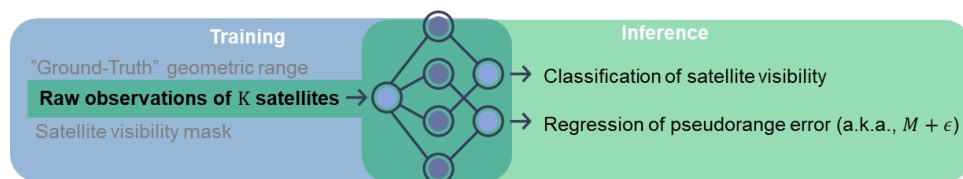


Abbildung 159 Konzept der neuartigen Deep-Learning-basierten Integritätsprüfung

Das Ergebnis der entwickelten Methode ist in der Abbildung 161 gezeigt. Im Vergleich zu anderen Referenzmodellen, z. B., den klassischen Algorithmen aus dem maschinellen Lernen, zeigt das entwickelte neuronale Netz sowohl bessere Genauigkeit als auch eine verbesserte Generalisierung.

Die neue Methode zur Integritätsprüfung basierend auf Deep Learning wurde in der Publikation [RWTH-IRT3] veröffentlicht. Ein Video zu diesem Forschungsergebnis ist verfügbar⁷.

⁷ <https://youtu.be/PnXXofByEE0>

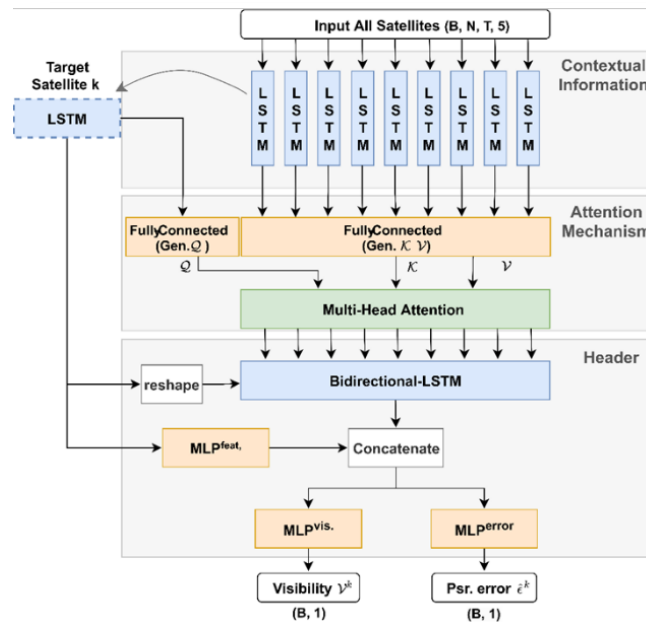


Abbildung 160 Die Architektur des entwickelten neuronalen Netzes.

TABLE II: Performance Metrics using HK Dataset.

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

TABLE III: Performance Metrics using AC Dataset.

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

Abbildung 161 Testergebnis zur Klassifizierung der fehlerbehafteten GNSS-Beobachtungen mittels der lernbasierten Methode zur Integritätsprüfung.

17.2 Hinderniserkennung

Die Hinderniserkennung basiert im Wesentlichen auf einer sequentiellen Auswertung der Radarbilder. In den Bildern werden zusammenhängende Bereiche extrahiert. In einem Modul zur Objektverfolgung wird geprüft, ob im nächsten Bild ein ähnliches Echo in diesem Bereich wieder auftritt. Wenn ja wird ein Track initialisiert, der intern ein mathematisches Modell für eine Schiffsbewegung enthält. Im Rahmen eines Kalman-Filters aktualisieren darauffolgende Messungen das Modell, sodass man als Ergebnis eine Schätzung für die Position und Geschwindigkeit des Radarziels erhält.

Im Bereich der Binnenschifffahrt sind im Radarbild immer eine große Anzahl von Echos zu sehen, die vom Land oder Büschen, Bäumen und Bauwerken dort herrühren. Es ist daher ein entscheidender Schritt, Landechos schon früh in der Verarbeitung ausschließen zu können. Hierfür werden aus der Karte Polygone extrahiert, die die Landfläche oder andere, von der Verarbeitung auszuschließende Bereiche umhüllen.

Die Routine zur Extraktion dieser Konturen aus der Karte wurde überarbeitet und um weitere zu berücksichtigende ECDIS-Objekte erweitert.

Für die Bereitstellung von Informationen von Radarzielen gibt es internationale Standards, die aus dem Bereich der Flugsicherung kommen. Der sogenannte Asterix Standard (All Purpose Structured

Eurocontrol Surveillance Information eXchange) wurde ausgewählt, um die Ergebnisse der Objektverfolgung anderen Applikationen über einen Netzwerkport zur Verfügung zu stellen. Aus dem Asterix-Standard wurden Nachrichten entsprechend CAT10 und CAT62 genutzt, um die Daten der Radarziele bereitzustellen.

17.3 Erfassung von Situationen mit red. Leichtigkeit

Zur weiteren Bearbeitung wurden durch die Weiterentwicklung des „Observers“ bereits erste Daten aus Simulationsergebnissen gesammelt, mit denen Situationen mit reduzierter Sicherheit und Leichtigkeit erfasst und ausgewertet werden können.

Eine Literatursichtung ergab, dass die von der PIANC WG 141 herausgegebenen „Design Guidelines for Inland Waterways“ eine gute Grundlage für die Erstellung eines universellen Bewertungsschemas bietet. Basierend auf den hier aufgeführten Kategorien der Sicherheit und Leichtigkeit für verschiedene Wasserstraßenabschnitte und Verkehrssituationen sollen Algorithmen zur automatisierten Bewertung erstellt werden.

Die Definition von Situationen orientiert sich eng an den „Design Guidelines for Inland Waterways“ der PIANC WG 141. Hier kann der Ansatz zur Analyse zur Bewertung vorhandener Wasserstraßen genutzt und automatisiert abgeprüft werden.

Es wird dabei unterschieden zwischen

- Wasserstraßenbezogenen Kriterien
 - Es werden Parameter wie Fahrrinnenbreite, Häufigkeiten von Interaktionen im betrachteten Abschnitt sowie Wasserstraßeninfrastruktur entlang der Strecke ermittelt und mithilfe einer Ranking-Score bewertet
- Geschwindigkeitsbezogene Kriterien
 - Zur Feststellung der Leichtigkeit dient unter anderem die Analyse der Schiffsgeschwindigkeiten. Diese werden situationsbezogen mit der maximal zulässigen Schiffsgeschwindigkeit im betrachteten Abschnitt und den dortigen Durchschnittsgeschwindigkeiten verglichen und bewertet.
- Verkehrsdichte-bezogene Kriterien
 - Um den Einfluss der Verkehrsdichte auf den Verkehr zu bewerten, erfolgt eine Auswertung der Schiffstypen, die im betrachteten Zeitraum die Strecke befahren sowie eine statistische Betrachtung der Durchfahrtsraten. Zusätzlich wird geprüft, ob Geschwindigkeitsänderungen infolge anderer Fahrzeuge in den beobachteten Situationen auftreten.

Schließlich wurden die Algorithmen für die Auswertung der Situationen entwickelt und in das Reporting Tool implementiert.

Um die zuvor definierten Kriterien zur Auswertung der Verkehrssituationen anhand aufgetretener Parameter abgleichen zu können, wurden weitere Auswertealgorithmen entwickelt. Zur einfachen Feststellung der Verkehrsdichte wurde beispielsweise ein „TrafficDensitySituationObserver“ implementiert, der eine Statistik über durchfahrende Schiffe pro Streckenabschnitt (z.B. Hektometer) generiert. Um beispielsweise die Situation an Wasserstraßenkreuzungen oder Hafeneinfahrten zu betrachten gibt es zudem einen „CrosssectionFilter“, der Durchfahrtsstatistiken an einem vorgegebenen Querschnitt erstellt.

Ein Beispiel für die Bewertung von Wasserstraßen-bezogenen Kriterien ist in Abbildung 162 dargestellt.

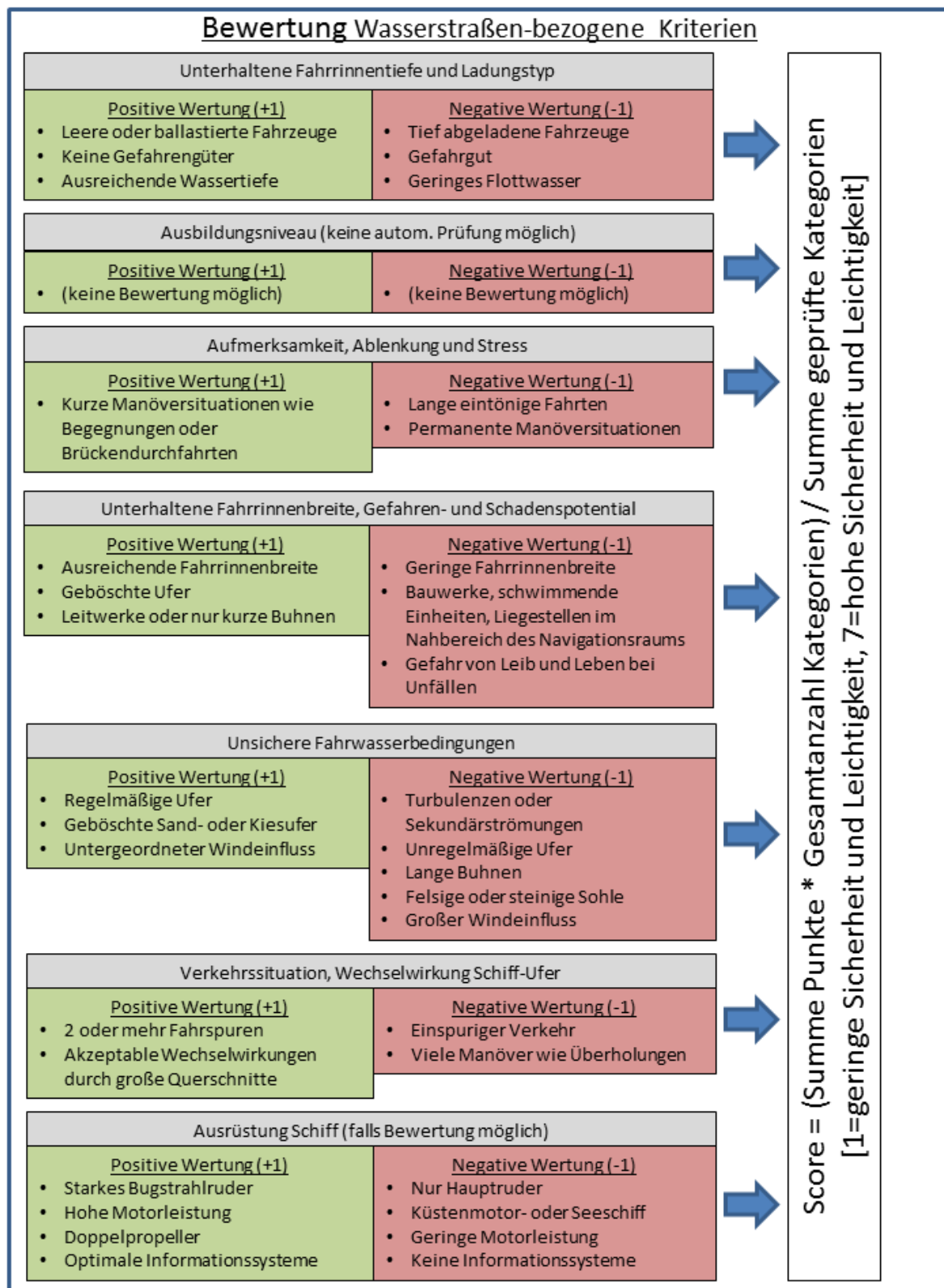


Abbildung 162: Schema zur Bewertung wasserstraßen-bezogener Kriterien

Zur Erfassung der Situationen mit reduzierter Sicherheit und Leichtigkeit wurden die zuvor aufbereiteten Bewertungsparameter (siehe Zwischenbericht Nr. 5 Abschnitt 3.5 sowie Zwischenbericht Nr. 6 Abschnitt 3.4) in Algorithmen umgesetzt und in Form einer Filterkette implementiert.

Hier werden die durch „mikroVon-Kaskade“ berechneten Ergebnisse (z.B. Begegnungen) sowie zugehörige Grundlagendaten (Schiffsgrößen, Gewässerdaten, etc.) hinsichtlich der Bewertungsparameter geprüft und bewertet.

Als Resultat erhält man beispielsweise georeferenzierte Begegnungspunkte, die mit einer Einstufung der Sicherheit und Leichtigkeit versehen wurden. Nicht alle in der Bewertungsmatrix aufgeführten Parameter können anhand der AIS-Daten der Schiffe bewertet werden, so ist beispielsweise der Tiefgang nicht immer als Wert im Datensatz aufgeführt (freiwillige Angabe der Schiffsführer). In einem solchen Fall wird die Bewertung nur anhand der Parameter durchgeführt, die aus den verfügbaren Daten geprüft werden können. Auf diese Weise ist stets eine Bewertung möglich, ein robustes Ergebnis ist allerdings von einer guten Datenlage abhängig.

Nachfolgend ist in Abbildung 163 eine Testbewertung mit Begegnung Eigenschiff (üGMS, abgeladen, 3 Blaue Kegel) mit Fremdschiff (GMS, leer, keine Blauen Kegel), Begegnung in 160 m Abstand zu einer Brücke in einem Wasserstraßenabschnitt mit 35.000 Schiffspassagen pro Jahr dargestellt.

Die Parameter beider Schiffe werden hier für 5 Kategorien (linke Bildhälfte) geprüft (rechte Bildhälfte) und schließlich die Interaktion für die beiden Einzelschiffe separat und für die Begegnung als Mittel beider schiffsspezifischen Bewertungen klassifiziert.

Nach diesem Schema können automatisierte Kategorisierungen von Situationen mit reduzierter Sicherheit und Leichtigkeit durchgeführt werden, um diese auf einer digitalen Wasserstraße anzuzeigen (exemplarisch dargestellt in Abbildung 164), dem Schiffsführer zur Verfügung zu stellen und bei einem ausreichend großen AIS-Datensatz statistische Auswertung zu (Teil-)Abschnitten der Bundeswasserstraßen zu generieren.

Parameter	Bewertung	Rechenwert	S _{einzel}	Eigenschiff	Fremdschiff
Blaue Kegel	Anzahl = 0		1		X
	Anzahl = 1		0,5		
	Anzahl = 2		-0,5		
	Anzahl = 3		-1	X	
Tiefgang zu Wassertiefe	< CEMENT V	tS < 0,9*tS _{max}	1		X
	CEMENT V	tS ≥ 0,9*tS _{max}	-1	X	
Schiffsbreite	< CEMENT III	≤ 8,2	1		
	CEMENT III	< 9,5	0,5		
	CEMENT IV	< 11,4	-0,5		
	CEMENT V	≥ 11,4	-1	X	X
Bauwerk	Distance_zu_Obj_Class_0 > 1,4 IS		1		
	Distance_zu_Obj_Class_1 > 1,4 IS		0,5		X
	Distance_zu_Obj_Class_0 < 1,4 IS		-0,5		
	Distance_zu_Obj_Class_1 < 1,4 IS		-1	X	
Verkehrsdichte	< 5.000 S/a		1		
	< 15.000 S/a		0,5		
	< 30.000 S/a		-0,5		X
	≥ 30.000 S/a		-1	X	
S _{summe}				-5	1
S _{mittel}				-1	0,2
$Kat_{S\&L, \text{Einzelfahrt}} = [(-1 * s_{\text{mittel, Eigenschiff}}) + 1] * 2$				Kat _{Einzelfahrt}	4
$Kat_{S\&L, \text{Interaktion}} = [(-1 * s_{\text{mittel, Eigenschiff}}) + 1] * [(-1 * s_{\text{mittel, Fremdschiff}}) + 1]$				Kat _{Interaktion}	2,8
Legende: 0 Kat I ≤1 >1 Kat II ≤2 >2 Kat III ≤3 >3 Kat IV ≤4					

Abbildung 163: Musterhafte Bewertung einer Testsituation



Abbildung 164: Darstellung von prognostizierten Begegnungspunkten mit farbcodierter Einstufung der Sicherheit und Leichtigkeit (Hintergrundkarte: DOP-DE)

Basierend auf der Ergebnisdarstellung zu prognostizierten Interaktionen für das Eigenschiff (siehe auch Abbildung 2 im Zwischenbericht Nr. 6) wurde die Bewertung von Sicherheit und Leichtigkeit prognostizierter Interaktionen implementiert. Die Implementierung ist beispielhaft in Abbildung 165 dargestellt.

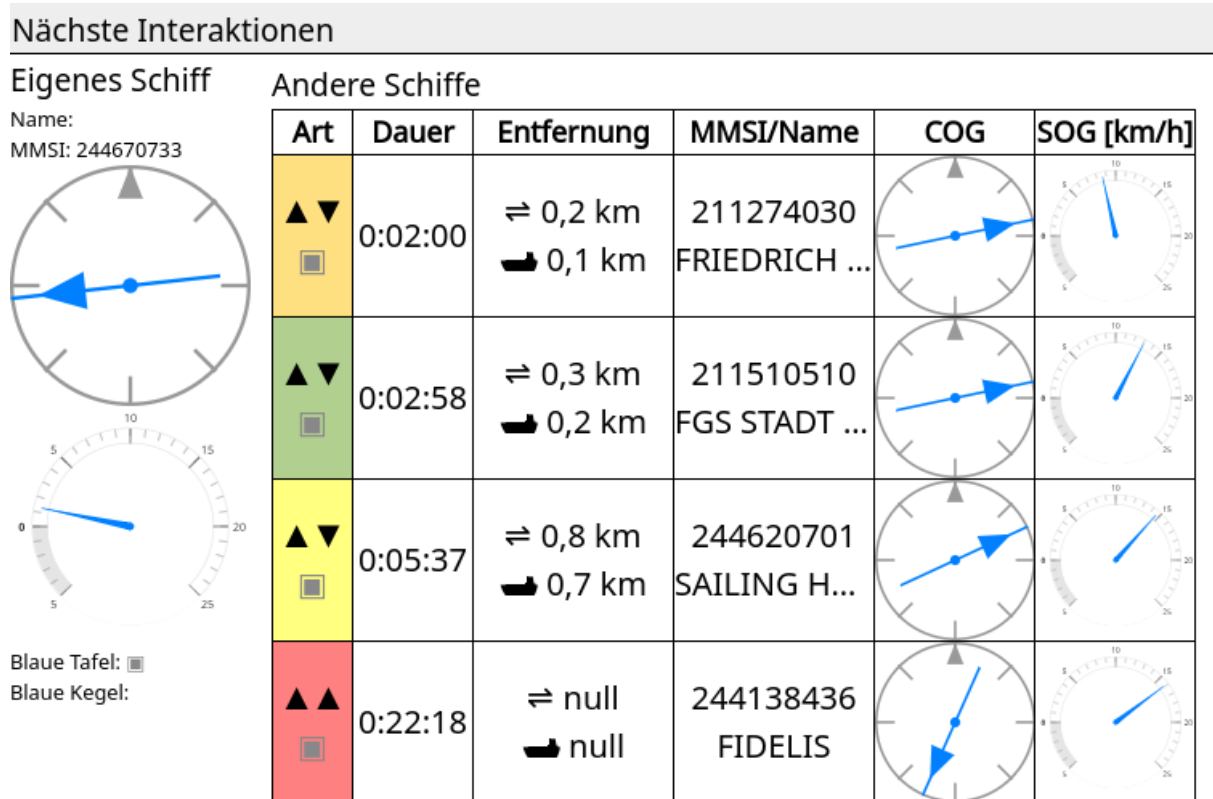


Abbildung 165: Farbcodierte prognostizierte nächste Interaktionen des Eigenschiffs

17.4 Einbindung eines Bahnführungsassistenten

Das Bahnführungssystem wurde über die Schnittstellen der Navigationsplattform in die Fernsteuerung des Versuchsschiffes integriert, um dem fernsteuernden Schiffsführer durch die teilautomatisierte Steuerung die Möglichkeit zu geben, mehrere Schiffe gleichzeitig zu steuern beziehungsweise zu überwachen. Die automatische Bahnführung bietet zusätzlich den Vorteil, dass bei einem Verbindungsabbruch das Schiff weiterhin sicher auf einer Leitlinie geführt wird. Durch die im Bahnführungssystem integrierte Kollisionswarnung wird der fernsteuernde Schiffsführer auf mögliche Kollisionen frühzeitig hingewiesen, wenn das Bahnführungssystem aktiv ist. Das Bahnführungssystem wurde so in die Navigationsplattform integriert, dass die Bedienung vom Fernsteuerstand aus identisch mit der Bedienung auf dem Schiff erfolgen kann. Alle Anzeigen, Bedienelemente und Alarmer stehen im Fernsteuerstand zur Verfügung. Der fernsteuernde Schiffsführer kann durch einen manuellen Eingriff in den Tiller des Fernsteuerstandes sofort die Steuerung übernehmen.

Die Navigationsplattform wurde so implementiert, dass für alle Projektpartner der Zugriff auf die verfügbaren Messwerte einfach und einheitlich möglich ist. Diese Messwerte können dann für die Entwicklung eigener Schätzalgorithmen genutzt werden und die Ergebnisse der Schätzung wiederum über die Navigationsplattform zur Verfügung gestellt werden. Mit Hilfe dieser Schätzplattform können verschiedene Schätzverfahren für die Position und Lage des Schiffes plattformunabhängig entwickelt und getestet werden.

Das Bahnführungssystem und die Navigationsplattform wurden so vorbereitet, dass alternative Regelungsverfahren einfach eingebunden werden können. Diese Regelungsplattform erleichtert Entwicklung und Tests von Regelungsverfahren im Rahmen der Bahnführung.

Eine Schnittstelle für die Software des Bahnführungssystems wurde spezifiziert und implementiert, die eine Vorgabe der Sollbahn sowohl vom ECDIS als auch von alternativen Modulen zur Planung von Trajektorien ermöglicht, während die Bahnführung aktiv ist. Diese Schnittstelle ermöglicht einerseits eine automatische Kollisionsvermeidung, indem die aktive Leitlinie angepasst wird ohne die Bahnführung deaktivieren zu müssen. Andererseits kann auch der fernsteuernde Schiffsführer in der elektronischen Karte die Linie während der Fahrt korrigieren und diese dann an das Bahnführungssystem senden.

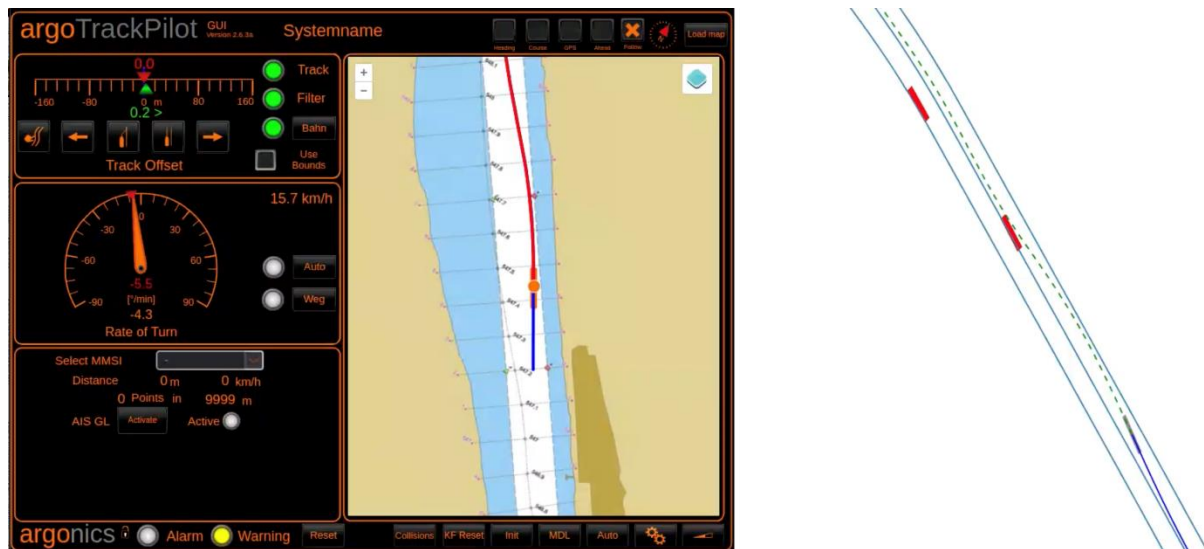


Abbildung 166 Simulator mit Bahnführung und Online-Trajektorienplanung

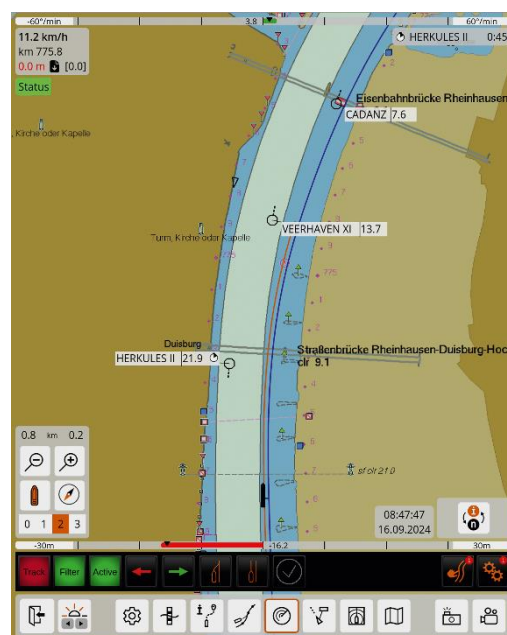


Abbildung 167 Erweiterte Schnittstelle im ECDIS

Es wurde eine Schnittstelle definiert, die es ermöglicht, den Systemzustand des Bahnführungssystems im ECDIS anzuzeigen. Dadurch sind die wichtigsten Informationen immer im Blickfeld des fernsteuernden Schiffsführers sichtbar. Gleichzeitig kann auch eine Bedienung des Bahnführungssystems über die Schnittstelle im ECDIS erfolgen.

Der Fernsteuerstand wurde ebenfalls mit einer Schnittstelle zum Bahnführungssystem ausgerüstet, über die der Systemzustand des Bahnführungssystems angezeigt sowie die Bedienung erfolgen kann.

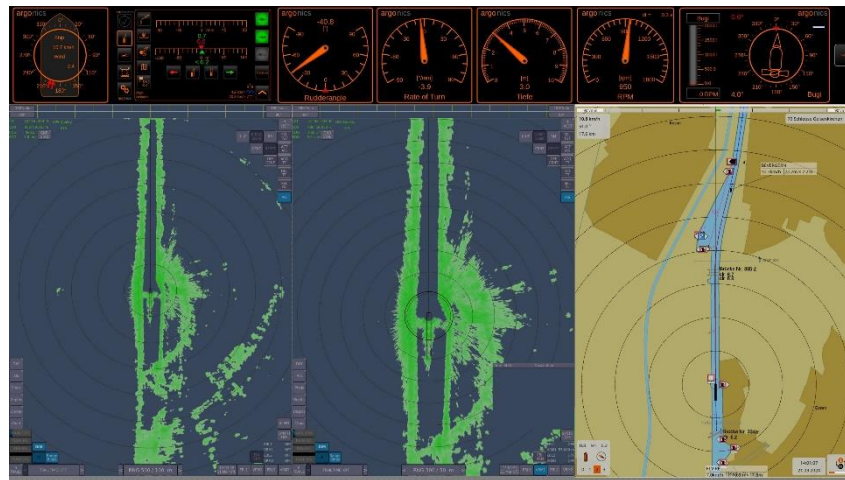


Abbildung 168 Anzeige der Navigationsdaten im Fernsteuerstand

Die gleichen Schnittstellen können auch zur Übertragung des Systemzustands sowie der Sollbahn an die Leitstelle genutzt werden.

17.4.1 Schnittstelle zum Trajektorienplanungsmodul

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Schnittstelle zwischen dem Bahnführungsassistenten von argonics und dem Trajektorienplanungsmodul entwickelt. Sie wurde unter anderem direkt in die Simulationsumgebung (gemäß Abbildung 170 b) integriert und bildet das Verbindungsglied zwischen dem Trajektorienplanungsmodul und dem Simulator von argonics. Die wesentlichen Funktionalitäten dieser Schnittstelle ist die Datenkonvertierung zwischen unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen wie ROS2 und TCP/IP, Zeitsynchronisierung, Trajektorienglättung und Trajektorienextrapolation. Dadurch wurde Übernahme der geplanten Trajektorien als Referenztrajektorie durch Bahnführungsassistenten ermöglicht. Anschließend wurden die simulativen Tests der Trajektorienplanung auf dem von argonics zur Verfügung gestellten Simulator durchgeführt.

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

Das entwickelte Regelungssystem wurde simulativ getestet. Abbildung 169 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt aus einem Testszenario, in dem die Referenztrajektorie des Reglers (rot) das grau dargestellte Hindernis unzureichend berücksichtigt und somit kollisionsbehaftet ist. Dank des

Regelungssystems weicht das Schiff in diesem Fall von der Referenztrajektorie ab und kehrt auf diese zurück, sobald das Hindernis vorbei ist.

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

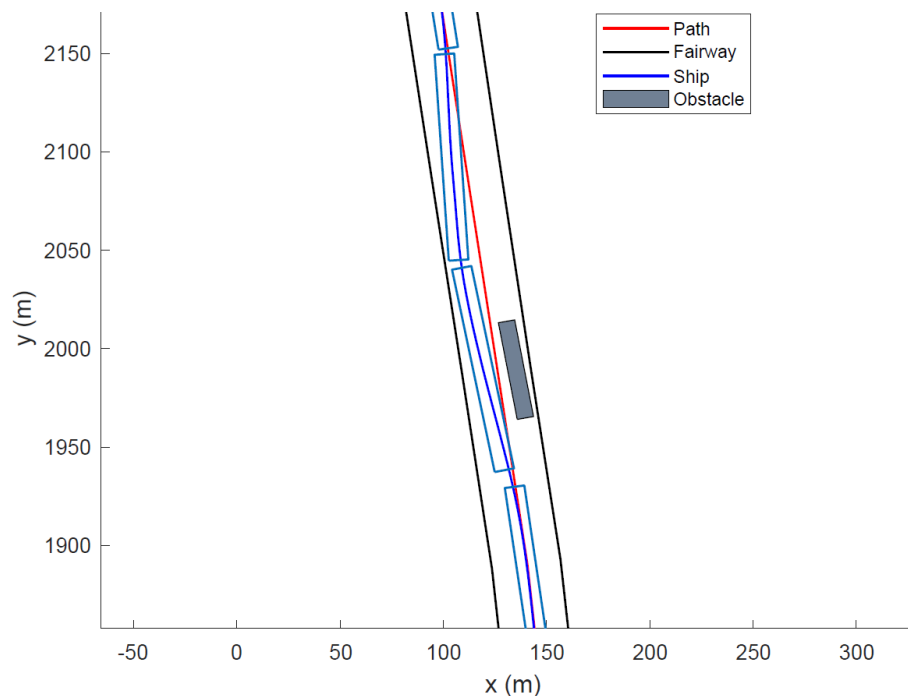


Abbildung 169 Testszenario für Trajektorienfolgeregelung. Das eigene Schiff (blau) weicht einer geplanten Trajektorie (rot) aus, um eine Kollision mit dem Hindernis (grau) zu vermeiden.

17.5 Interaktive Online-Trajektorienoptimierung

Im Rahmen des Projektes wurde ein A*-basiertes Verfahren zur Trajektorienplanung entwickelt. Dies ist ein weitverbreitetes Verfahren der graphenbasierten Trajektorienplanung, welches sich dank einer intelligenten Heuristikverwendung durch schnelle Rechenzeiten auszeichnet. Die Heuristik hilft dabei, die besonders vielversprechenden Bereiche des Graphen zu identifizieren, sodass diese als Erste abgesucht werden. Ist die aufgrund einer Heuristik gemachte Schätzung ausreichend präzise, wird der Planungsprozess um ein Vielfaches beschleunigt [RWTH5]. Bei der Wahl der Heuristik wird dabei oft zwischen dem Maß an Optimalität der gefundenen Lösung und der für den Suchprozess benötigten Zeit abgewogen. So kann eine aggressivere Heuristik schneller zu einem Ergebnis führen. Dies geschieht aber auf Kosten der Qualität der gefundenen Lösung. Die Güte einer Trajektorie und jedes einzelnen Knotens, der zur Trajektorie gehört, wird dabei durch eine Kostenfunktion beschrieben, die basierend auf gewünschten Eigenschaften der Transition von einem Knoten zum anderen Knoten, auch als Kante bezeichnet, einen Kostenwert zuweist. In dem entwickelten Verfahren gehen wir von der Motivation heraus, möglichst schnell eine akzeptable Trajektorie zu generieren und diese dann je nach vorhandenem Zeitbudget zu verbessern. Daher werden bei der Planung aggressive Heuristiken verwendet, die schnell, aber suboptimal arbeiten. In einem Planungszyklus werden so mehrere Trajektorien gefunden. Die gefundenen Trajektorien werden miteinander verglichen und die Beste von ihnen übernommen. Für bessere Ergebnisse hinsichtlich der Rechenzeit und der Trajektoriengüte, werden bei der Auslegung der Heuristik unterschiedliche Faktoren, wie Flusskrümmung oder zukünftige Auswirkungen der aktuellen Schiffsausrichtung auf seine Bewegung, berücksichtigt. Auf diese Weise kann die Approximationsgenauigkeit auch bei den aggressiv parametrisierten Heuristiken erhöht werden.

Der Planungsprozess wird mit leicht variierenden Kostenparametern mehrmals nacheinander ausgeführt. Dadurch werden dem Schiffsführer mehrere Trajektorien zur Verfügung gestellt, sodass für die verantwortliche Person eine Auswahlmöglichkeit besteht. Die Taktrate des Trajektorienplanungsmoduls beträgt 0,1 Hz. Alle 10 Sekunden wird eine neue Trajektorie geplant, damit die neu wahrgenommenen Umgebungsänderungen oder abweichende Eigenschiffposition rechtzeitig in der Planung berücksichtigt werden können.

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

Als wichtigste Anforderungen an die zu generierende Trajektorie wurden unter anderem lange Planungshorizonte (zwei bis drei Kilometer), ein glatter Trajektorienverlauf und ein hohes Maß an dynamischer Realisierbarkeit festgelegt. Diese Kriterien sind relevant, um die Akzeptanz des Systems beim Schiffskapitän zu erhöhen und die Zuverlässigkeit des Moduls auf hohem Niveau zu halten. Einerseits bekommt der Schiffsführer durch langes Planungshorizont einen besseren Überblick über die Situation, andererseits kann dadurch immer rechtzeitig auf eine potenzielle Kollisionsgefahr mit einem Ausweichmanöver reagiert werden. Unter dynamischer Realisierbarkeit versteht man die Fähigkeit der unterlagerten Module, vorwiegend des Regelungssystems, der geplanten Trajektorie gut zu folgen. Diese Anforderung ist in dem betrachteten Anwendungsfall umso relevanter, da die Planung auf einem teilweise stark eingeschränkten Raum stattfindet, der durch die Fahrrinnengrenzen limitiert ist. Um ein hohes Maß an dynamischer Realisierbarkeit der Trajektorie zu erreichen, wird das in den Arbeitspaketen AP7000 entwickelte und angepasste Modell verwendet. Bei diesem Modell handelt es sich um ein Abkowitz-Manövriermodell [RWTH4], welches es ermöglicht, in der Nähe eines Arbeitspunktes die Lageänderung des Schiffes in Abhängigkeit von dem gesetzten Ruderwinkel zu bestimmen. Das Modell zeichnet sich durch hohe Genauigkeit aus, geht jedoch mit einigen Einschränkungen einher. So können mit diesem Modell keine Beschleunigungsprozesse abgebildet werden. Überdies enthält das Modell keine strömungsrelevanten Informationen, sodass es bei stärkeren Strömungen zu größeren Abweichungen vom nominellen dynamischen Verhalten kommen kann.

Damit die generierte Trajektorie nicht nur dynamisch fahrbar, sondern auch verkehrstechnisch akzeptabel ist, unterliegt sie weiteren Kriterien. So werden bei der Trajektorienplanung die Trajektorien bevorzugt, die möglichst wenig Kursänderungen aufweisen und die keine abrupten Ruderwinkelverstellungen erfordern. Ferner wird gefordert, dass das Schiff sich in der in Bewegungsrichtung rechten Hälfte der Fahrrinne bewegt. Das entspricht einerseits den Verkehrsregulierungen, laut denen sich die Wasserfahrzeuge in den engen Fahrrinnen an den rechten Fahrrinnenrand halten sollten. Andererseits wird dadurch weitgehend vermieden, dass das Schiff in den Gegenverkehrsbereich gerät. Diese Kriterien werden entsprechend in der während der Planung verwendeten Kostenfunktion codiert und auf diese Weise im Planungsprozess berücksichtigt.

Ein weiteres notwendiges Merkmal einer Trajektorie ist die Kollisionsfreiheit. In dem vorliegenden Projektvorhaben wurde Kollisionsfreiheit bezüglich der statischen Hindernisse, wie Infrastrukturobjekte, Brückenstützen etc. und anderer Wasserfahrzeuge, die als dynamische Hindernisse bezeichnet werden, betrachtet. Um das Risiko einer Grundberührung zu minimieren, wurde der freie Planungsraum für die Trajektorie des Schiffes auf den Fahrrinnenbereich begrenzt, in dem eine ausreichende

Wassertiefe gewährleistet ist. Die Infrastruktur- und Fahrrinnendaten werden den online verfügbaren elektronischen nautischen Karten entnommen. Die dynamischen Hindernisse werden auf Basis der in AIS-Nachrichten enthaltenen Verkehrsdaten betrachtet. Diese Nachrichten enthalten Information, wie Position und Ausrichtung des Wasserfahrzeugs, seine Breite und Länge sowie aktuelle Geschwindigkeit über Wasser. Aufgrund dieser Information wird nicht nur die aktuelle Position des Schiffes bestimmt, sondern auch die zukünftige Bewegung der einzelnen Verkehrsteilnehmer prädiziert. Zur Bewegungsprädiktion wird angenommen, dass andere Schiffe sich bei konstant bleibender Geschwindigkeit entlang der Fahrrinne, parallel zur Fahrrinnenachse, bewegen. Jedes Hindernis wird mit einer sogenannten Sicherheitszone versehen. Darunter ist eine Zone zu verstehen, die nicht vom Eigenschiff gekreuzt werden darf. Sie hat zwei Funktionen. Zum einen dient sie dazu, zu gewährleisten, dass das Eigenschiff einen sicheren Minimalabstand zu dem Hindernis nicht unterschreitet. Zum anderen werden auf diese Weise mögliche Unsicherheiten bei der Lokalisierung des Eigenschiffes oder des Hindernisses sowie infolge einer ungenauen Bewegungsprädiktion eines Fremdschiffes berücksichtigt, indem die Sicherheitszone entsprechend ausgedehnt wird. Um das Kollisionsrisiko weiter zu minimieren und die geplanten Trajektorien verkehrsregelkonform zu gestalten, wird eine teilweise Kompatibilität mit den internationalen Kollisionsverhütungsregeln COLREGs angestrebt. Insbesondere werden Überholungs- und Begegnungssituation betrachtet, in denen Schiffsmanöver in einer verkehrsregelkonformen Weise durchgeführt werden. Eine frühere Version dieses Verfahrens wurde unter dem Titel „*A*-guided Incremental Sampling for Trajectory Planning of Inland Vessels in Narrow Ship Canals*“ [RWTH-IRT2] auf der Konferenz IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2022 eingereicht und wurde als Konferenzbeitrag akzeptiert. Für die finale Version des Algorithmus wird aktuell eine weitere Veröffentlichung geplant.

Das entwickelte Trajektorienplanungsmodul wurde entsprechend dem Arbeitspaket AP10100 ausgiebig simulativ getestet. Für die Testzwecke wurden zwei Simulationsumgebungen aufgebaut, die in Abbildung 170 dargestellt sind. In der links abgebildeten Simulationsumgebung wurde das Trajektorienplanungsmodul direkt an den auf Basis der Modelle gemäß AP7000 entwickelten Schiffsdynamiksimulator angeschlossen. Parallel dazu wurde ein Simulator für dynamische Hindernisse verwendet, mit dem die Hindernisdaten im AIS-Format simuliert werden. Diese Daten gehen in das Modul ein, das für die Prädiktion der dynamischen Hindernisse verantwortlich ist. Dieses Setup eignet sich gut, um unterschiedliche Methoden der Trajektorienplanung für den Fall von gutem Modellwissen miteinander zu vergleichen, da die Ergebnisse durch den fehlenden Einfluss der Regelungseinheit und der potenziellen Störgrößen direkt miteinander vergleichbar sind. Die zweite Simulationsumgebung baut sich auf dem Schiffssimulator von argonics auf, in dem sowohl die Schiffsdynamik als auch die Fremdschiffe simuliert werden. Ferner enthält der Simulator auch einen LQ-Regler, der basierend auf der vorgegebenen Trajektorie einen geeigneten Ruderwinkel berechnet. Das Schiffsmodell, das in dem Simulator hinterlegt ist, ist in seinen dynamischen Eigenschaften mit dem Modell vergleichbar, das dem Trajektorienplanungsmodul zugrunde liegt. Es ist mit diesem jedoch nicht identisch. Die Bewegung von simulierten Fremdschiffen ist an die historischen Verkehrsdaten angelehnt. Dieses Setup eignet sich insbesondere für Validierung der Trajektorienplanung bezüglich der dynamischen Realisierbarkeit und Kollisionsfreiheit. Der Grund dafür liegt zum einen darin, dass es über ein realitätsnahes Schiffsmodell sowie ein in der Praxis einsetzbares Regelungssystem verfügt, zum anderen darin, dass damit die Robustheit gegenüber Modellabweichungen getestet werden, mit denen in der realen Welt immer zu rechnen ist.

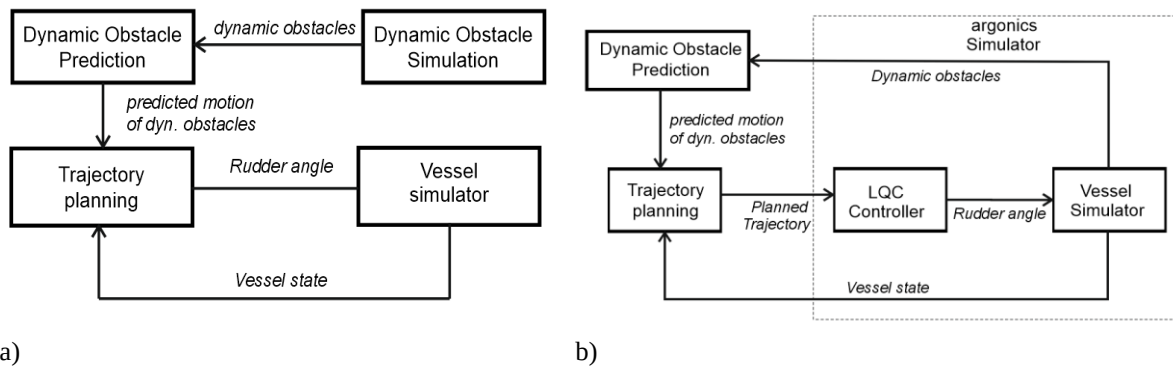


Abbildung 170 Struktur der Simulationsumgebung für Tests und Validierung der Trajektorienplanungsmethoden

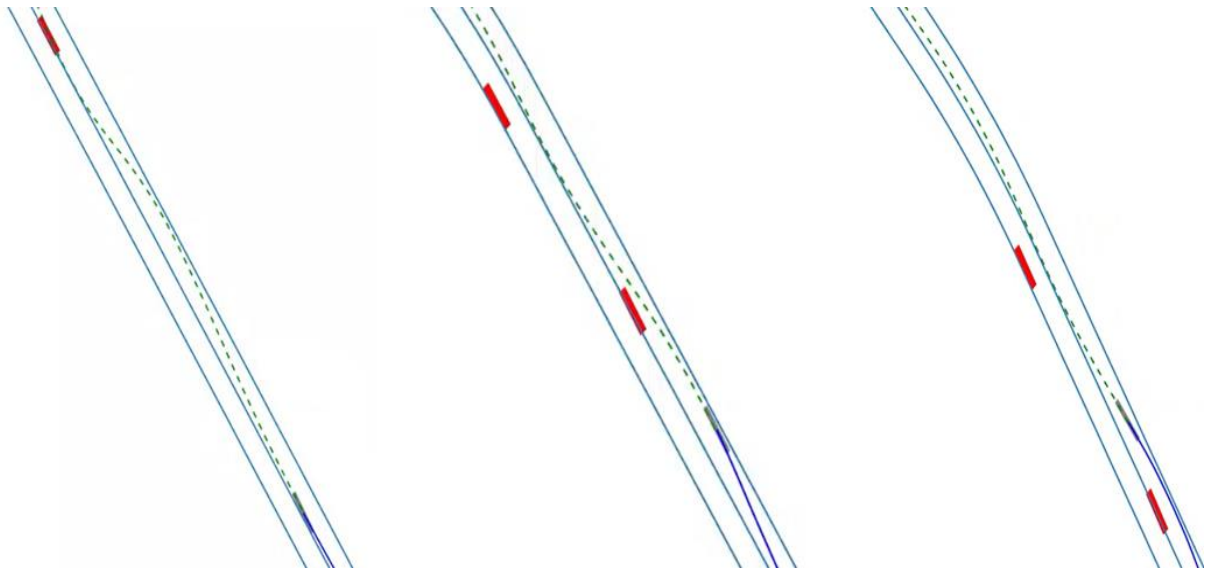


Abbildung 171 Simulationsszenario für Trajektorienplanungsmodul

Zu Testzwecken wurden mehrere Testszenarien definiert. Sie umfassen unterschiedliche Rhein-Abschnitte der Länge von 3 bis 12 Kilometer. Auf diesen Strecken wurden unterschiedliche Verkehrssituationen simuliert und miteinander kombiniert. Dazu zählen freie Flussfahrt, Überhol- oder Ausweichmanöver und komplexere Situationen, die drei oder mehr Schiffe umfassen. Es wurde untersucht, ob das Trajektorienplanungsmodul in der Lage ist, auch in schwierigen Verkehrssituationen eine kollisionsfreie Trajektorie innerhalb des vorhandenen Zeitbudgets zu generieren. Ferner wurden unterschiedliche Heuristiken und ihre Kombinationen miteinander in Bezug auf Rechenzeit und Trajektorienkosten verglichen. Hier wurde ein Fokus daraufgelegt, welche Heuristik eine bessere worst-case-Berechnungszeit aufweist, da diese Kennzahl entscheidend dafür ist, dass der Algorithmus zuverlässig, auch in den komplexen Verkehrssituationen funktioniert und in der Lage ist innerhalb des vorhandenen Zeitbudgets eine gültige Lösung zu generieren. Abbildung 171 zeigt beispielhaft eine geplante Trajektorie in einem Begegnungsszenario. Es ist zu erkennen, dass das Schiff (grau) im rechten Teil der Fahrrinne, unweit der Fahrrinnenmitte, fährt (a), nach rechts abweicht, um dem begegnenden Schiff (rot) auszuweichen (b) und anschließend auf die alte Spur zurückkehrt (c). Weitere simulative Ergebnisse der Trajektorienplanung stehen auch in Video-Form zur Verfügung.

17.5.1 Argonics: Interaktive Online-Trajektorienoptimierung

Im Rahmen des Arbeitspaketes 9500 wurden verschiedene Möglichkeiten geschaffen, die im Bahnführungssystem genutzte Leitlinie anzupassen und zu prüfen. Es wurden sogenannte Sicherheitskorridore entwickelt, die dafür sorgen sollen, dass das ferngesteuerte Schiff das festgelegte Fahrwasser nicht verlässt und keine Kollision mit feststehenden Hindernissen wie Brückenpfeilern oder Schiffsanlegern verursacht. Dafür wird für jeden Fluss jeweils für die Berg- und Talfahrt ein sicherer Bereich definiert und auf dem Bahnführungssystem hinterlegt. Wenn die aktuell aktive Sollbahn den Sicherheitskorridor verlässt wird eine Warnung angezeigt und der Schiffsführer aufgefordert, die Sollbahn in einen sicheren Bereich zu verschieben. Zusätzlich wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Sollbahn automatisch so anzupassen, dass sie immer innerhalb des Sicherheitskorridors verläuft.

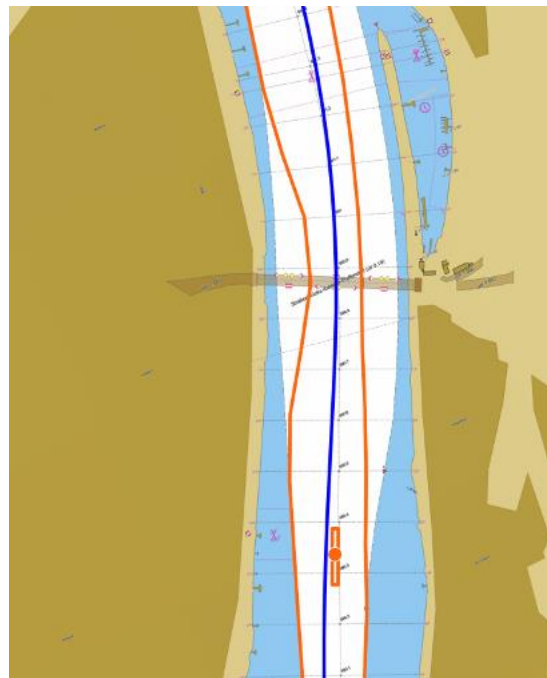


Abbildung 172 Sicherheitskorridore mit Hindernis

Sichere und glatte Sollbahnen sind eine wichtige Voraussetzung für einen hohen Anteil der teilautomatisierten Fahrt an der Gesamtfahrzeit. Dadurch kann die Arbeitsbelastung des fernsteuernden Schiffsführers wesentlich reduziert werden. Um die Sollbahnen einfach und schnell anpassen und optimieren zu können, wurde das Werkzeug zur Bearbeitung von Leitlinien um eine automatische Optimierung ergänzt, die kleine Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Stützpunkte reduziert und dadurch eine glattere Bahn erzeugt. So können Aufzeichnungen von vorhergehenden Fahrten als Grundlage für neue Leitlinien herangezogen werden und mit wenig Aufwand in gut geeignete Bahnen umgewandelt werden. Das Werkzeug wurde ebenfalls um eine Mittelung über mehrere aufgezeichnete Fahrten erweitert.



Abbildung 173 Werkzeug zur Bearbeitung von Leitlinien

Die Planung einer Reise erfordert bei der Auswahl einer geeigneten Leitlinie die Berücksichtigung des Wasserstands auf allen befahrenen Gewässern sowie des Beladungszustands des Schiffes. Um den Schiffsführer bei dieser Aufgabe zu unterstützen wurde ein Modul zur Routenplanung entwickelt. Dieses Modul ermöglicht die Planung einer Reise von einem beliebigen Startpunkt zu einem beliebigen Zielpunkt.

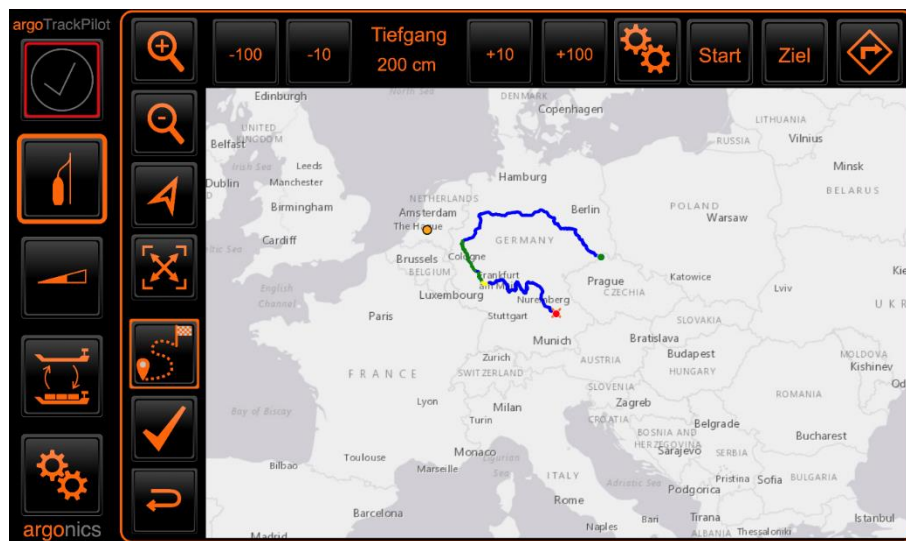


Abbildung 174 Modul zur Routenplanung

Abhängig vom aktuellen Wasserstand und der Beladung des Schiffes wird dann eine Übersicht der berechneten Route angezeigt, Bereiche mit möglicherweise niedrigem Wasserstand werden farblich markiert. Die berechnete Sollbahn wird an den Wasserstand angepasst.



Abbildung 175 Wasserstands- und tiefgangsabhängige Routenplanung

Mit den Informationen über die geplante Route kann dem Schiffsführer die verbleibende Strecke und die voraussichtliche Ankunftszeit am Ziel angezeigt werden.

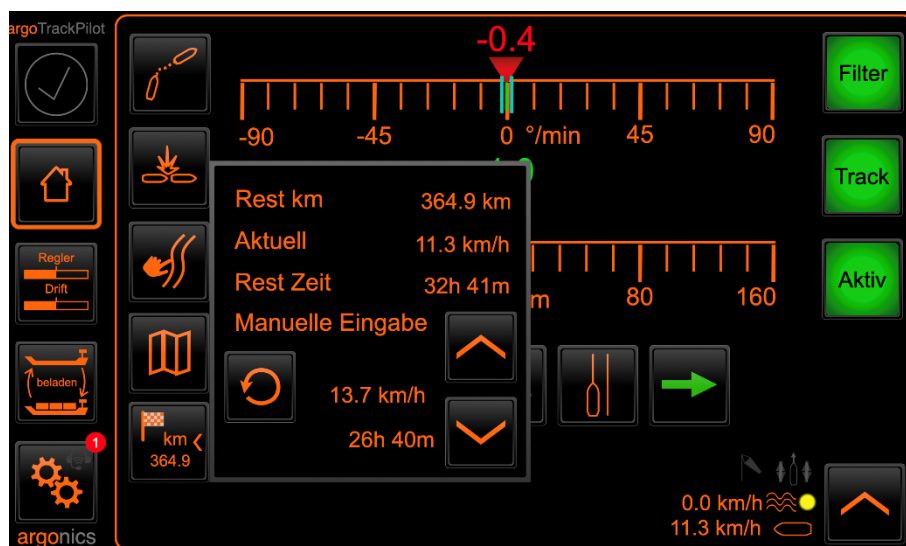


Abbildung 176 Berechnung der Ankunftszeit

Das Modul zur Routenplanung basiert auf einer für diesen Zweck entwickelten Datenbank mit dem Netz der europäischen Wasserstraßen und einem Dijkstra-Suchalgorithmus [arg10]. Die Datenbank mit den Wasserstraßeninformationen und die Wasserstandsdaten werden über das Internet aktualisiert.

Erweiterung der Leitlinienvorgabe um flexiblere Eingriffsmöglichkeiten, wie z.B. Vorgabe von Zielpunkt und -richtung

17.6 Warnstrategie

Zur Verbesserung der Situationswahrnehmung des Fahrers ist eine Warnstrategie erforderlich, um eine adäquate und kontextsensitive Aufmerksamkeit zu erreichen. Nach Lorenz [LORE2014] ist die

häufigste Unfallursache im Straßenverkehr der Informationsfehler, bei dem der Fahrer handlungsrelevante Informationen zu spät oder gar nicht wahrnimmt. Um die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Gefahr zu lenken, ist eine geeignete Warnstrategie in der Mensch-Maschine-Schnittstelle von großer Bedeutung. Die Erarbeitung der Warnstrategie ist im Anhang „Warnstrategie“ dokumentiert.

Die Entwicklung einer geeigneten Warnstrategie für ein komplexes System ist ein multidisziplinäres Unterfangen. Dabei steht nicht nur die Systemtechnik im Vordergrund, sondern auch die Berücksichtigung der menschlichen Kognition und der Mensch-Maschine-Interaktion. Die Mensch-Maschine-Interaktion umfasst Aspekte wie Modelle zur Beschreibung der Aufgaben des Operators (Fahrers) nach Zeit und Komplexität. Menschliche Faktoren wie Modelle der Informationsverarbeitung, der menschlichen Wahrnehmung und der Automatisierungspsychologie sind ebenfalls Themen, die bei der Entwicklung der Warnstrategie berücksichtigt werden. Da es sich um ein in Betrieb befindliches System handelt, müssen auch bestehende Normen und Standards sowie Gesetze und Vorschriften bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Dadurch wird die Gewöhnung der zukünftigen Schiffsführer an die Fernsteuerung erleichtert.

17.6.1 Psychologische Aspekte

Im Kontext der Automobilindustrie existieren verschiedene Modelle zur Beschreibung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, wobei sich das Drei-Ebenen-Modell nach Donges [DONG1982] etabliert hat. Dieses Modell gliedert die Aufgaben des Operators hierarchisch nach ihrer Komplexität in drei Ebenen: Navigation, Bahnführung und Stabilisierung. Dieses Modell lässt sich für die Binnenschifffahrt adaptieren.

Die Navigationsebene beschreibt die Festlegung der Route durch das Wasserstraßennetz unter Berücksichtigung von Faktoren wie Wasserstände, Beladungszustand und Schleusendurchfahrten. Der Schiffsführer wählt die Route unter Abwägung von Fahrtzweck, erwarteter Fahrzeit, Zwischenzielen und Sicherheitsaspekten. Diese Entscheidungen haben einen größeren Zeithorizont, der von Minuten bis zu mehreren Stunden reichen kann und erfordern eine hohe mentale Beanspruchung, obwohl sie selten vorkommen. Auf der Bahnführungsebene führt der Schiffsführer Manöver aus, die zur Erreichung der Navigationsziele notwendig sind. Beispiele für solche Manöver sind das Ablegen, die Hafenausfahrt, der Wechsel in die Fahrrinne, das Einhalten des Abstands zu anderen Schiffen und das Durchfahren von Schleusen. Diese Tätigkeiten erfolgen in einem kürzeren Zeithorizont von Sekunden bis wenigen Minuten und erfordern präzise und schnelle Entscheidungen. Auf der Stabilisierungsebene schließlich setzt der Schiffsführer die Vorgaben der Bahnführungsebene durch direkte Bedieneingaben um, um Abweichungen vom Sollzustand zu korrigieren. Dies kann beispielsweise das Ausgleichen von Strömungen oder Windstößen sein, um das Schiff auf Kurs zu halten. Diese Aufgaben laufen oft automatisch und unbewusst ab, mit Reaktionszeiten von mehreren hundert Millisekunden bis wenigen Sekunden.

Alle Tätigkeiten, die im Drei-Ebenen-Modell definiert sind, werden fortan als primäre Operationsaufgabe bezeichnet. Bubb et. al. [BUBB2015] erweiterten dies mit der Definition der sekundären und tertiären Operationsaufgaben für Kraftfahrzeuge, welches sich ebenfalls auf die Operation von Binnenschiffen adaptieren lässt. Sekundäre Aufgaben betreffen nicht direkt das Führen des Schiffes, sondern resultieren aus äußeren Umständen. Ein Beispiel ist die Betätigung der Lichtanlage bei schlechten Sichtverhältnissen oder das Absenken des Brückenaufbaus bei niedrigen Durchfahrten. Diese Aufgaben können reaktiv sein, als Antwort auf Umweltbedingungen, oder aktiv, wie das Setzen der blauen Tafel zur Kommunikation mit anderen Schiffen. Tertiäre Aufgaben dienen dem Komfort und der Unterhaltung der Besatzung, wie z.B. die Bedienung der Heizung, der Kaffeemaschine oder der Unterhaltungselektronik. Zunehmend relevant werden auch Überwachungsaufgaben, da automatisierte Systeme Teile der bisherigen Aufgaben des Schiffsführers übernehmen. Dazu gehören die Überwachung des

Systemverhaltens im Vergleich zum Sollverhalten und die Beobachtung von Statusanzeigen und Alarmmeldungen, um sicherzustellen, dass die Automatisierung nicht zu einer Erhöhung der Gesamtbelastung führt.

Abbildung 177 fasst die bisherigen Ausführungen in Anlehnung an [RHED2017] grafisch zusammen.

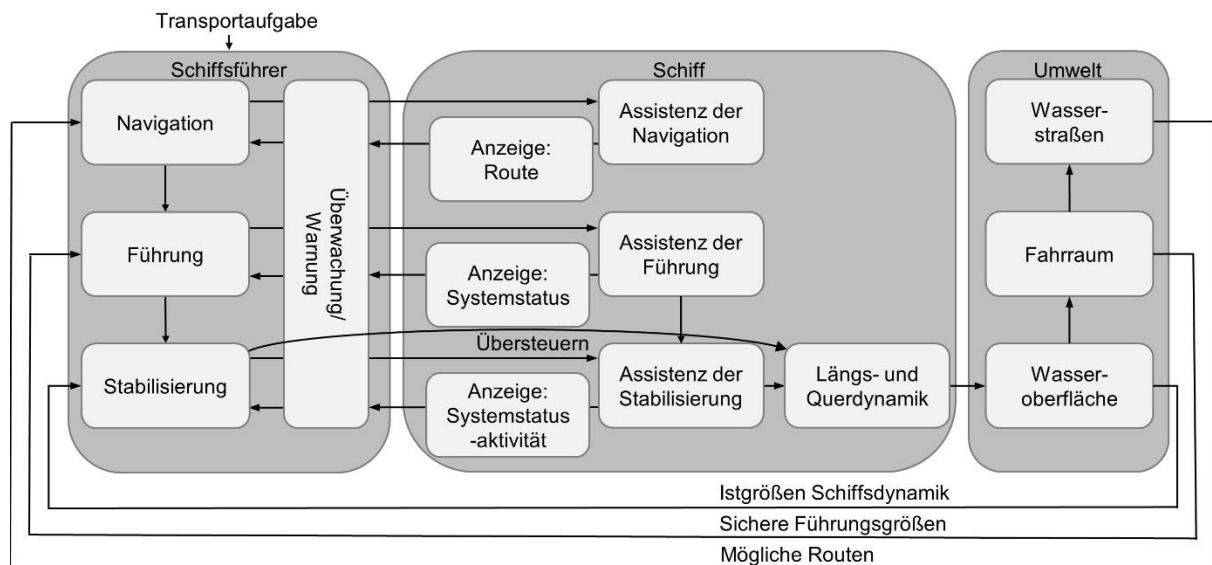


Abbildung 177 Drei-Ebenen-Modell der integrierten Operationsaufgaben eines Schiffsführers, angelehnt an [RHED2017]

Die „Human Factors“ eines Operators oder Schiffsführers lassen sich in drei Kategorien unterteilen: überdauernde Faktoren, die langfristig veränderbar sind und Aspekte wie Konstitution, Erfahrung und sensorische Fähigkeiten umfassen; operationsbezogene Faktoren, die mittelfristig variieren und Elemente wie Ermüdung und Tagesrhythmus beinhalten; sowie kurzfristige Faktoren, die schnell veränderlich sind und Zustände wie Aufmerksamkeit und Beanspruchung betreffen. Besonders für Warnstrategien sind die kurzfristigen Faktoren entscheidend, da sie die Reaktionsfähigkeit auf potenzielle Gefahrensituationen beeinflussen. Solche Situationen können durch technisches Versagen oder menschliches Fehlverhalten, wie z. B. Informationsfehler aufgrund mangelnder Aufmerksamkeit, entstehen. Der Einsatz von Assistenzsystemen hilft, solche Fehler zu vermeiden, indem sie Aufmerksamkeitsdefizite erkennen und die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt auf Gefahren lenken.

Neben der menschlichen Informationsverarbeitung werden die Sinnesmodalitäten und ihre Bedeutung für die Schiffsführung betrachtet. Die visuellen (Auge) und auditiven (Innenohr) Kanäle sind von großer Bedeutung, da sie Farben, Helligkeit, Tonhöhe und Lautstärke wahrnehmen, die für die Navigation und das Erkennen von Warnsignalen wesentlich sind. Vestibuläre Wahrnehmung (Beschleunigung), haptische Empfindungen (Druck, Vibration), kinästhetisches Feedback (Position von Körperteilen) sind von mittlerer Bedeutung, während thermische (Temperatur) und Schmerzempfindungen sowie olfaktorische (Geruch) und gustatorische (Geschmack) Wahrnehmungen von geringer oder keiner Bedeutung für die Schiffsführung sind.

17.6.2 Regulatorische Grundlagen

Im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion und speziell für Warnungen und Informationssignale gibt es zahlreiche Normen, Standards und Regelwerke. Während allgemeine Standards oft in der technischen Umsetzung Anwendung finden, sind Regelwerke wie Gesetze und Verordnungen immer im Kontext des konkreten Anwendungsfalls zu betrachten. Wichtig für Warnungen ist die Einstufung von Informationen nach den Dimensionen „Kritikalität“ und „Dringlichkeit“. Die Norm DIN EN 981:2009-01

„Sicherheit von Maschinen - System akustischer und optischer Gefahrensignale und Informationssignale“ verknüpft grundlegende Anforderungen der EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG und enthält Definitionen sowie ergonomische Leitsätze zur Gestaltung und Anwendung von Signalen. Diese beinhalten die Verringerung falscher Signalgebung, unverwechselbare Strukturen für verschiedene Signale durch Farben und Tonhöhen, sowie die Einhaltung weiterer Normen wie EN 842, ISO 8995, EN 457 und ISO 9921-1.

Die Norm IEC 62923-1:2018 ist besonders relevant für das Brücken-Alert-Management (BAM) in der Schiffsführung. Sie legt die Betriebs- und Leistungsanforderungen sowie Prüfverfahren für die Verarbeitung und Darstellung von Alerts auf der Brücke fest. BAM-konforme Geräte müssen die Anforderungen der Module A „Presentation and handling of alerts on the bridge“ und C „Interfacing“ erfüllen. Diese Norm beinhaltet auch Anleitungen zur Verknüpfung von BAM-konformen Geräten mit nicht-BAM-konformen Geräten, die als „veraltete Alert-Quellen“ bezeichnet werden. Diese Richtlinien sind wichtig, um sicherzustellen, dass sowohl neue als auch ältere Systeme effizient und sicher integriert werden können.

17.6.3 Ableitung der Anforderungen an eine Warnstrategie

Bei zusammenfassender Betrachtung der theoretischen und regulatorischen Rahmenbedingungen ist festzustellen, dass Warnungen nach den gängigen Informationsverarbeitungsmodellen im ersten Schritt zunächst rechtzeitig und korrekt wahrgenommen und verarbeitet werden müssen, damit der Operator schnell und angemessen auf diese reagieren kann. Signale müssen daher die Wahrnehmungsschwellen der verschiedenen Modalitäten überschreiten. Die Gestaltungsziele für Warn- und Informationsausgaben sind unter anderem die Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit potenzieller Gefahren, die Verkürzung von Entscheidungs- und Handlungsprozessen, und die Verbesserung der Handlungsqualität zur Vermeidung von Überreaktionen.

Ein BAM-System, wie in der Norm IEC 62923-1:2018 beschrieben, muss auf dem Fernbedienungsstand so ausgelegt sein, dass eine optimale Darstellung der Warnungen gewährleistet ist. Dies trägt dazu bei, eine kognitive Überlastung des Schiffsführers zu vermeiden, Konflikte zwischen Aktionen zu minimieren und sicherheitsrelevante Informationen priorisiert darzustellen. Die Implementierung sollte die Anforderungen der Normen IEC 62288:2020, IEC 61924-2:2012, IEC 62923-1:2018, IEC 62923-2:2018 sowie der IMO-Standards MSC.302(87) 2010 und A.1021(26) 2009 erfüllen. Während für Alert-Managementsysteme in der traditionellen See- und Binnenschifffahrt Vorschriften und international vereinbarte Definitionen existieren, gibt es bisher keine Vorschriften, die sich explizit auf den Betrieb von ferngesteuerten Binnenschiffen beziehen. Die Verwendung der oben genannten bestehenden Normen bietet mehrere Vorteile. Der wichtigste Vorteil ist, dass das Schiffspersonal bereits mit dem Aufbau und der Bedienung des Alert-Managementsystems vertraut ist. Daher sind keine umfangreichen Schulungen erforderlich, wenn Schiffsführer von der traditionellen Schiffsführung auf die Fernsteuerung umstellen. Darüber hinaus ist die Anpassung bestehender BAM-Standards kostengünstig und zeitsparend. Gerade in der Binnenschifffahrt mit ihren langen Einsatzzeiten und begrenzten Werftkapazitäten bietet diese Lösung wirtschaftliche Vorteile. Durch die Nutzung vorhandener Systeme und Schnittstellen an Bord können die Kosten niedrig gehalten werden, da nur geringfügige Änderungen erforderlich sind.

17.6.4 Umsetzung und Validierung des Brücken-Alert-Managementsystems (BAM)

Alle eingehenden Alarmer werden auf einem Display am Fernsteuerstand angezeigt. Diese Bündelung erleichtert dem Schiffsführer die Wahrnehmung und die Interaktion, wie z. B. das Quittieren von Alarmen. Die Priorität der Meldungen bestimmt die Reihenfolge, in der die Alarmer angezeigt werden. Nach den bestehenden BAM-Definitionen gibt es vier Kategorien von Alarmmeldungen nach ihrer Kritikalität. In Übereinstimmung mit MSC.302(87) 2010 werden die drei kritischsten Alarmer über mehrere

Sinneskanäle signalisiert, insbesondere durch visuelle Darstellungen mittels Symbole und Textbeschreibungen sowie durch akustische Signale. Dadurch wird sichergestellt, dass Alarmer mit hoher Dringlichkeit vom Schiffsführer unabhängig von seinem momentanen Zustand wahrgenommen und richtig interpretiert werden.

Die Priorisierung von Alarmen ist für die Effizienz des BAM-Systems von entscheidender Bedeutung, allerdings sind feste Prioritäten nicht immer ideal. Je nach Schiffstyp, Konstruktion oder verwendeten Systemen können Alarmer unterschiedlich kritisch sein. Daher erweitert das realisierte BAM-System die BAM-Standards durch die Integration eines Alarmkonfigurators, der die Prioritäten der Alarmer auf Basis von Expertenwissen anpasst. Darüber hinaus können Prioritäten bedingt geändert werden, z. B. die Herabsetzung der Priorität, wenn ein redundantes System noch fehlerfrei arbeitet.

Die Bedienungs Oberfläche des BAM-Systems wurde in der Spiel-Engine Unity entwickelt. Die allgemeine Benutzeroberfläche und eine Übersicht des Alarmkonfigurators sind jeweils in Abbildung 178 und Abbildung 179 grafisch dargestellt.

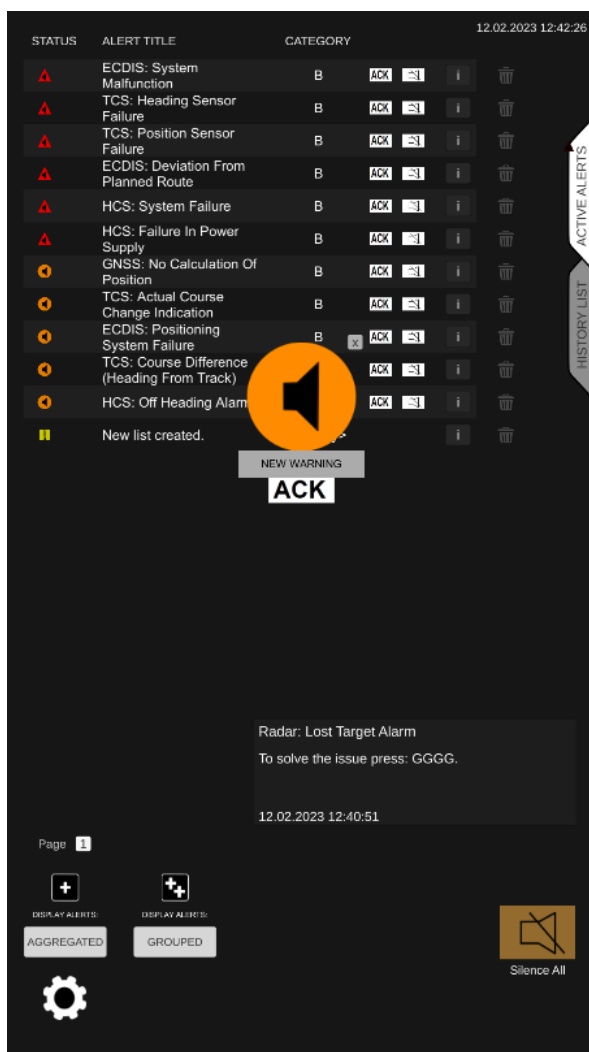


Abbildung 178 Benutzeroberfläche des BAM-Systems

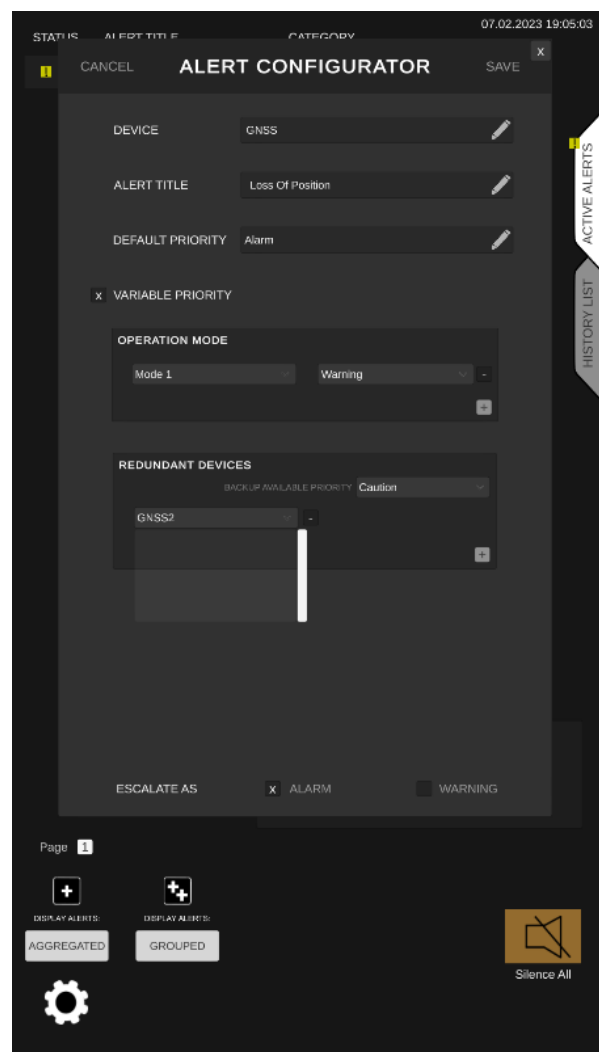


Abbildung 179 Alarmkonfigurator des BAM-Systems

Die Kommunikation zwischen Schiff und Fernsteuerstand bzgl. Meldungen erfolgt über NMEA-Nachrichten. Für die Übermittlung von Informationen über eine Meldung an das BAM-System ist das ALF-Format festgelegt. Für die Kommunikation von Kommandos bezogen auf eine Meldung, die von einer zentralen Alert-Management-Stelle an einzelne Geräte gesendet werden (z.B. im Falle einer

Quittierung), wird das Format ACM (ACN) verwendet. Für die Integration von veralteten Alert-Quellen, die über nicht BAM-konforme Kommunikationsstandards wie ACK und ALR oder Relaiskontakte kommunizieren, werden Vorgaben für die Implementierung einer Umwandlungsfunktion gemacht. Dabei sollen die Meldungen zunächst klassifiziert werden und das Alert-Zustandsmanagement durchgeführt werden, bevor die Anzeige auf dem BAM-HMI erfolgt. In Abbildung 180 ist die Einbindung von veralteten Alert-Quellen in Hinblick auf den Kommunikationsablauf dargestellt.

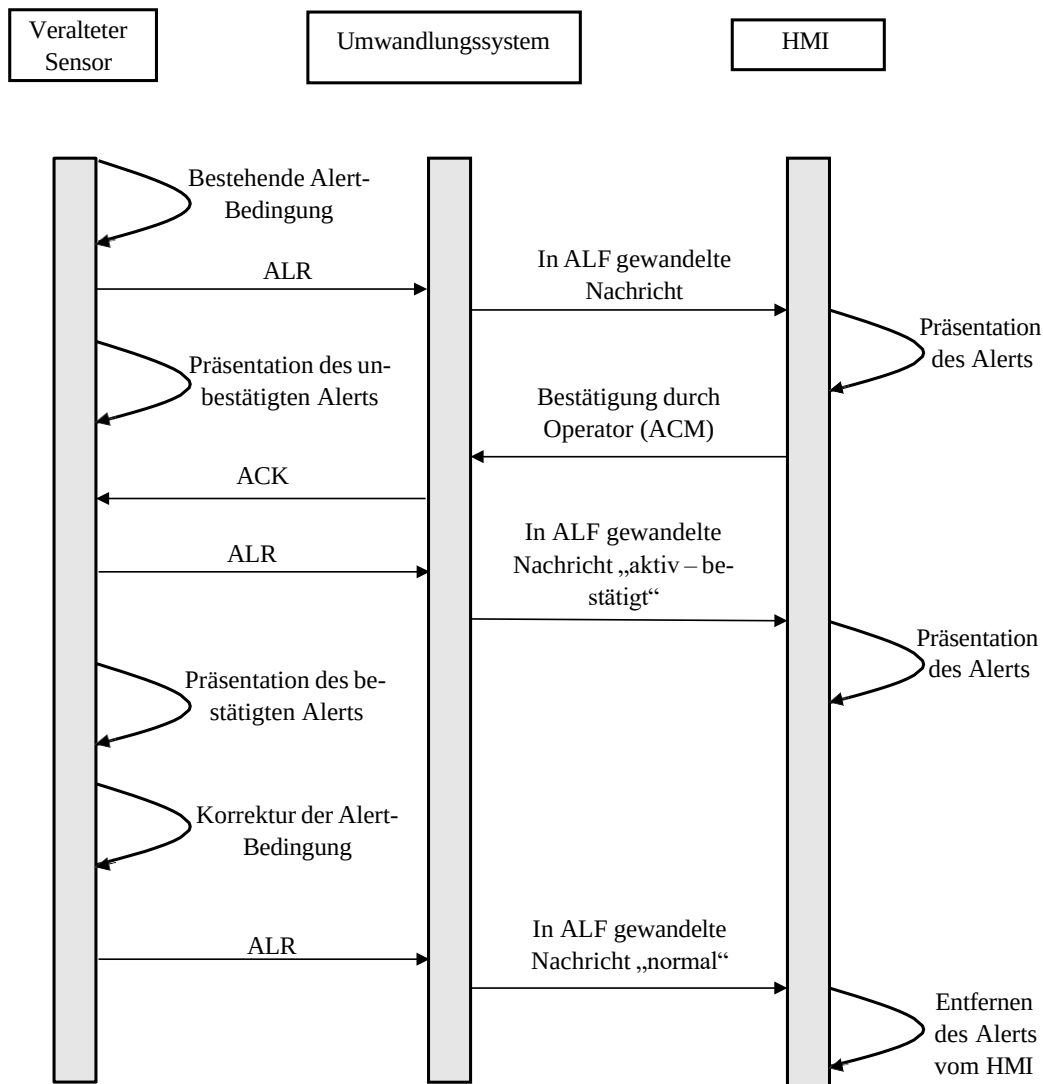


Abbildung 180 Kommunikation von Alerts veralteter Alert-Quellen in Anlehnung an IEC 61924-2

Erzeugt ein Gerät oder System eine Meldung, so wird diese nach der Übersetzung in das ALF-Format zunächst auf einen Node des zentralen OPC-Servers geschrieben. Das BAM-System soll dann die Meldung abgreifen und verarbeiten. Wenn der Operator über das HMI eine bestimmte Statusänderung an der Warnung vornimmt, wird eine Benachrichtigung darüber im ACM-Format an einen Node auf dem Server geschrieben. Das zuständige Gerät, von dem die Warnung stammt, holt die entsprechende Nachricht ab. Nachdem die Meldung am HMI quittiert wird und an das zugehörige Gerät gesendet wird, wird vom Gerät eine Bestätigungsmeldung gesendet. Dieser Kommunikationsablauf ist in Abbildung 181 dargestellt. Hier steht ein "BAM-konformes Gerät" für eine Kombination aus einem veralteten Sensor und einer Umwandlungsfunktion.

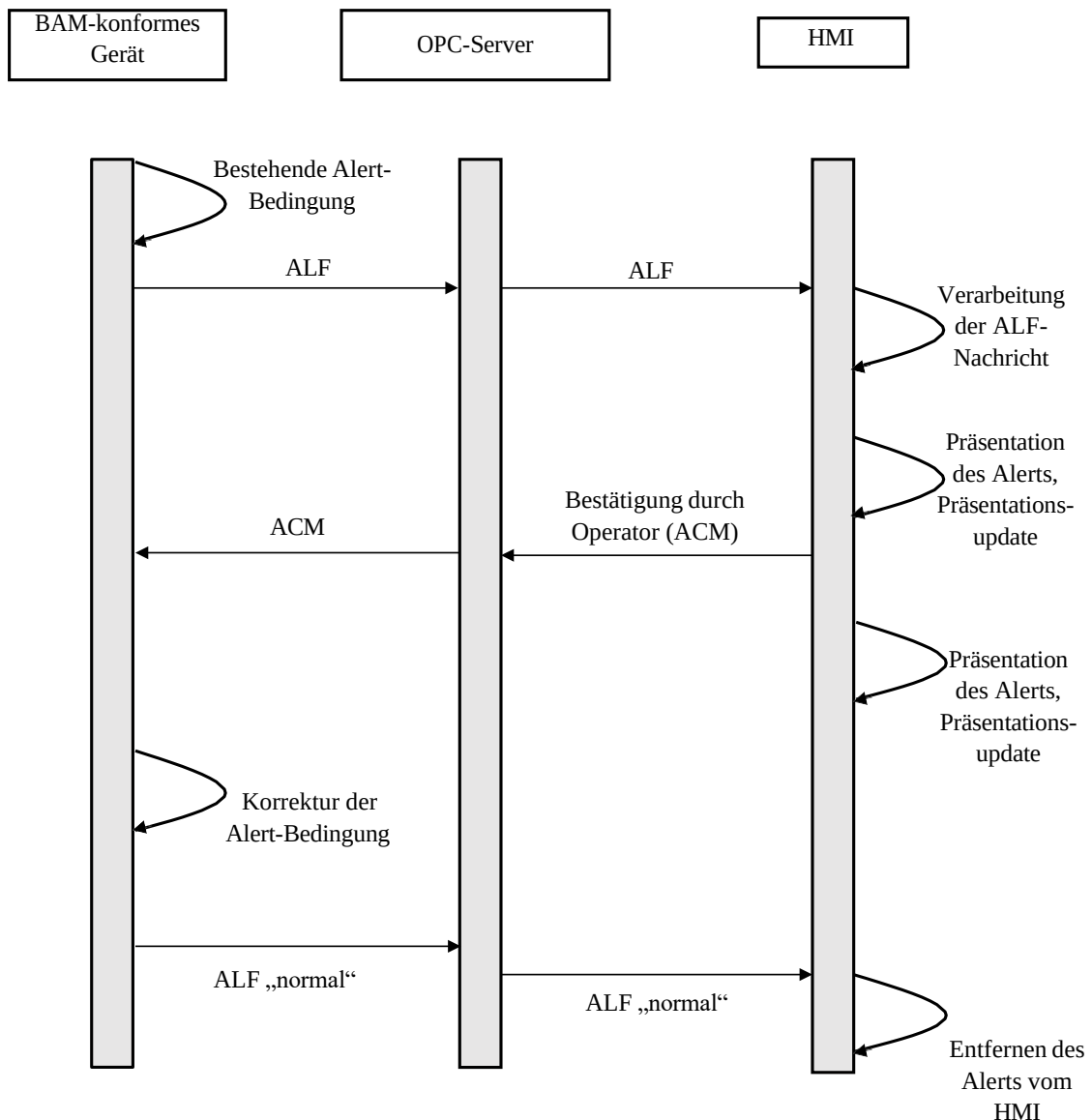


Abbildung 181 Kommunikation von Alerts am Fernsteuerstand

Zur Validierung des BAM-Systems wurde eine kleine Probandenstudie durchgeführt. Da der Entwicklungsstand des Gesamtsystems zum Zeitpunkt der Entwicklung des BAM-Systems noch nicht ausreichend für eine ausgereifte Studie mit realitätsnahen Versuchsszenarien, wurde zur Validierung des BAM-Systems eine rudimentäre Probandenstudie mit Laien durchgeführt. An der Studie nahmen insgesamt 21 Personen im Alter von 20 bis 73 Jahren teil, die sich zu gleichen Teilen aus Männern und Frauen zusammensetzten. Ziel der Validierung ist es, die Komplexität und Verständlichkeit der HMI, den Bedienaufwand sowie die Benutzbarkeit und Erlernbarkeit des Systems zu untersuchen. Dazu wurde eine Kombination aus statischen und dynamischen Aufgaben gewählt, die nur auf dem Bildschirm des für das BAM-System vorgesehenen Simulators ablaufen. Die Probanden sollten nicht durch Ereignisse auf anderen Bildschirmen abgelenkt werden, die für sie im Vergleich zu erfahrenen Schiffsführern zu ungewohnt und damit potenziell ablenkend sind.

Die Probandenstudie bestand aus vier Aufgaben, die von jedem Probanden in der gleichen Reihenfolge nacheinander durchgeführt wurden. In der ersten Aufgabe sollte die Wirkung und Unterscheidbarkeit der auditiven und visuellen Darstellungen der einzelnen Warnprioritäten ermittelt werden. Dazu wurde nacheinander ein Alarm jeder Priorität erzeugt, ohne dass die Probanden wussten, zu welcher

Prioritätsstufe er gehörte. Ihre Aufgabe bestand darin, die Alerts nach ihrer subjektiven Wahrnehmung in eine Reihenfolge zu bringen. Die zweite Aufgabe bestand darin, in eine dynamische Situation einzugreifen, in der sich die Anzeige automatisch veränderte. Dabei sollte das Auftreten von einzelnen Alar-men und einer zusammenhängenden Alarmflut simuliert und der Umgang damit geübt werden. Die dritte Aufgabe bestand darin, mit Hilfe des Gruppenkonfigurators selbst eine kleine Gruppe von Alar-men zu erstellen. Die letzte Aufgabe bestand darin, die statische und dynamische Priorität eines Alerts mit Hilfe des Alert-Konfigurators einzustellen. Nach der Versuchsreihe sollten die Probanden einen Fragebogen ausfüllen, der die System Usability Scale (SUS), ausgewählte Fragen zur Displaykomple-xität und eine Skala für die subjektiv empfundene Anstrengung enthielt.

In der ersten Aufgabe haben 17 von 21 Probanden die Alerts richtig klassifiziert. Drei Fehler entstanden durch die Verwechslung von Not- und Alarmmeldungen aufgrund eines pulsierenden Tons und ein Fehler durch die Verwechslung von Vorsichts- und Warnmeldungen aufgrund eines Alarmsymbols. Die höchste und niedrigste Priorität wurde immer richtig erkannt. In der zweiten Aufgabe bemängelten 2 Probanden den Anzeigenwechsel. Bei der simulierten Alarmflut benötigten 3 Probanden Hilfe, da sie jeden Alarm einzeln behandelten. 4 Probanden versuchten fälschlicherweise, Gruppenalar-me anzuzei-gen. Die meisten schlossen das Fenster korrekt. In der dritten Aufgabe gab es viele Fehler beim Wechsel zwischen Titel- und Beschreibungsfeld. Nur 3 Probanden haben das Eingabefeld korrekt aktiviert. 5 Probanden fanden den Speichern-Button nicht sofort. 6 Probanden hatten Probleme mit dem Eskalati-onsverhalten des Alerts.

Der durchschnittliche SUS-Wert lag bei 86,9 („ausgezeichnet“). Die Erlernbarkeit wurde mit 80,95 und die Benutzbarkeit mit 88,39 bewertet. Über 40-Jährige und Nicht-Ingenieure bewerteten das System schlechter als ihre jüngeren und ingenieurwissenschaftlichen Kollegen. Auch Personen mit Sehschwä- che bewerteten das System schlechter. Die durchschnittlich empfundene Anstrengung lag bei 32,56 von 220 („kaum anstrengend“). Personen über 40 Jahre und Nicht-Ingenieure empfanden die Aufgabe als anstrengender. Häufige Kommentare waren der Wunsch nach einer Enter-Taste zur Bestätigung und die Möglichkeit, Eingabefelder direkt anzuklicken. Weitere Vorschläge betrafen die Verbesserung der Notfallmeldungen und die Benutzerfreundlichkeit des Simulators. Zusammenfassend kann die Gestal-tung der HMI des BAM-Systems als benutzerfreundlich und übersichtlich bezeichnet werden und es gibt starke Hinweise darauf, dass sie in der bisherigen Ausgestaltung für den angestrebten Einsatzzweck geeignet ist.

17.7 Workflowmanagement, Strategieauswahl und Notfallmanagement

17.7.1 Kollisionswarnsystem und Notfallfunktionalitäten

Im Falle einer Notfallsituation müssen vorher festgelegte Prozeduren bereitstehen, um den Schaden an Maschine und Menschen an Bord, sowie an sich im nahen Umfeld befindliche Verkehrsteilnehmer ge-ring zu halten. Der Verlauf dieser Prozesse wurde mit einem Ablaufplan dargestellt, welcher die Steu-erung durch einen Operator bei verschiedenen Arten von Verbindungsproblemen beschreibt. Des wei-teren steht im Ablaufplan die Beschreibung von dedizierten Manövern, welche im Schiffsbetrieb vor-kommen und wie diese im Falle einer Kommunikationsstörung zwischen Operator und Rudergänger an Bord durchgeführt werden müssen.

Bei reduzierter Kommunikation zwischen Landseite und Schiffsseite gibt es Fallbacks, welche einen sicheren Betrieb durch die Crew an Bord gewährleisten. Die beschriebenen Manöver umfassen Einbrü- che in der Kommunikation, sowie der Ablauf bei Kollisionswarnungen, Cyberangriffen von außen, so- wie Notstopp-Manövern und Notankern. Die komplette Darstellung befindet sich im Anhang.

Zusätzlich wurde eine Fehlerbaumanalyse zur Sensorik an Bord des Schiffes erstellt. Hierbei wurde zwischen vier Zuständen der Operabilität vom Fernsteuerstand unterschieden, welche durch den Ausfall von verschiedenen Sensoren auftreten können. Diese Dysfunktionalität wird in verschiedene Kategorien eingeteilt, welche abhängig vom Sensor den Operator, den Rudergänger oder beide Steuermänner einschränkt.

Ein akzeptabler Ausfall kann toleriert werden und wird durch redundante Systeme kompensiert. Ein Ausfall dieser Kategorie sollte beim nächsten Stopp repariert werden. Bei einem Teilausfall wird der Betrieb aus der Ferne eingeschränkt, was mit einer erhöhten Bereitschaft des Rudergängers ausgeglichen wird. Ein Ausfall schränkt die Kontrolle des Operators stark ein und die Steuerung aus der Ferne kann nicht gewährleistet werden, der Schiffsführer an Bord muss übernehmen. Im Zustand des Totalausfalls ist zusätzlich die Bedienung an Bord eingeschränkt, was auch bei nicht ferngesteuerten Schiffen zum Ausfall führt. Bei Ausfall sowie Totalausfall muss ein Hafen zur Reparatur aufgesucht werden. Zusätzlich werden Szenarien beschrieben, bei denen ein Ausfall von Sensorik einen den Schiffsführer an Bord einschränken würde, dies jedoch durch den Operator ausgeglichen werden kann.

Eine genaue Darstellung der Analyse befindet sich im Anhang (Anlage Datei 10 FTA AP9600).

17.7.2 Abbildung von Verhaltensmustern der Schiffsführer

Die Überwachung und Fehlererkennung des Schiffsführers basiert auf der Modellierung von Handlungsroutrinen und -prozessen z. B. anhand von Graphen/Zustandsautomaten. Dies beinhaltet die Beschreibung von Situationen über Konditionen, das heißt, es sind bspw. gewisse Merkmalsausprägungen erfüllt, und den Übergang von einer Problem-/Arbeitssituation zur nächsten. Das Regelwerk wird zur Modellierung des Verhaltens menschlicher Bediener entwickelt. Der Ansatz erweitert die Möglichkeiten bestehender ergebnisorientierter Maßnahmen in HMS und liefert wertvolle Informationen für die weitere Entwicklung und Verbesserung. In dem Arbeitspaket basieren alle höheren Überwachungs- und Assistenzfunktionalitäten auf einem formalisierten, digitalen Abbild des Arbeitsablaufes.

Die Bedingungen werden durch Erlernen der Tätigkeit durch eine geschulte Person sowohl die Tätigkeit beschrieben als auch formal erfasst. Durch eine derartige „transkriptive“ Formalisierung wird die Grundlage für die Erstellung eines datenbankähnlichen Algorithmus erstellt, der automatisiert Handlungsplanungen erlaubt sowie die Sinnhaftigkeiten von Handlungssequenzen bewerten kann (modellbasiert).

Der Schwerpunkt in diesem Arbeitspaket umfasst die formale Beschreibung und Abbildung der Schiffsführertätigkeiten bzgl. Erkennungs-, Planungs-, Entscheidungs- und Handlungskontrolltätigkeiten. Die aufgenommenen Zusammenhänge/Beschreibungen werden in geeignete Beschreibungsformen übertragen, die sowohl die Bestimmung eines Handlungsraumes (Simulation) sowie die Analyse des Handlungsraumes für die nächsten Handlungsschritte situativ erlauben. Der Abgleich der erlernten/erfahrenen Zusammenhänge mit Regelwerken und Experten ist zentral zur Bestimmung des zur Generierung des Referenzverhaltens angelegten Verhaltensmodells.

Workflowmanagement zwischen Leit- und Steuerstand

Das Workflowmanagement erfasst, überwacht und koordiniert die Ausführung von Einzelarbeitsschritten sowie von komplexen, zusammenhängenden Handlungssequenzen. Basierend auf den umfänglichen Gesamtsystemmessungen erkennt es selbstständig – bezogen auf den Einzelarbeitsplatz zur Schiffsführung – den aktuellen Systemzustand, greift indirekt in die Führung des Fahrzeuges in, in dem Warnhinweise und taktische / strategische Assistenz angeboten werden. Auf Basis des Referenzwissens der regelbasierten Arbeitsabläufe ist sowohl eine Überwachung der Abläufe als theoretisch auch Eingriffe möglich bzw. im Sinne eines Workflowmanagements sowie eines Notfallsmanagements ggf. auch notwendig.

Für die Arbeitsroutine wird ein Workflowmanagementsystem entwickelt, welches eine Priorisierung, Parallelisierung und Synchronisierung von Arbeitsabläufen vornimmt. Das System ist als Überwachungs- und Vorschlagssystem konzipiert und zielt auf die Überwachung von Einzelbedieneingaben und sowie auf Bereitstellung von Erklärhilfesystemen sowie im Sinne einer höheren Assistenz, auf die Überwachung des Regelbetriebs und damit der situationsspezifischen Entscheidungen und Handlungs- bzw. Interaktionssequenzen.

Der realisierungstechnische Fokus im AP 5700 beinhaltet die Entwicklung eines Gesamtsystembeschreibungsvektors, welcher alle relevanten, aktuellen Messgrößen der statischen Umgebung, des Schiffes, des gesamten umgebungsrelevanten Verkehrs sowie der Bedientätigkeiten des Schiffsführers geeignet aufbereitet, zusammenfasst und als kontinuierlichen Verlauf für die weitere Verwendung bereitstellt. Hierfür sind zahlreiche Anpassungen und Abschätzungen/Bewertungen im Sinne einer Vorfilterung vorzunehmen. Aufbauend auf dem in AP 5400 erstellten Modell werden in Kombination mit dem Gesamtsystembeschreibungsvektors Vorausschautrechnungen für zu erwartende sowie mögliche/logische Tätigkeiten geniert und bewertet. Abhängig von der Gesamtkomplexität werden Routinen zur situativen Bewertung der Gesamtsituation entwickelt, die sowohl aktuelle Risiken, Handlungsintentionen (vornehmlich des betrachteten Schiffsführers) und Handlungsziele automatisiert bestimmen. Eine Analyse dieser Prozesse, u.U. auch in Kombinationen mit dem Erfahrungsprofil der schiffsführenden Person, erlaubt die Bestimmung von Fehlverhalten (oder von vermutetem Fehlverhalten). In Kombination mit den Handlungsoptionen (situativer Handlungsraum) lassen sich automatisiert ebenfalls Optionen für Handlungsalternativen bestimmen, welche Grundlage für die Teilkopplung bei der Fahrzeugführung bzw. die Übernahme der Fahrzeugführung sein kann. Die entstehende Differenz zwischen „Das wäre die richtige Verhaltensstrategie“ und „Die eingeschlagene Verfahrensweise führt auf ein inakzeptables Risiko bzw. beinhaltet eine erhöhte Gefährdung“ etc. erlaubt viele Optionen im Sinne einer Assistenzfunktionalität auf der Ebene von Verhalten (im Sinne eines Workflowmanagements oder einer Notfallfunktionalität) zu realisieren.

Situationauswahl sowie Strategienentwicklung

Dieses Teilarbeitspaket umfasst die Bestimmung ausgewählter Konflikt- und Notsituationen für die Bestimmung des Notfallmanagements sowie die Entwicklung einer gestuften Warn- und Hinweisstrategie unter Integration der unterliegenden Warnstrategie des Steuerstandes.

Entwicklung des Notfallmanagements basierend auf Handlungsalternativen

Dieses Teilarbeitspaket beinhaltet die Entwicklung der Notfallfunktionalitäten insbesondere unter Nutzung von Handlungsraum, Situations- und Workflowmanagement, von Handlungsalternativen in Kombination mit aktuellen Trajektorien-schätzungen. Die Arbeitsschritte umfassen Bewertung von Handlungssequenzen hinsichtlich der Optimalität und Effizienz, Entwicklung einer spezifischen Kollisions-Warnstrategie unter besonderer Berücksichtigung der Integration von Handlungsalternativen und die Weitergabe der optimalen Handlungsschritte.

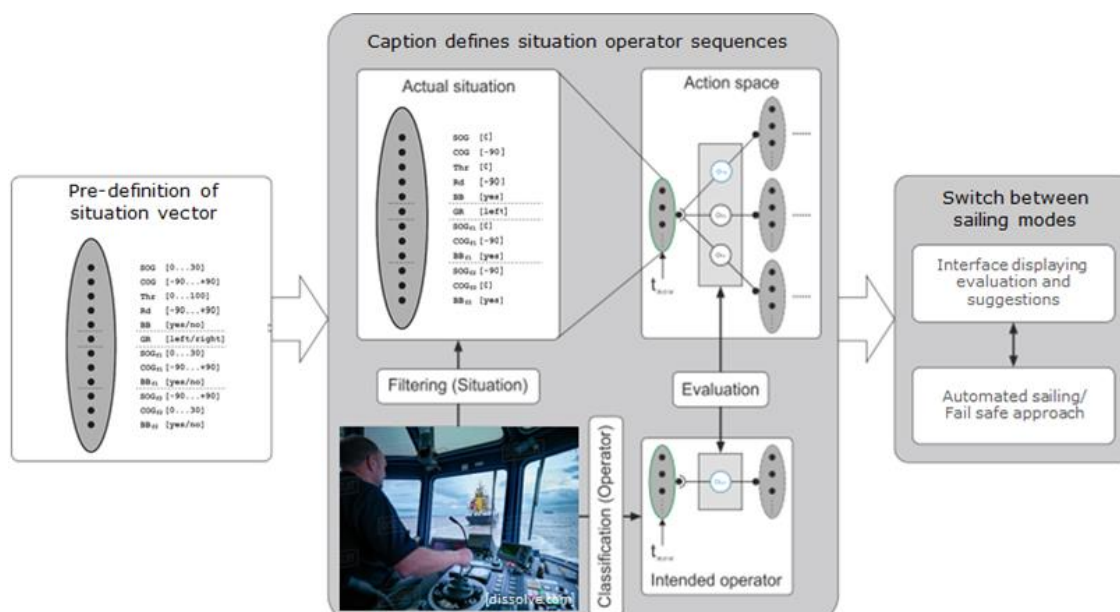
Abbildung von Verhaltensmustern der Schiffsführer

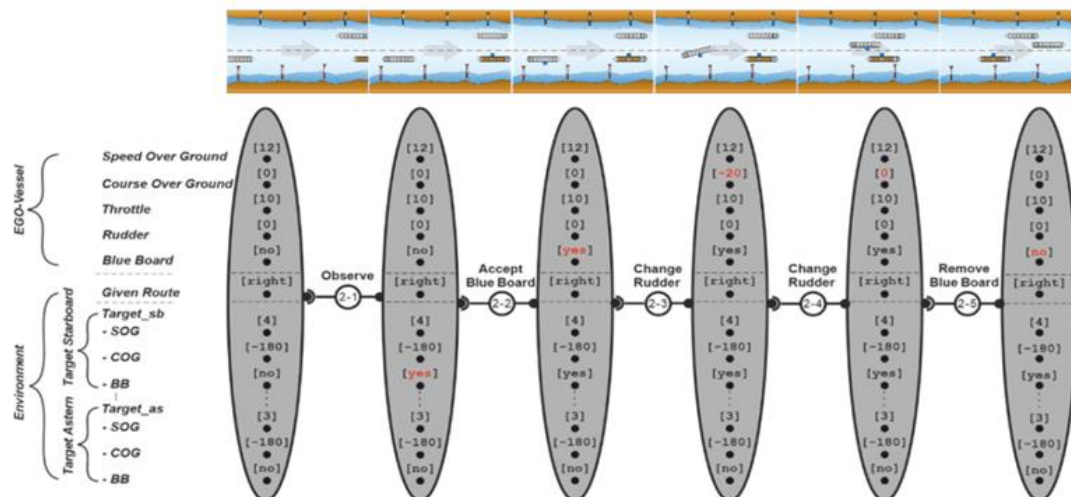
In Absprache mit den an diesem Arbeitspaket beteiligten Verbundpartnern wurden relevante Informationen wie die Qualität und die zeitliche Auflösung der Schiffsführungstätigkeit abgestimmt sowie spezifische Situationen definiert. Zudem wurden die notwendigsten Variablen festgelegt.

Zur Beschreibung und Abbildung der Schiffsführertätigkeiten bezüglich der Erkennungs-, Planungs-, Entscheidungs- und Handlungskontrollmöglichkeiten wird ein graphisches Modell entwickelt. Zu diesem Zweck wurden mehrere mehrwöchige Mitfahrten auf der Ernst Kramer geplant, damit der Projektbearbeiter die Schiffsführeraktivitäten in den verschiedenen Situationen konkret erfassen kann. Auf dieser Basis wurde das grafische Beschreibungsmodell detailliert erstellt.

Zur Entwicklung des grafischen Beschreibungsmodells gehört auch die Auswahl von Szenarien, die im Projekt zu bearbeiten sind. Die Szenarien wurden mit den Projektpartnern abgesprochen bzw. konsensuell festgelegt. Zur einführenden Verdeutlichung wurde ein Manöver visualisiert und vorbereitet. Diese Manöver beschreiben einen Überholvorgang bzw. das entsprechende Aus- bzw. Einscheren des Schiffes entlang der Fluss- bzw. Kanalroute. Da hierfür eine Interaktion der Schiffsführer mit der sogenannten „blauen Tafel“ sowie die Kenntnis der Schifffahrtsregeln notwendig ist, handelt es sich um ein interaktives Manöver mit Konfliktpotenzial, worin das talfahrende Schiff einen Fahrweg zu wählen hat, ob es rechts oder links vom bergfahrenden Schiff überholt. Diese beispielhafte Verkehrssituation ist in Abbildung 2 in abstrakter Weise durch die sogenannte Situations-Operator-Modellbildung dargestellt. Die Situationen, die in den zu betrachtenden Verkehrsszenarien auftreten, werden durch Operatoren und Relationen miteinander verknüpft.

Die Abbildung des Interaktionsmusters des Schiffsführers beruht auf dem zu entwickelnden grafischen Beschreibungsansatz. Dieses basiert auf der Situations-Operator-Modellbildung (SOM). Mit Hilfe dieser Methode lässt sich die Mensch-Maschine-Interaktion beschreiben. In diesem Projekt wird die SOM für die Mensch-Maschine-Schnittstelle zwischen dem Schiffsführer und seiner Umgebung verwendet. Abbildung 1 zeigt eine qualitative Darstellung der Modellbildung der Zusammenhänge.





Abbildungung 182 Beispiel für die Beschreibung eines komplexen Interaktionsgeschehens bzw. eines sich entwickelnden Verkehrsszenarios mittels der Situation-Operator-Modellbildung (SOM)

Die automatisierte Bestimmung des Situationsvektors, die Überprüfung der Ablauflogik sowie das Aufzeigen von Alternativen wird in den kommenden Arbeitspaketen bearbeitet.

Relevante Fahrscenarien sowie Handlungstätigkeiten des Schiffsführers wurden mit den Partnern besprochen und detailliert. Anschließend wurden zwei zweiwöchige Mitfahrten auf der Ernst Kramer durchgeführt, worin der Projektbearbeiter relevante Szenarien, kritische Fahrsituationen sowie die Handlungstätigkeiten des Schiffsführers notiert und analysiert hat.

Diese Szenarien wurden unter Anwendung des Situation-Operator-Modellbildung-Ansatzes graphisch dargestellt, wodurch die Situationen innerhalb eines Verkehrsszenarios mittels eines Situationsvektors, Operatoren, Vorfiltern sowie Relationen miteinander verknüpft werden und auf diese Weise formalisierbar dargestellt werden können.

Basierend auf den vorhandenen Fahrscenarien sowie den Handlungstätigkeiten des Schiffsführers konnte der Situationsvektor, der auf Handlungsebene logische und physikalische Größen enthält, die für die Entscheidungen des Schiffsführers wichtig sind, ergänzt und kontinuierlich vervollständigt werden. Darüber hinaus konnten aus den detaillierten Fahrscenarien Operatoren abgeleitet werden. Die Operatoren dienen dazu, die Handlungen des Schiffsführers innerhalb des graphischen Modells zu beschreiben sowie die Situationen miteinander zu verknüpfen. Tabelle 1 zeigt die Merkmale des Situationsvektors; die Operatoren sind in Tabelle 2 aufgelistet.

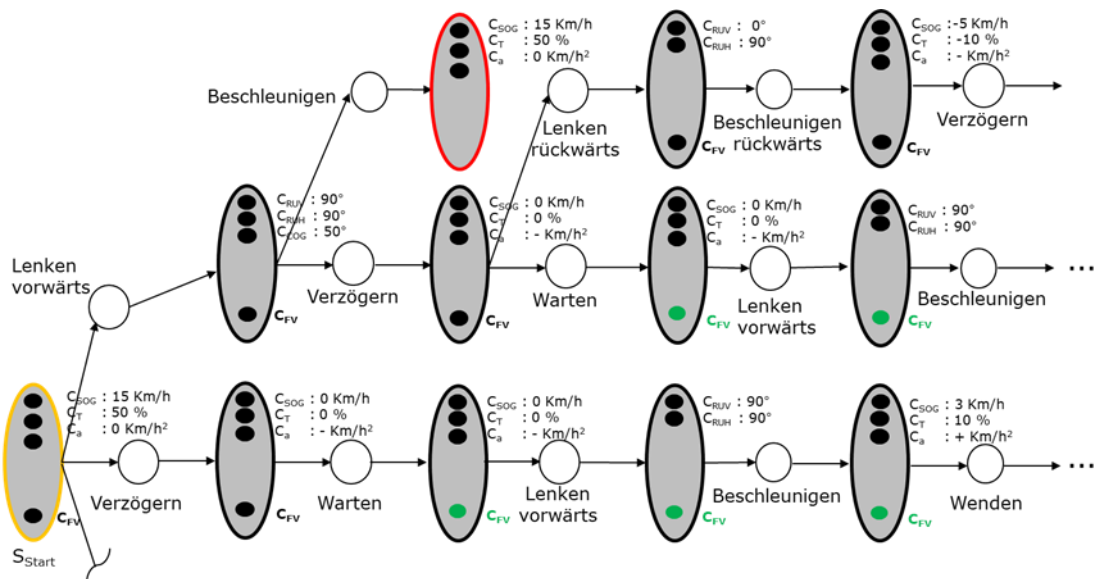


Abbildung 183 Ausschnitt eines Handlungsraums für ein Wendemanöver als Beispiel

Die Sequenz von Handlungen des Schiffsführers und die möglichen Fahrscenarien/Handlungs-optionen werden als graphische Handlungsräume abgebildet. Ein Handlungsraum umfasst die Operatoren, die Situationen bzw. die entsprechenden Situationsvektoren für jede betrachtete Situation. Mögliche Handlungssequenzen für eine gegebene Ausgangssituation werden bestimmt und graphisch dargestellt. Ein Handlungsraum zeigt damit auf, welche Handlungssequenzen zu dem gegebenen Ziel führen können. Abbildung 183 zeigt einen Ausschnitt eines Handlungsraumes für ein Wendemanöver. Die Startsituation ist mit S_{Start} gekennzeichnet, während die Zielsituation mit S_{Final} benannt wird. Die grauen Ellipsen sind die Situationsvektoren, die die Merkmale als schwarze Punkte enthalten. Die Werte dieser Merkmale und somit die Situationsvektoren ändern sich entsprechend der aktuellen Situation. Die Operatoren werden als kleine weiße Kreise dargestellt und beschreiben die Handlungen.

Die abschließende Liste der für die kompakte Situationsvektordarstellung benötigt Sensor- und Informationsdaten, die sowohl für die automatisierte Bestimmung der Handlungen des Schiffsführers wie auch die automatisierte Bestimmung des Situationsvektors und der Vorfilter notwendig sind, wurden in Absprache mit den Projektpartnern definiert. Zusätzlich werden als nächster Schritt, in Absprache mit den Partnern, Fahrscenarien von Schiffen an bestimmten Orten für festgelegte Zeiträume aufgenommen bzw. wiedergegeben. Damit soll dadurch erreicht werden, dass diese Szenarien mehr mögliche reale Handlungen für die vorhandenen Szenarien aufzeigen. Hierdurch soll die große Variabilität von Handlungsoptionen sichtbar werden bzw. im Workflowmanagement der Überwachung berücksichtigt werden können.

Das abzubildende Verhaltensmuster kann damit ebenfalls um weitere mögliche Handlungssequenzen erweitert werden.

Die softwaretechnische Umsetzung, d. h. die konkrete automatisierte kontinuierliche Zuordnung von am Fahrstand erfassten Bedienhandlungen zu Operatoren, deren Zuordnung/Passung zum kontinuierlich aktualisierten Situationsvektor sowie die situierte Erstellung des Handlungsraumes zur Bestimmung sinnvoller kommender Handlungen sind Gegenstand der nächsten Arbeiten in diesem Arbeitspaket.

Workflowmanagement zwischen Leit- und Steuerstand

Zur Erfassung aller Systeminformationen und Überwachung von Handlungs- und Entscheidungsfehlern des Schiffsführers gehört die Entwicklung eines Workflowmanagementsystems.

Im Vorfeld der Bearbeitung wurde die Zuordnung und datentechnische Positionierung des Workflowmanagements landseitig und mit direktem Bezug einer Stelle, in der die notwendigen Daten vorliegen, festgelegt.

Ebenfalls wurden die Auflösung und Detailtiefe festgelegt sowie Absprachen zu Vorfiltern getroffen. Zusätzlich sind die Szenarien, die im TAP5400 verwendet werden Bestandteil von _AP 5700. Daher wird dieser AP gemäß dem Gant-Diagramm früher gestartet, damit alle initialen Annahmen berücksichtigt werden können, die in TAP 5400 erforderlich sind.

Für die Überwachung der Schiffsführtätigkeiten wurden verschiedene Strategien entwickelt. Hierbei wurden Überwachungsebenen definiert, die auf den vorhandenen Operatoren und somit Handlungen beruhen und deren Zuordnung zur aktuellen Situation betrachten. Für die entsprechende Einordnung ist daher Wissen notwendig, welches über die Handlungsräume situationsspezifisch und entsprechend situativ (und später online) ermittelt wird.

Die genannten Überwachungsstrategien sowie Ebenen sind mit der Konzeption des Situationsvektors, der Definition der Operatoren sowie der des Handlungsraumes verknüpft. Der Handlungsraum enthält optionale Handlungsmöglichkeiten, die daraus entstehen, dass der Schiffsführer zwar für die aktuelle Situation u. U. nicht optimal gehandelt hat, seine Handlung jedoch zulässig ist und über unterschiedlich strukturierte Handlungssequenzen ebenfalls zum Ziel führt. Werden im Handlungsraum jedoch Entscheidungen getroffen, die nicht mehr zum bekannten Ziel führen, kann nicht mehr von einer sinnvollen, d. h. zulässigen Handlung gesprochen werden.

Es wurde ein Tool zur Visualisierung aufgezeichneter Fahrtrajektorien ausgewählter Schiffe an bestimmten Orten für einen Zeitraum von 365 Tagen entwickelt und implementiert. Die Implementierung erfolgte in C++ und Python sowie im Framework ROS (Robot Operating System). Hierbei werden ENC-Daten (Electronic Navigational Chart) mittels eines Python-Codes in ein Shapefile-Format umgewandelt, sodass die geographischen Daten und somit die Infrastrukturdaten der zu visualisierenden Orte verarbeitet werden können. Anschließend wird die geographische Karte mittels C++ sowie ROS visuell dargestellt.

Ein Handlungsraum enthält mehrere mögliche Handlungen. Diese Handlungen müssen in den Handlungsraum integriert und eingebunden werden. Die situative Bereitstellung der Handlungsräume bildet den methodischen und numerischen Kern des Workflowmanagements. Jeder Handlungsraum enthält alle zulässigen Handlungen des Schiffsführers, ausgehend von einer bestimmten Situation. Die bestimmten Fahr- und Handlungssequenzen werden verwendet, um unzulässige und zulässige Handlungen zu trennen. Die Klassifizierung der Handlungen beruht auf den Überwachungsstrategien, indem unzulässige Handlungen erkannt werden (Ebene 0) und direkte und indirekte Handlungsfehler voneinander unterschieden werden (Ebene 1). Sollte der Schiffsführer unzulässig bzw. zulässig, aber nicht sinnvoll gehandelt haben, wird eine Fehlermeldung vom Workflowmanagement angezeigt. Das Workflowmanagement könnte daraufhin die Übernahme der Fahrfunktion in Gefahrensituationen einleiten.

Die softwaretechnische Umsetzung des Workflowmanagements erfordert die Implementierung der Handlungsräume. Ein softwaretechnisches Konzept wurde entwickelt und eine Implementierung in C++ durchgeführt. Handlungsräume sind dabei im Allgemeinen als graphische Entscheidungsbäume implementiert, deren Knoten jeweils die Merkmale des Situationsvektors enthalten [Bej2022a]. Die Merkmale des Situationsvektors sind in Tabelle 22 zu finden. Die Operatoren sind in

Tabelle 23 aufgelistet.

Tabelle 22: Liste der Merkmale in einem Situationsvektor

Merkmale	Einheit
C ₁ : Speed over ground	[m/s]
C ₂ : Course over ground	[°]
C ₃ : Longitude	[°]
C ₄ : Latitude	[°]
C ₅ : Northing	[m]
C ₆ : Easting	[m]
C ₇ : Ruderwinkel	[°]
C ₈ : Gierwinkel	[°]
C ₉ : Gierrate	[1/°]
C ₁₀ : Driftwinkel	[°]
C ₁₁ : Beschleunigung	[m/s ²]
C ₁₂ : Zustand des Gashebels	[%]
C ₁₃ : Zustand des Ruderhebels	[%]
C ₁₄ : Blaue Tafel	[-]
C ₁₅ : Time to closest point of approach	[s]
C ₁₆ : Distance to closest point of approach	[m]
C ₁₇ : Abstände zu anderen Schiffen	[m]
C ₁₈ : Abstand zum Flussufer	[m]
C ₁₉ : Fahren im zulässigen Bereich	[-]
C ₂₀ : Fahren im zulässigen Bereich	[-]
C ₂₁ : Einhalten des zulässigen Abstands zum Flussufer	[-]

Tabelle 23: Liste der vordefinierten Operatoren

Name des Operators	Beschreibung und Anforderung
O ₁ : Beschleunigen	Drücken des Gashebels
O ₂ : Verzögern	Ziehen des Gashebels
O ₃ : Warten	Nicht handeln
O ₄ : Streckenfahrt nach Steuerbord	Betätigung des Ruders im Uhrzeigersinn
O ₅ : Streckenfahrt nach Backbord	Betätigung des Ruders gegen den Uhrzeigersinn
O ₆ : Streckenfahrt nach Steuerbord mit Beschleunigung	Betätigung des Ruders im Uhrzeigersinn und Drücken des Gashebels
O ₇ : Streckenfahrt nach Backbord mit Beschleunigung	Betätigung des Ruders gegen den Uhrzeigersinn und Drücken des Gashebels
O ₈ : Streckenfahrt nach gerader Richtung	Betätigung des Ruders zur Nullposition
O ₉ : Blaue Tafel	Aktivierung bzw. Deaktivierung der blauen Tafel

Die Fahrtrajektorie des Fahrverhaltens der Schiffe wird durch die Position (beschrieben durch die geographische Länge und Breite), den Zeitstempel und den Kurswinkel visualisiert. Die betrachteten Orte sind in Tabelle 24 aufgelistet.

Tabelle 24: Region der zu visualisierende Fahrtrajektorien

Region	Kilometerbereich nach https://atlas.wsv.bund.de/
Hafen in Duisburg	778 Km - 783 Km
Hafen in Neuss	736 Km - 745 Km
Hafen in Krefeld	760 Km - 769 Km
Rheinbogen am Rheinvorland im Orsoyer Rheinbogen	796 Km - 803 Km
Rheinbogen am Rheindeich in Duisburg-Homberg	782 Km - 788 Km

Es wurde anschließend ein erweiterter AIS-Datensatz von 366 Tagen vom Projektpartner BAW bereitgestellt. Mittels des neuen Datensatzes lassen sich neue Fahrscenarien und somit Handlungsmöglichkeiten ableiten. Neue Handlungstätigkeiten dienen der Erweiterung der Handlungsräume.

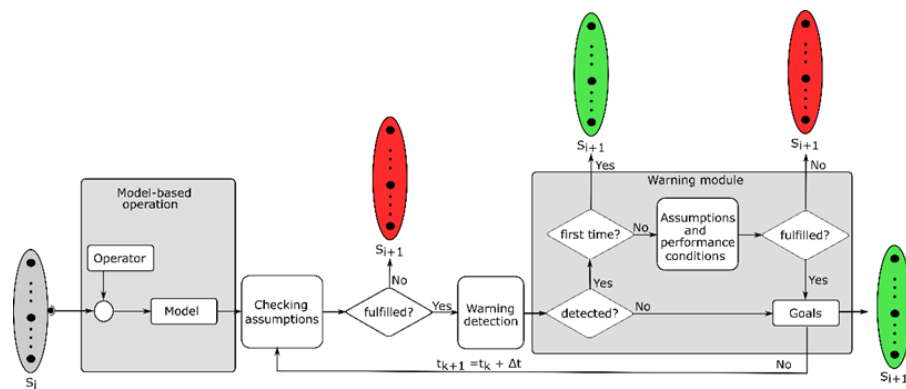


Abbildung 184 Ereignisdiskrete Generierung sowie Regelung von Situationen zur Erkennung von Konflikten und Warnungen [Bej2023]

Ein ereignisdiskretes Modell des Workflowmanagements wurde in [Bej2023] entwickelt, welches in Abbildung 184 dargestellt ist.

Warnungen dienen zur Bestimmung und Erkennung von Operatoren, die in der Zukunft möglicherweise zu unzulässigen und/oder gefährlichen Situationen führen. Dies lässt sich wie folgt modellieren: Beim Unterschreiten der Obergrenze eines Toleranzintervalls wird eine Warnung erkannt. Sollte die Warnung zum ersten Mal auftreten oder wird die maximal zulässige Operationszeit erreicht, wird eine neue Entscheidungsfindung sowie eine Suche nach neuen, möglichen Operatoren generiert. Wenn die Warnung aus der vorherigen Situation weiterhin existiert, werden die Bedingungen sowie die Zwischenziele auf Erreichbarkeit geprüft.

Für die Verhaltensplanung von möglichen Handlungen sind Informationen über das zukünftige Fahrverhalten anderer Verkehrsschiffe wichtig. Die Trajektorienprädiktion liefert die vorhergesagte Position von den Verkehrsschiffen, die auch kontinuierlich und parallel zur Generierung möglicher Handlungen berechnet wird. Die Trajektorienprädiktion aus AP8100 wurde in den Algorithmus des Workflowmanagements integriert. SOG und COG lassen sich aus der prädizierten Position berechnen. Somit lassen sich Zuverlässigkeitskriterien wie der Abstand zu anderen Schiffen und die prädizierte ‚Time to closest point of approach‘ berechnen.

Eine wissensbasierte Analyse zur Bestimmung der Werte bezogen auf Konflikte und Warnung wurde durchgeführt. Reale Fahrscenarien wurden betrachtet und relevante Kriterien wurden untersucht. Als

Beispiel wurde das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ betrachtet (siehe Abbildung 185).

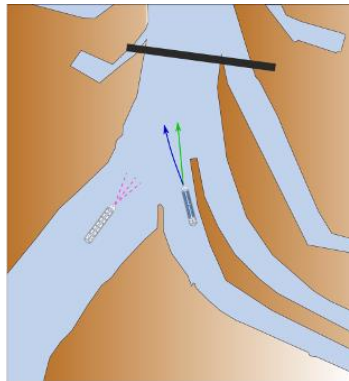


Abbildung 185 Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein [Bej2022b]

Abbildung 186 zeigt eine Häufigkeitsverteilung für den Time to closest point approach (TCPA) basierend auf betrachteten Fahrscenarien. Der Referenzwert liegt bei 22,16 s, der untere Wert der prozentualen Häufigkeit 68% liegt bei 8,32 s. Es lassen sich daraus die Obergrenze $TCPA_w = 22,16$ s und die Untergrenze $TCPA_k = 8,32$ s des Toleranzintervalls bestimmen.

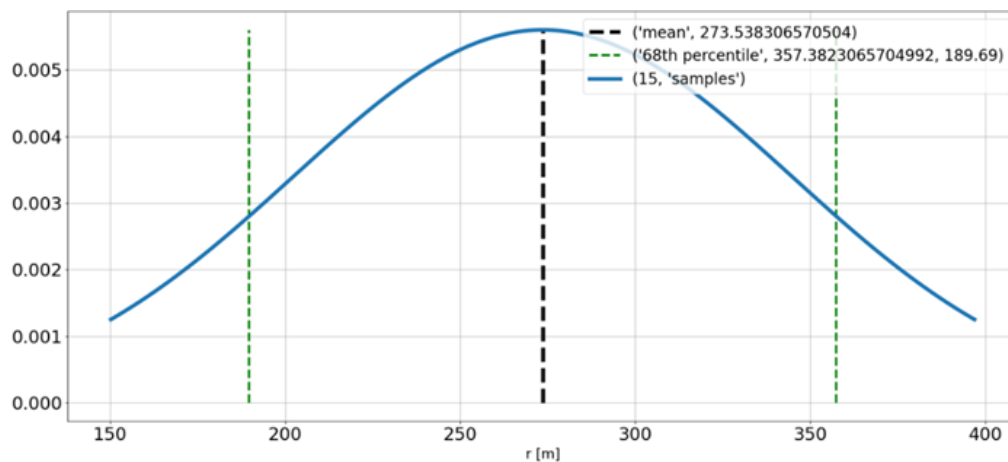


Abbildung 186 Ergebnis der wissensbasierten Analyse für Time to closest point of approach (TCPA)

Analog wird das Toleranzintervall für den euklidischen Abstand ermittelt. Die Obergrenze, deren Unterschreiten zu einer Warnung führt, ist $r_w = 273,538$ m. Ein Konflikt wird erreicht, wenn $r_k = 189,69$ m unterschritten wird.

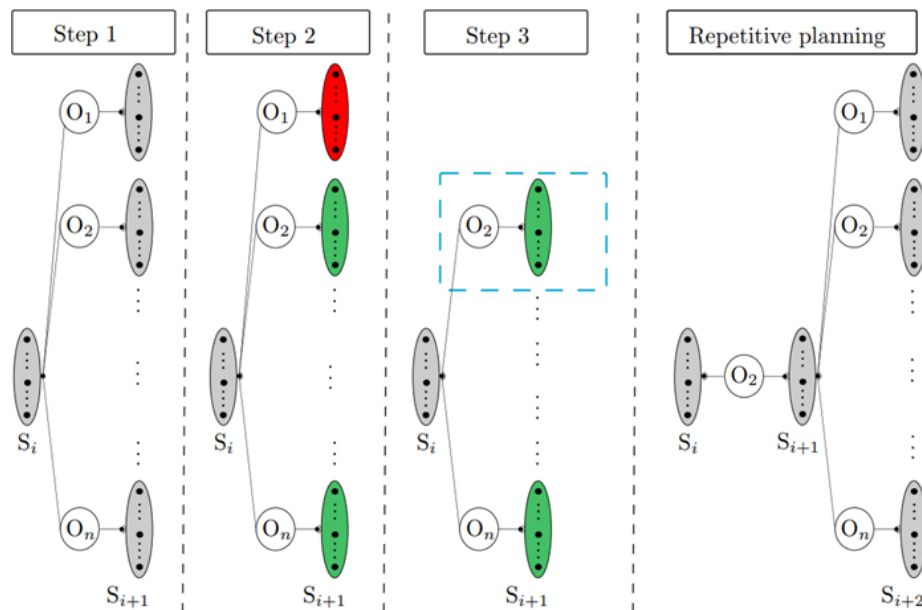


Abbildung 187 Darstellung der kontinuierlichen Verhaltensplanung [2]

Das Vorgehen zur Verhaltensplanung und Generierung von Situationen in der Zukunft ist in Abbildung 187 dargestellt. In Schritt 1 werden alle vordefinierten Operatoren betrachtet. In Schritt 2 werden die aus jedem Operator resultierenden Situationen unter Anwendung der ereignisdiskreten Regelung berechnet. Situationen, die sich aufgrund einer unzulässigen Handlung ergeben, sind als rote Situationsvektoren dargestellt, während grüne Situationsvektoren sich auf aus zulässigen Operatoren resultierenden Situationen beziehen. In Schritt 3 werden nur zulässige Operatoren betrachtet. Der zuverlässigste Operator wird ausgewählt [Bej2023].

Die Planung und Prädiktion zulässiger Operatoren erfolgte in Form eines repetitiven Prozesses. Die in Abbildung 8 dargestellten Zusammenhänge beziehen sich auf die Planung und Prädiktion der nächsten möglichen Situation. Eine Planung von Sequenzen aus Situationen und Operatoren als Handlungsräume ist ebenfalls möglich.

Die oben beschriebene Verhaltensplanung wurde auf das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ angewandt. Die Anfangssituation ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Zwischenziele sind mit einem grünen Haken gekennzeichnet. Das erste Zwischenziel ist, die Hafenausfahrt zu erreichen. Das zweite Zwischenziele ist, auf dem Rhein in gerader Richtung zu fahren, dies wird mit dem mathematischen Ausdruck $\text{COG} = 20^\circ$ beschrieben. Das finale Ziel besteht darin, den Bereich kurz vor der Brücke zu erreichen [Bej2023].

Die Ergebnisse der Verhaltensplanung angewandt auf das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ sind in Abbildung 189 dargestellt. Die folgenden Bedingungen wurden berücksichtigt:

- Der zulässige Fahrbereich: Dieser besteht aus dem Bereich der Ruhr sowie der Fahrrinne des Rheins. Das Verlassen des Fahrbereichs führt zu einem Konflikt.
- Die maximal zulässige Geschwindigkeit: Diese wird anhand des Römischen Modells [Li2017] berechnet und beträgt in diesem Fall 5,07 m/s. Beim Überschreiten dieser Geschwindigkeit wird eine Warnung angezeigt und eine neue Entscheidungsfindung generiert.
- Der maximale Abstand zum linken Flussufer des Rheins. Dieser Wert wird verwendet, damit sichergestellt ist, dass das Schiff einen ausreichenden Abstand von der rechten Flussseite hat. Der maximale Abstand zum linken Flussufer beträgt 201,83 m. Ein Überschreiten dieses Wertes führt zu einem Konflikt. Die Berechnung erfolgt nach der Methodik in [Abr2011]. [Li2017]

- Time to closet point of approach (TCPA): Gemäß Abbildung 6 führt ein Unterschreiten von $TCPA_w = 22,16$ s zu einer Warnung und somit zur Berechnung neuer möglichen Handlungen, um einen Konflikt in der Zukunft zu vermeiden. Wird $TCPA_k = 8,2$ s unterschritten, kommt es zu einem Konflikt.
- Euklidischer Abstand (r): Dieser Abstand bezieht sich auf die Distanz zu den Schiffen in der Umgebung. Eine Warnung tritt auf, wenn $r_w = 273,538$ m unterschritten wird. Ein Unterschreiten von $r_k = 189,69$ m führt zu einem Konflikt.

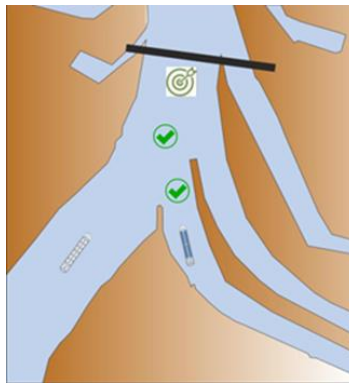


Abbildung 188 Anfangssituation und Zwischenziele des Fahrmanövers Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein.

Die Ausgangssituation sei S_0 . Mögliche Handlungen sind: Beschleunigen (O_1), Verzögern (O_2) und „Fahren nach Steuerbord mit Legen des Ruders“ (O_4). Das Schiff darf so lange beschleunigt werden, bis die maximale Geschwindigkeit von 5,07 m/s nach 59 s erreicht wird, eine Warnung auftritt und somit eine neue Handlung erforderlich ist. Beim Zurücknehmen der Gasstellung (Operator 2) kommt das Schiff nach 114 s zum Stillstand. Der Operator 4 führt nach 55 s zum Unterschreiten von $TCPA_w = 22,16$ s und somit zu einer Warnung. Weil die Handlung „Verzögern“ ein zulässiger Operator ohne Warnung ist, wird die daraus resultierende Situation als die nächste ausgewählt. Die aktuelle Situation ist S_1 . Mögliche folgende Handlungen sind, aus dem Stillstand zu beschleunigen (O_1) oder zu warten (O_3). Eine Beschleunigung führt nach 24 s zum Unterschreiten von $TCPA_w = 22,16$ s. Die Betätigung des Ruders während des Stillstands ist nicht möglich. Die Handlung „Warten“ wird für die nächsten 75 s ausgeführt und das Schiff wartet so lange, bis der Fahrbereich frei ist und keine Konflikte oder Warnungen mehr auftreten können. Die aktuelle Situation ist dann S_2 und das Schiff befindet sich im Stillstand. Die einzige mögliche Handlung ist, aus dem Stillstand zu beschleunigen. Nach 114 s wird die Mündung erreicht und somit das erste Zwischenziel. Die nächsten möglichen Handlungen in der neuen Situation S_3 sind, zu verzögern (O_2) und mit dem Ruder 39 s nach Steuerbord zu steuern (O_4). Der Operator 4 führt zum zweiten Zwischenziel, während „Verzögern“ ohne Existenz von Warnungen oder Konflikten unnötig ist. Daher wird O_4 ausgewählt. Daraufhin ist S_5 die aktuelle Situation. Der Operator O_5 wird ausgeführt, um das Schiff in gerader Fahrtrichtung zu halten. Der Operator O_5 führt zum Erreichen des finalen Zieles [Bej2023].

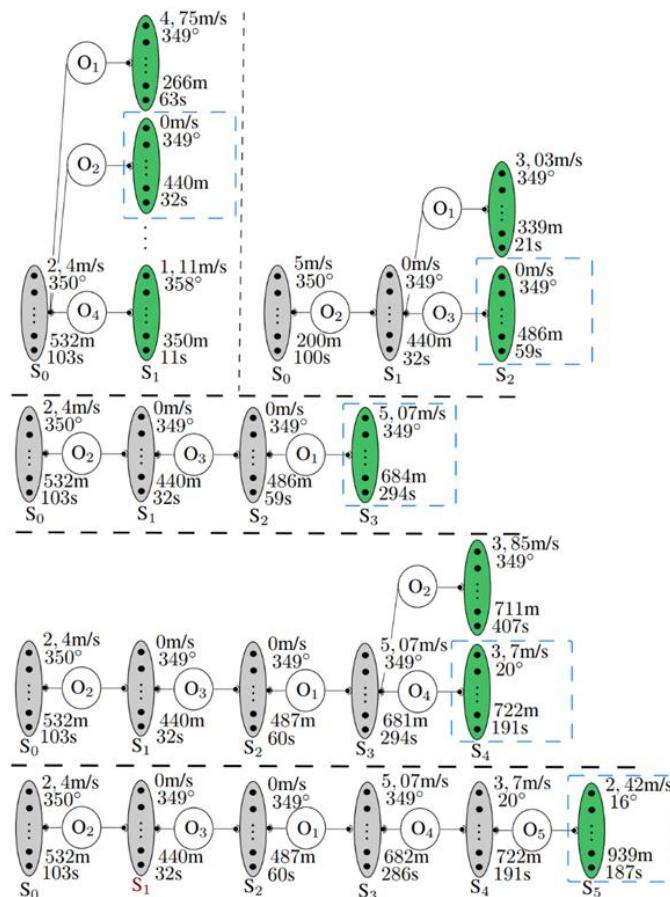


Abbildung 189 Anwendung der Methode der Verhaltensplanung auf das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ [Bej2023]

Die in Abbildung 187 dargestellte Planung liefert die Prädiktion einer nächsten möglichen Handlung. Die Planung und Vorhersage von möglichen Sequenzen bestehend aus Operatoren und Situationen ist jedoch zuverlässiger und aussagekräftiger, um kritische Situationen in der Zukunft vermeiden zu können. Es müssen somit mit den gleichen Methoden aus den Abbildungen Abbildung 182 und Abbildung 186 Handlungsräume, die die möglichen Handlungssequenzen enthalten, geplant und prädiziert werden.

Die Verhaltensplanung eines Handlungsraums, angewendet auf das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ ist in Abbildung 190 dargestellt. In einer Handlungssequenz werden die nächsten drei möglichen Aktionen und die daraus resultierenden Situationen geplant. Das Ergebnis des ersten geplanten Handlungsraums ist nur eine Sequenz aus den Handlungen Verzögern (O_2), Warten (O_3) und Beschleunigen (O_1). Die Planung der Handlungsräume ist ein repetitives Verfahren. Es wird angenommen, dass während einer geplanten Handlungssequenz keine Änderungen in der Umwelt auftreten und somit keine Warnungen oder Konflikte zustande kommen können. Die letzte Situation der zuverlässigsten prädizierten Handlungssequenz wird bei der Planung des nächsten Handlungsraums zur neuen initialen Situation.

In Abbildung 191 ist der Handlungsraum aus Abbildung 191 sowie der nächste Handlungsraum dargestellt. Der neue Handlungsraum enthält fünf Handlungssequenzen, von denen vier bereits zum Endziel führen.

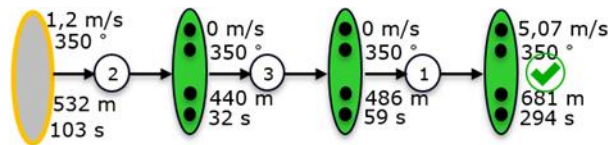


Abbildung 190 Planung eines ereignis-diskreten Handlungsraums angewandt auf das Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein

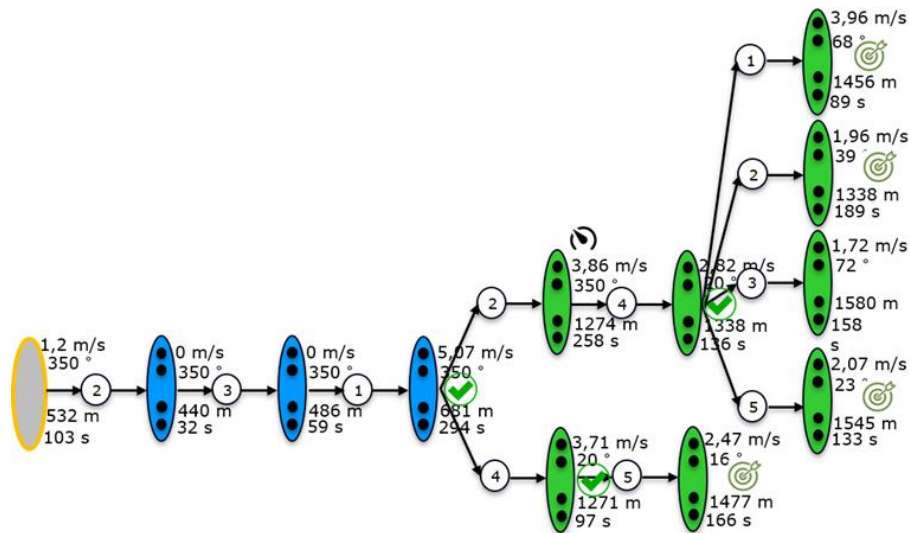


Abbildung 191 Planung situierter Handlungsräume angewandt auf das Fahrmanöver Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein

In der Praxis können Änderungen in der Umgebung während der Ausführung einer geplanten Handlungssequenz bzw. eines geplanten Handlungsraums auftreten. In diesem Fall ist die Berechnung eines neuen Handlungsraums erforderlich. Die kontinuierliche Aktualisierung von Handlungsräumen aufgrund detektierter Warnung während der Verhaltensplanung ist der Schwerpunkt des Arbeitspakets AP9650.

17.7.3 Situationsauswahl sowie Strategieentwicklung

Der Schwerpunkt dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung einer gestuften Warn- und Hinweisstrategie unter Berücksichtigung der Funktionalität des Workflowmanagements (siehe AP5700). Hinweise können bei der vorzeitigen Erkennung einer Warnung oder/und eines Konflikts ausgegeben werden. Hinweistexte für ausgewählte Konflikt- und Notsituationen werden vorgestellt.

Fehlermeldungen & Zuverlässigkeitsindikatoren für Kreuzungsmanöver

In diesem Abschnitt werden die Hinweistexte für Konflikt- und Notsituationen bei Kreuzungsmanövern (z. B. bei Hafenein- und -ausfahrten) formuliert. In Tabelle 25 werden Hinweistexte bezüglich des erlaubten Fahrbereichs vorgestellt. Warnhinweise, die beim Überschreiten der nach dem Römischen Modell (siehe AP5700) berechneten Geschwindigkeit auftreten, sind in Tabelle 26 aufgelistet. Tabelle 27 zeigt die Formulierung von Warnhinweisen und Konflikten bezüglich der TCPA (Time to closest point of approach), wobei Warnungen in gelben und Konflikte in roten Feldern stehen. Hinweise auf Warnungen und Konflikte hinsichtlich des Abstandes zu anderen Schiffen sind in Tabelle 28 zusammengefasst.

Tabelle 25: Fehlermeldung bzgl. des erlaubten Fahrbereichs

Fehlermeldungen	Beschreibung
Fahrbereichswarnung: Beschleunigung zurücknehmen!	Beschleunigen führt in x Sekunden zum Verlassen des Fahrbereiches!
Fahrbereichswarnung: Stärker beschleunigen!	Ohne eine höhere Beschleunigung wird in x Sekunden der Fahrbereich verlassen
Fahrbereichswarnung: Handlung notwendig!	(Weiter-)Warten führt in x Sekunden zum Verlassen des Fahrbereiches!
Fahrbereichswarnung: Links halten!	Streckenfahrt nach rechts führt in x Sekunden zum Verlassen des Fahrbereiches!
Fahrbereichswarnung: Rechts halten!	Streckenfahrt nach links führt in x Sekunden zum Verlassen des Fahrbereiches!

Tabelle 26: Warnhinweise beim Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit

Fehlermeldung	Beschreibung
Geschwindigkeitswarnung: Maximale Geschwindigkeit. Erreicht!	Maximale Geschwindigkeit in x Sekunden durch Beschleunigung erreicht
Geschwindigkeitswarnung: Langsamer fahren!	z. B. bei Einfahrten in neue Flüsse oder Kanäle, sodass die Geschwindigkeit angepasst werden muss (z. B. durch Verzögern)

Tabelle 27: Warnungen & Konflikte bzgl. TCPA (Time to closest point of approach)

Fehlermeldung	Beschreibung
Kollisionsgefahr: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Beschleunigen!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Verzögern unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Kollision möglich, Handlung sofort notwendig!	Warnung, weil der „Warnwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Links fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Rechts fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach links unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Verzögerung notwendig!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Beschleunigung notwendig!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Verzögern unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Handlung sofort notwendig!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Links fahren!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Rechts fahren!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ bei Streckenfahrt nach links unterschritten wird

Tabelle 28: Warnungen & Konflikte bzgl. des euklidischen Abstands zu anderen Schiffen

Fehlermeldung	Beschreibung
Abstandswarnung: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Beschleunigen!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Verzögern unterschritten wird
Abstandswarnung: Kollision möglich, Handlung sofort notwendig!	Warnung, weil der „Warnwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Abstandswarnung: Links fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird
Abstandswarnung: Rechts fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach links unterschritten wird
Abstandswarnung: Verzögern!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Beschleunigen!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Verzögern unterschritten wird
Abstandswarnung: Kollision möglich, Handlung sofort notwendig!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ wegen Warten unterschritten wird
Abstandswarnung: Links fahren!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird
Abstandswarnung: Rechts fahren!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ bei Streckenfahrt nach links unterschritten wird

Fehlermeldungen & Zuverlässigkeitsindikatoren für Überhol- und Begegnungsmanöver

Analog werden die Hinweistexte für Konflikt- und Notsituationen bei Überhol- und Begegnungsmanövern formuliert. In Tabelle 29,

Tabelle 30 und

Tabelle 31 stehen Warnungen in gelben und Konflikte in roten Feldern. In Tabelle 29 werden Hinweistexte bezüglich des longitudinalen Abstands zum vorausfahrenden Schiff vorgestellt.

Tabelle 30 zeigt die Formulierung von Warnhinweisen und Konflikten bezüglich seitlichen Abstands. Hinweise auf Warnungen und Konflikte bzgl. der TTC (Time to collision) sind in

Tabelle 31 aufgelistet.

Tabelle 29: Warnungen & Konflikte bzgl. des longitudinalen Abstands Δx zum Vorfahrenden Schiff

Fehlermeldung	Beschreibung
Abstandswarnung: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Weiterfahren wegen Wartens unterschritten wird
Abstandswarnung: Rechts fahren!	Warnung, weil ein geeigneter Abstandsbereich zum Ausseren noch nicht erreicht wurde $\Rightarrow$ zu früh auszuscheren ist nicht erwünscht
Abstandswarnung: Verzögern!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Kollision möglich, Handlung sofort Verzögern!	Konflikt, weil der „Warnwert“ beim Weiterfahren wegen Wartens unterschritten wird
Abstandswarnung: Rechts fahren!	Konflikt, weil ein geeigneter Abstandsbereich zum Ausseren noch nicht erreicht wurde $\Rightarrow$ zu früh auszuscheren ist nicht erwünscht

Tabelle 30: Warnungen & Konflikte bzgl. des seitlichen Abstands Δy zum Vorfahrenden Schiff)

Fehlermeldung	Beschreibung
Abstandswarnung: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Abstandswarnung: Links fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird
Abstandswarnung: Verzögern!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Abstandswarnung: Verzögern!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Abstandswarnung: Links fahren!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ bei Streckenfahrt nach rechts unterschritten wird

Tabelle 31: Warnungen & Konflikte bzgl. TTC (Time to collision)

Fehlermeldung	Beschreibung
Kollisionsgefahr: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Verzögern!	Warnung, weil der „Warnwert“ beim Weiterfahren wegen Wartens unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Rechts fahren!	Warnung, weil der „Warnwert“ bei Streckenfahrt nach links unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Verzögerung notwendig!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ beim Beschleunigen unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Verzögern!	Konflikt, weil der „Konfliktwert“ wegen Wartens unterschritten wird
Kollisionsgefahr: Rechts fahren!	Konflikt, weil ein geeigneter Abstandsbereich zum Ausweichen noch nicht erreicht wurden → zu früh ausweichen nicht erwünscht

17.7.4 Entwicklung des Notfallmanagements basierend auf Handlungsalternativen

Der Fokus dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung eines Notfallmanagements. Gefahrensituationen aufgrund menschlichen Handelns/Nichthandelns sollen rechtzeitig erkannt und Fehlhandlungen vermieden werden. Das Workflowmanagement des Arbeitspakets AP5700 bildet den Kern des Notfallmanagements.

Die Funktionsweise des Notfallmanagements ist in Abbildung 192 dargestellt. Das Fahrverhalten des Schiffes und somit auch die Handlungen des Schiffsführers werden kontinuierlich überwacht und auf Fehlverhalten überprüft. Sollte eine Warnung erkannt werden, werden Handlungsräume generiert. Dadurch werden mögliche Handlungssequenzen nach den Vorgehensweisen in AP5400 und AP5700 berechnet. Der Kapitän wird über das Interface alarmiert und die optimale Sequenz wird in Textformat vorgeschlagen. Die Vorgehensweise ermöglicht die Entwicklung eines Überwachungssystems zur Unterstützung des Kapitäns bei seinen Entscheidungen.

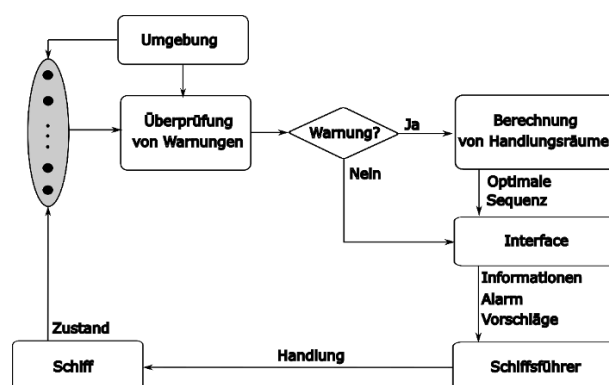


Abbildung 192 Allgemeine Übersicht über die Funktionsweise des Notfallmanagements

Die Bestimmung der optimalen Handlungssequenz basiert auf einem kognitiven Ansatz, der zur Analyse der Zuverlässigkeit von menschlichen Handlungen und Fehlern dient. Der Ansatz wurde in [5] entwickelt. Die Grundidee ist es, die Bewertung der menschlichen Handlung hinsichtlich der Zuverlässigkeit durch die Berechnung einer signifikanten Punktzahl von vordefinierten Zuverlässigkeitskriterien zu bestimmen. Unter einem Zuverlässigkeitskriterium wird eine Bedingung zur Beschreibung und Bewertung eines Zustands und/oder einer Handlung verstanden. Diese können in diesem Zusammenhang

Abstände, Zeitgrößen, maximal zulässige Größen etc. sein. Die Punktzahl HRPS (Human performance reliability score) lässt sich durch

$$HRPS = \lambda_1 \Sigma^r_{reduced} + \lambda_2 \Sigma^i_{improved}$$

berechnen, worin sich auf einen reduzierten Effekt des betrachteten Zuverlässigkeitskriterium bezieht, während den verbesserten Effekt des Kriteriums beschreibt.

Die Zuverlässigkeitskriterien, die für das Fahrmanöver „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ (siehe Abbildung 185) verwendet werden, sind speed over ground, time to closest point of approach, distance to closest point of approach und Abstände zu den anderen Schiffen (siehe Tabelle 1) [Bej2024].

Die Punktzahl eines Zuverlässigkeitskriteriums kann durch seine Zugehörigkeitsfunktion (Membership function) definiert werden. Bei den Zugehörigkeitsfunktionen von, distance to closest point of approach‘ (DCPA) und, time to closest point of approach‘ (TCPA) wird unterschieden, ob TCPA bzw. DCPA zwischen dem Ego-Schiff und einem stromabwärtsfahrenden oder stromaufwärtsfahrenden Schiff berechnet wird [Bej2024]. Die Eckwerte von Zugehörigkeitsfunktionen wurden anhand einer wissensbasierten Analyse berechnet, indem relevante Fahrscenarien des Szenarios‘ Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein‘ betrachtet wurden und eine Gaußverteilung angenommen wurde [Bej2024]. Der obere Eckwert der Zugehörigkeitsfunktionen von TCPA, DCPA und dem euklidischen Abstand entspricht der oberen Grenze des 68 %-Intervalls der Normalverteilung, der untere Wert Eckwert der unteren Grenze des 68 %-Intervalls. Für speed-over-ground ist der 50 %-Wert einer Normalverteilung der Referenzwert, hier entspricht der obere 68 %-Wert der maximal zulässigen Geschwindigkeit [Bej2024].

Das Notfallmanagement dient dazu, Fehlhandlungen und Warnungen zu erkennen und mögliche Handlungssequenzen zur Vermeidung von Gefahrensituationen zu berechnen und anschließend an den Schiffsführer als Vorschlag direkt weiterzugeben. In dem Modul, Überprüfung von Warnung‘ (siehe Abbildung 192) müssen entsprechend Warnwerte definiert sein. Diese Warnwerte hängen mit den Zuverlässigkeitskriterien zusammen und werden aus der wissensbasierten Analyse bestimmt. Folgende Ursachen können zu einer Warnung führen [Bej2024]:

- Überschreiten der maximal zulässigen Geschwindigkeit $v_{max} = 13,52$ m/s. Der Warnwert entspricht der oberen Grenze des 68 %-Intervalls der Normalverteilung
- Unterschreiten des Warnwertes bzgl. Time to closest point of approach $TCPA_w$, der der oberen Grenze des 68 %-Intervalls einer Normalverteilung entspricht. Für TCPA zwischen dem Ego-Schiff und stromabwärts fahrenden Schiffen beträgt $TCPA_w = 36$ s, für TCPA zwischen dem Ego-Schiff und stromaufwärts fahrenden Schiffen gilt $TCPA_w = 112,98$ s.
- Unterschreiten des Warnwertes bzgl. des euklidischen Abstands $r = 357,28$ m.

Während der Fahrt wird kontinuierlich überprüft, ob die Bedingungen abhängig von der Umgebung erfüllt sind. Sollte eine mögliche Auslösung detektiert werden, also eine Warnung notwendig werden, wird ein Handlungsraum gemäß der Methode aus AP5700 berechnet und somit mögliche und zuverlässige Handlungsalternativen generiert. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 13 dargestellt.

Basierend auf der ereignisdiskreten Bestimmung sowie Regelung von Situationen zur Erkennung von Konflikten und Warnungen aus AP5700 (siehe Abbildung 4) werden Handlungsräume bei Erkennung von Warnung durch das Notfallmanagement berechnet. Die Vorgehensweise wurde auf das Fahrscenario, Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein‘ angewandt. Im Unterschied zu der Anwendung in AP5700 werden neue Datensätze verwendet. Die Datensätze wurden während der Fahrversuche aufgenommen. Der Vorteil gegenüber des Anwendungsfalls in AP5700 ist, dass ein ganzer Datensatz solange läuft, bis

eine Warnung erkannt wird. In der Anwendung in AP5700 wurde hingegen von einer festen Initialsituation ausgegangen und dann die nächste mögliche Situation prädiziert. Außerdem wird nach dem Vorgehen in Abbildung 8 (siehe AP5700) nur die nächste mögliche Situation vorhergesagt, während mit den neuen Datensätzen die möglichen Handlungssequenzen berechnet und als Handlungsraum zusammengefasst werden.

Für die ereignisdiskrete Generierung von Situationen laut Abbildung 4 müssen Warn- und Konfliktwerte vordefiniert werden. Es wird unterschieden, ob TCPA und DCPA zwischen dem Ego-Schiff und stromabwärtsfahrenden Schiffen oder dem Ego-Schiff und stromaufwärtsfahrenden Schiffen berechnet werden. Die Werte können Tabelle 32 und Tabelle 33 entnommen werden [Bej2024].

Tabelle 32: Warn- und Konfliktwerte (Fall stromabwärtsfahrende Schiffe) [Bej2024]

Kriterium	Konfliktwert	Warnwert
Speed over ground	8,05 m/s	13,52 m/s
Abstand zu anderen Schiffen	189,69 m	357,38 m
TCPA	8,32 s	36 s
DCPA	48,54 m	245,06 m

Tabelle 33: Warn- und Konfliktwerte (Fall stromaufwärtsfahrende Schiffe) [Bej2024]

Kriterium	Konfliktwert	Warnwert
Speed over ground	8,05 m/s	13,52 m/s
Abstand zu anderen Schiffen	189,69 m	357,38 m
TCPA	21,65 s	112,98 s
DCPA	87,42 m	190,03 m

Laut der ereignisdiskreten Generierung und Berechnung von Situationen nach Abbildung 4 aus AP5700 müssen Ziele, die zum finalen Endziel führen, vordefiniert werden. Auch für das Beispiel mit dem neuen Datensatz gelten die gleichen Ziele (vgl. Abbildung 188) (siehe AP5700).

Die Initialsituation des Datensatzes ist in Abbildung 193 dargestellt. Das Ego-Schiff ist in blau abgebildet. Die beiden weiteren Schiffe, die an dem Fahrscenario beteiligt sind, sind das weiße Schiff im Rhein sowie das grüne Schiff im Vinckekanal (oberster Kanal).

Nach 194 s wird eine Warnung von dem Notfallmanagement an den Schiffsführer übermittelt. Der Grund dieser Warnung ist des Warnwerts $r_w = 357,38$ m, der sich auf den Abstand zwischen dem Ego-Schiff und dem weißen Schiff im Rhein bezieht. Die Situation, in der die Warnung auftritt, ist in der Abbildung 194 dargestellt.

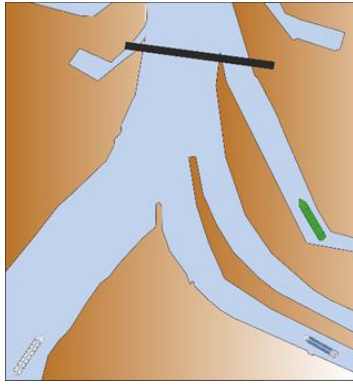


Abbildung 193 Initialsituation des Datensatzes (Ego-Schiff in blau, weißes Schiff im Rhein, grünes Schiff im Vinckekanal) [Bej2024]

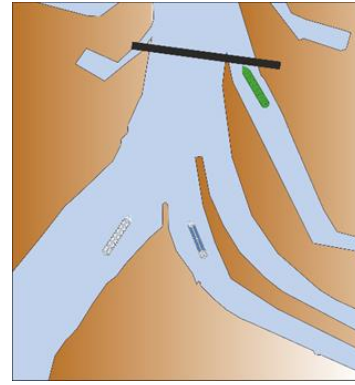


Abbildung 194 Beschreibung der auftretenden Warnung aufgrund des geringen Abstandes von dem Ego-Schiff (blau) zu dem Schiff im Rhein (weiß) [Bej2024]

Die Warnung in Abbildung 194 führt zur Berechnung eines Handlungsraumes, der in Abbildung 195 dargestellt ist. Der Situationsvektor S_{start} bezieht sich auf den ersten Zeitpunkt des Datensatzes. Die Situation, die die Warnung beschreibt, ist als gelbe Ellipse dargestellt und lautet S_0 . Der Handlungssequenzen beschreiben die möglichen Fahrverhalten, die zu der finalen erwünschten Situation konfliktfrei führen. Das Endziel ist das gleiche wie in dem Beispiel in AP5700 (siehe Abbildung 188) und bezieht sich auf das Erreichen des Bereiches in der Nähe der Brücke. Der Handlungsraum in Abbildung 195 liefert die vier möglichen Sequenzen [Bej2024]:

- Handlungssequenz I: In dieser Sequenz wird solange verzögert (O_2), bis das Schiff zum Stillstand kommt. Das Schiff muss solange warten (O_3), bis der Fahrbereich wieder frei wird, indem TCPA und der Abstand zu dem weißen Schiff r oberhalb der entsprechenden Warnwerte sein müssen (siehe Tabelle 32 und Tabelle 33). Sobald der Fahrbereich frei wird, kann das Schiff beschleunigt (O_4) werden und das Zwischenziel 1 wird erreicht (siehe Abbildung 188 in AP5700). Das Schiff wird nach rechts gelenkt (O_4) und dann wird das Ruder in die entgegengesetzte Richtung betätigt (O_5), um dem Flussverlauf zu folgen. Das Endziel wird in der Situation S_5 erreicht.
- Handlungssequenz II: Der Unterschied zum Handlungssequenz I ist die letzte Handlung. Vor der finalen Situation S_5 wird der Operator O_7 eingesetzt, indem das Ruder und der Gashebel zum Beschleunigen betätigt werden (siehe Tabelle 2Tabelle 1).
- Handlungssequenz III: Nach den Handlungen O_2 , O_3 und O_1 werden das Ruder für eine Streckenfahrt nach rechts und der Gashebel zum Beschleunigen bestätigt (O_6). Dadurch wird das Zwischenziel 2 erreicht (siehe Abbildung 188 in AP5700). Die nächste Handlung ist die Betätigung des Ruders gegen den Uhrzeigersinn (O_5), um dem Flussverlauf zu folgen.
- Handlungssequenz IV: Der Unterschied zum Handlungssequenz II ist die letzte Handlung. Vor der finalen Situation S_5 wird der Operator O_7 eingesetzt, indem das Ruder und der Gashebel zum Beschleunigen betätigt werden (siehe Tabelle 23).

Neben der Warnung wird auch die optimale Sequenz an den Schiffsführer übermittelt. Die Ermittlung der optimalen Sequenz erfolgt auf Basis der Analyse der Zuverlässigkeit von menschlichen Handlungen und Fehlern in [HS20] und den berechneten HRPS-Werten. Der HRPS-Wert einer Handlungssequenz wird durch

$$HRPS_k = \sum_{j=1}^n HRPS_{O_j}$$

berechnet [6]. Die Punktzahl ist der HRPS-Wert eines Operators in der Sequenz, und ist die Anzahl der vorhandenen Operatoren in der jeweiligen Sequenz. Die Tabelle 13 zeigt die Zuverlässigkeitsanalyse der Handlungssequenzen in Abbildung 195. Die Sequenz mit dem höchsten HRPS-Wert gilt als die zuverlässigste Sequenz. Sollten mehrere Sequenzen den gleichen HRPS-Wert haben, gilt die Sequenz mit der geringsten Operation als die optimale [Bej2024]. Laut den Ergebnissen in Tabelle 13 ist die Handlungssequenz die optimale Sequenz. Diese Sequenz ist der Abbildung 195 mit blauen Situationsvektoren (Ellipsen) gekennzeichnet

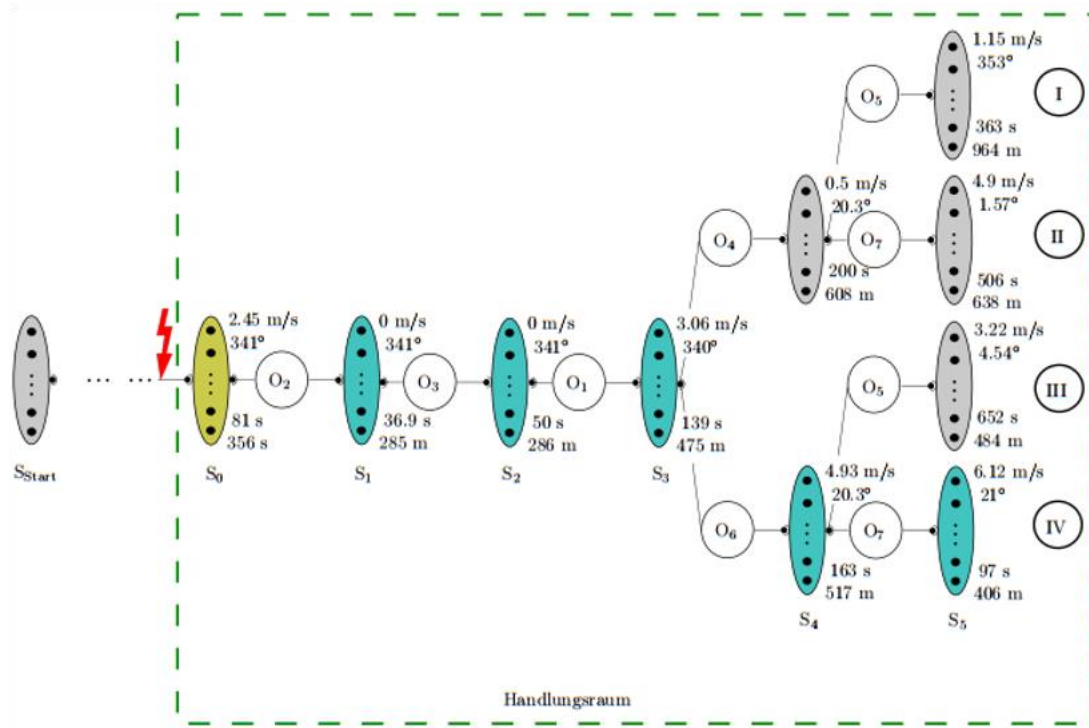


Abbildung 195 Resultierender Handlungsraum aufgrund der Warnung (vgl. Abbildung 15 [Bej2024])

Tabelle 34 Zuverlässigkeitsanalyse der Handlungssequenzen in Abbildung 16 [Bej2024]

Handlungssequenz	HRPS-Wert	Operationszeit
Sequenz I	3,8129	426 s
Sequenz II	3,6931	322 s
Sequenz III	3,8120	287 s
Sequenz IV	3,8129	270 s

In der Praxis können Änderungen in der Umgebung während der Ausführung einer geplanten Handlungssequenz aus dem Handlungsraum auftreten. In diesem Fall ist die Berechnung eines neuen Handlungsraums erforderlich. Die kontinuierliche Aktualisierung von Handlungsräumen aufgrund neu detektierter Warnungen während der Verhaltensplanung bildet einen der Schwerpunkte des Arbeitspakets. Ein Beispiel wird in dem Fahrzenario „Ausfahrt aus der Ruhr in den Rhein“ betrachtet. Während der Ausführung der optimalen Sequenz aus Handlungsraum in Abbildung 195 wird eine neue Warnung nach 48 s ab der Situation S_2 aufgrund des Unterschreitens des Warnwertes $TCPA_w$ mit dem grünen Schiff erkannt (siehe Abbildung 197). Am Anfang der Zeitreihe des Datensatzes fuhr das grüne Schiff im Vinckekanal und wechselte seinen Kurs bei der Einfahrt in den Rhein (siehe Abbildung 193 und Abbildung 194).

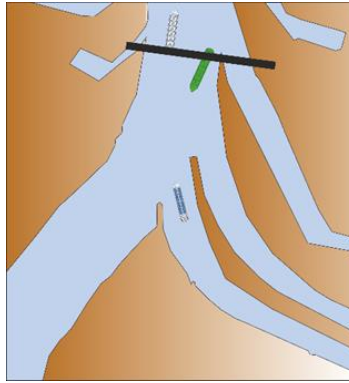


Abbildung 196 Beschreibung der auftretenden Warnung wegen des Unterschreitens des Warn-werts $TCPA_w$ (siehe Tabelle zwischen dem Ego-Schiff (blau) und dem grünen Schiff im Rhein [6])

Die Situation, die die neue Warnung beschreibt, ist in Abbildung 196 dargestellt und als der Situationsvektor S_3^* in Abbildung 197 gekennzeichnet. Die möglichen Sequenzen in dem neu berechneten Handlungsraum sind wie folgend beschrieben [6]:

- Handlungssequenz I: Das Schiff wird verzögert und kommt zum Stillstand (O_2). Sobald keine Warnungen mehr erkannt werden, wird das Schiff beschleunigt (O_1) und das Zwischenziel 1 wird erreicht (O_3). Durch Betätigung des Ruderhebels in den Uhrzeigersinn und Drücken des Gashebels (O_6) fährt das Schiff in Rhein stromabwärts und der Ruderhebel wird dann in die entgegengesetzte Richtung zurückgezogen (O_5), um dem Flussverlauf zu folgen.
- Handlungssequenz II: Der Unterschied zum Handlungssequenz I ist die letzte Handlung. Vor der finalen Situation S_5 wird der Operator O_7 eingesetzt, indem das Ruder und der Gashebel zum Beschleunigen betätigt werden (siehe Tabelle 23).
- Handlungssequenz III: Das Schiff wird verzögert und kommt zum Stillstand (O_2). Sobald keine Warnungen mehr erkannt werden, wird das Schiff beschleunigt (O_1) und das Zwischenziel 1 wird erreicht, wobei eine Streckenfahrt nach rechts vorbereitet wird (O_6). Das Schiff wird wieder beschleunigt und der Effekt des in der vorherigen Operation betätigten Ruderhebels wird dadurch stärker, sodass das Zwischenziel 2 ($COG = 20^\circ$ und das Schiff fährt in gerader Richtung im Rhein) erreicht wird. Der Ruderhebel wird in die entgegengesetzte Richtung zurückgezogen (O_5), um dem Flussverlauf zu folgen und die finale Situation erreicht wird.
- Handlungssequenz IV: Der Unterschied zum Handlungssequenz III ist die letzte Handlung. Vor der finalen Situation S_5 wird der Operator O_7 eingesetzt, indem das Ruder und der Gashebel zum Beschleunigen betätigt werden (siehe Tabelle 23).
- Handlungssequenz V: Das Schiff verzögert (O_2) und sobald der Fahrbereich wieder frei wird, wird eine Streckenfahrt nach durch Betätigung des Ruders und Drücken des Gashebels vorbereitet (O_6). Das Schiff fährt weiter zum Zwischenziel 1, und wird dann beschleunigt (O_1) und der Effekt des in der vorherigen Operation betätigten Ruderhebels wird dadurch stärker, sodass das Zwischenziel 2 ($COG = 20^\circ$ und das Schiff fährt in gerader Richtung im Rhein) erreicht wird. Der Ruderhebel wird in die entgegengesetzte Richtung zurückgezogen (O_5), um dem Flussverlauf zu folgen und die finale Situation erreicht wird.
- Handlungssequenz VI: Der Unterschied zum Handlungssequenz V ist die letzte Handlung. Vor der finalen Situation S_5 wird der Operator O_7 eingesetzt, indem das Ruder und der Gashebel zum Beschleunigen betätigt werden (siehe Tabelle 23).

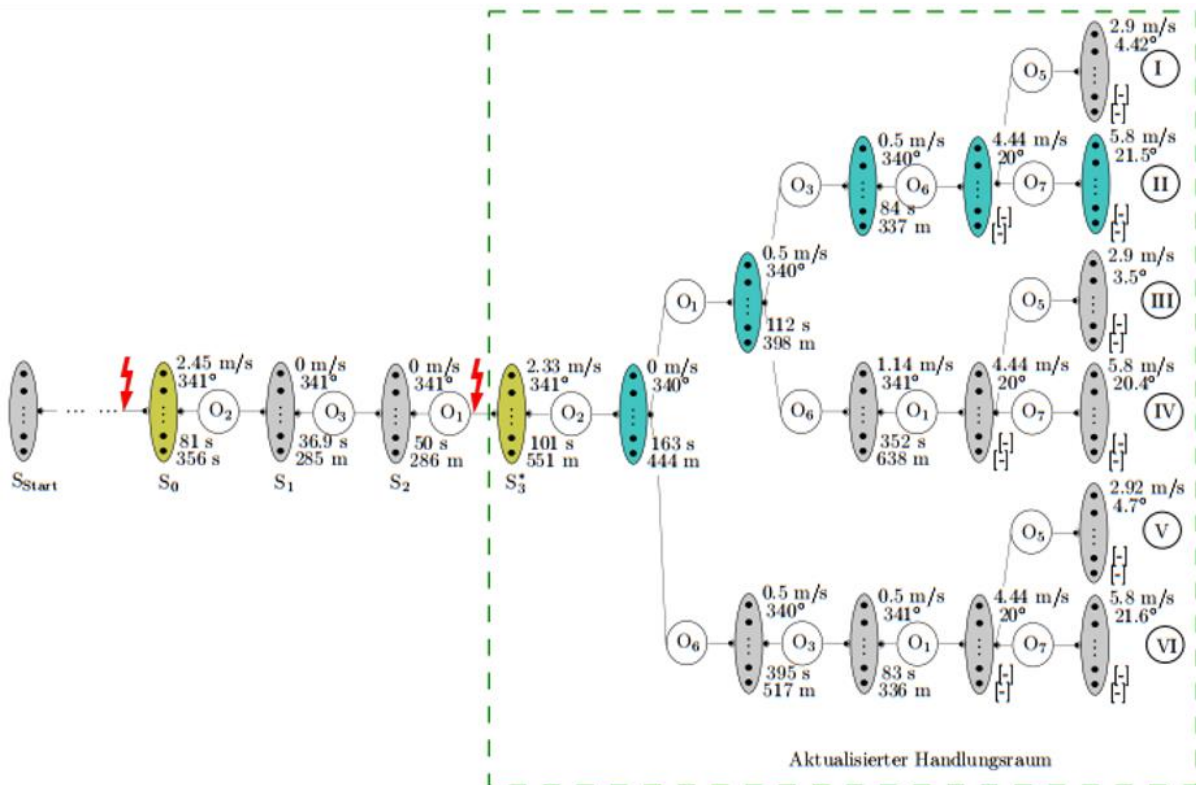


Abbildung 197 Berechnung des neuen Handlungsraumes aufgrund der Warnung in Abbildung und Aktualisierung des Handlungsraumes in Abbildung 197 [Bej2024]

Die Sequenz mit dem höchsten HRPS-Wert gilt als die zuverlässigste Sequenz. Sollten mehrere Sequenzen den gleichen HRPS-Wert haben, gilt die Sequenz mit der geringsten Operation als die optimale. Laut den Ergebnissen in Tabelle 35 ist die Handlungssequenz II die optimale Sequenz. Diese Sequenz ist in Abbildung 197 mit blauen Situationsvektoren (Ellipsen) gekennzeichnet. Laut Tabelle 35 ist die Handlungssequenz II die optimale Sequenz. Die finale Situation mit dem erreichten Endziel ist in Abbildung 198 dargestellt [Bej2024].

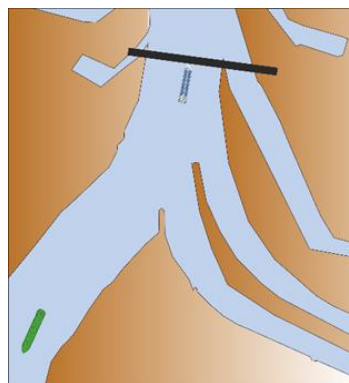


Abbildung 198 Erreichen der Endsituation durch die Zusammensetzung aus den optimalen Handlungssequenzen in den Handlungsräumen in und Abbildung 16 und Abbildung 18 unter Berücksichtigung der Aktualisierung ersten optimalen Handlungssequenz [Bej2024]

Tabelle 35: Zuverlässigkeitsanalyse der Handlungssequenzen in Abbildung 18 [Bej2024]

Handlungssequenz	HRPS-Wert	Operationszeit
Sequenz I	3,3324	231 s
Sequenz II	3,3324	211 s

Sequenz III	3,1731	210 s
Sequenz IV	3,1731	190 s
Sequenz V	3,3256	230 s
Sequenz VI	3,3256	210 s

18 Erprobung, Validierung der Anforderungen und Abschlussdemonstration

18.1 Erprobung und Evaluierung in der Simulation

Im Rahmen der Validierung des erstellten Manövriermodells wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Zunächst wurden Simulationen im Rahmen der Parameteridentifikation für das Manövriermodell durchgeführt. Mit den Simulationen der Referenzmanöver wurde die Genauigkeit des Modells bestätigt (s. Abschnitt 15).

Unter Verwendung des Manövriermodells wurden anschließend Simulationen im Simulator am DST und an der UDE durchgeführt. Hier stand aus dem vorangegangenen Projekt AutoBin das Testfeld Rhein-Ruhr (der Abschnitt des Dortmund-Ems-Kanals vom Hafen Dortmund bis Schleuse Waltrop) digital zur Verfügung. Mit diesen Simulationen wurde die Qualität des Manövriermodells jenseits der Referenzmanöver bewertet.

Weiterhin wurde die Simulationsumgebung auch für die Entwicklung des Steuerstands verwendet. Der Simulator wurde so umgebaut, dass die Simulation mit der SPS der Fernsteuerung funktioniert. Somit konnte der Fernsteuerstand in der Simulation getestet werden. Anschließend wurde die Fernsteuerung mit Datenübertragung zum Schiff getestet. Hierbei fand noch keine tatsächliche Steuerung statt, es wurden zunächst lediglich simulativ die Stellwerte der Steuerung an Bord geprüft.

18.2 Evaluierung Mensch-Steuerstand-Leitstand

Um den Steuerstand zu evaluieren, wurden zwei unterschiedliche Probandenstudien durchgeführt. Die Probanden durften während der Studie am Steuerstand sitzen und dessen Funktionalitäten ausprobieren. Abschließend wurden Fragen in Form einer Online-Befragung und eines Interviews gestellt. In der ersten Probandenstudie steuerten erfahrene Schiffsführer das für die Fernsteuerung ausgerüstete Versuchsschiff „Ernst Kramer“ vom Steuerstand aus. Dadurch konnten die Schiffsführer die Funktionalitäten des Steuerstands direkt testen und bewerten. In der zweiten Probandenstudie wurde angehenden Schiffsführern und Matrosen eine aufgezeichnete Fahrt am Steuerstand gezeigt. Damit erhielten die Auszubildenden als zukünftige Arbeitnehmer einen Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zur Automatisierung in der Binnenschifffahrt.

18.2.1 Realfahrt-Probandenstudie

In der Realfahrt-Probandenstudie haben 8 erfahrene Binnenschiffsführer den Steuerstand im realitätsnahen Betrieb erprobt. Die Studie dauerte ca. 3 Stunden pro Teilnehmer und bestand aus einer Einarbeitungsphase (ca. 0,5 Stunden), einer ferngesteuerten Fahrt (ca. 1,75 Stunden) sowie einem Befragungsteil (ca. 0,75 Stunden). Zunächst wurde dem Fernschiffsführer das Fernsteuerungssystem mithilfe von Schulungsmaterialien (Folien und einem Erklärvideo zur Kamerasteuerung) erklärt und er wurde in den Ablauf der Studie eingewiesen. Die Schulungsmaterialien enthalten unter anderem Informationen zu den rechtlichen Voraussetzungen der Fernsteuerung, den installierten Kameras an Bord, dem Fernsteuerstand und dessen Anzeigekomponenten sowie Hinweise zur Bedienung des Fernsteuerungssystems.

Nachdem sich der Fernschiffsführer mit dem System vertraut gemacht hat und das Schiff einsatzbereit ist, geht er zum Steuerstand. Eine Telefonverbindung wurde zwischen dem Steuerstand und dem Schiff hergestellt und während der gesamten Fahrt aufrechterhalten, um die akustische Kommunikation zwischen dem Fernschiffsführer und dem Schiffsführer an Bord zu ermöglichen. Dies ermöglicht es dem Fernschiffsführer, die Situation an Bord zu erfragen, die Schiffskontrolle und -übernahme mit dem Schiffsführer an Bord abzustimmen und Befehle an die Matrosen zu erteilen. Während der gesamten Fahrt war für die Technik verantwortliches Personal anwesend, das der Fernschiffsführer jederzeit ansprechen kann, falls Probleme oder Unklarheiten auftreten. Somit konnte eine sichere ferngesteuerte Fahrt gewährleistet werden.

In Abbildung 199 ist die Strecke der ferngesteuerten Fahrt rot markiert. Das Schiff wurde im gelb markierten Bereich aufgrund fehlender Genehmigung normal gesteuert. Die Fahrten fanden am 20. und 21.02.2024 von 9 bis 16 Uhr statt. Das Schiff befand sich zu Beginn in der Einmündung des Vinckekanaals. Die Übernahme des aktiven Fahrstands durch den Fernschiffsführer war die erste Aufgabe. Nachdem der Fernschiffsführer die volle Kontrolle über das Schiff erlangt hat, wird es abgelegt. Anschließend folgt eine übliche Streckenfahrt mit möglichen Begegnungen und Überholmanövern von anderen Verkehrsteilnehmern bis zum Wendebassin. Dort wird gewendet und das Schiff fährt zurück bis zur Einmündung. Beim Einfahren in den Rhein wird die Kontrolle an Bord übergeben und das Schiff wird im gelb markierten Bereich gewendet. Sobald sich das Schiff wieder auf dem Kanal befindet, wird der Fahrstand wieder auf Fernsteuerung übergeben. Anschließend erfolgt das Anlegemanöver und die ferngesteuerte Fahrt wird durch Übergabe des Fahrstands an Bord beendet.



Abbildung 199 Fahrbereich auf dem Duisburger Vinckekanal bei der Realfahrt-Probandenstudie

Nach Beendigung der Fernsteuerung wurde der Befragungsteil in Form eines Interviews durchgeführt. Im Rahmen des Interviews wurden eine Vielzahl von Themen erfragt, darunter die Erfahrungen der Schiffsführer beim Fernsteuern des Schiffes, Anmerkungen zur Benutzeroberfläche des

Fernsteuerstands und zur Ausstattung der Kamerabildschirme sowie die persönliche Einstellung zu Fernsteuerungssystemen.

18.2.2 Erfahrungen mit der Fernsteuerung

Zu Beginn berichtet die Hälfte der Schiffsführer über Unsicherheiten im Umgang mit dem Fernsteuerstand. Gründe hierfür sind unter anderem mangelnde Erfahrung mit einem solchen System, Nervosität sowie die Ungewohntheit, sich nur auf die Elektronik als einzige Rückmeldung des Systems zu konzentrieren. Ein junger Schiffsführer (Erfahrung von weniger als 5 Jahre) meinte jedoch, dass der Steuerstand sehr nah an den Fahrständen an Bord ausgestattet ist, und daher jeder Schiffsführer nach einer kurzen Erklärung zur Benutzeroberfläche direkt auf das System umsteigen könnte.

Dass die Netzverbindung nicht flächendeckend stabil ist, ist für die Mehrheit der Schiffsführer klar. „Funklöcher sind Gang und Gebe“ hat ein Schiffsführer erwähnt. Eine Ausfallsicherung bei Verbindungsausfällen wäre eine Forderung von vielen, um sich auf das System verlassen zu können. Die rechtliche Situation der Fernsteuerung ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Es muss geklärt werden, wer für das Schiff verantwortlich ist, falls die Verbindung nicht hergestellt werden kann und/oder die Latenz sehr hoch ist, sodass das Schiff zu spät auf die Befehle des Schiffsführers reagiert. Dass Verbindungsausfälle ohne Vorwarnung vorkommen können, ist ebenfalls auch ein erheblicher Nachteil des Fernsteuerungssystems. Außerdem hat der Schiffsführer keinen Überblick darüber, welche Befehle zuletzt erfolgreich an Bord gesendet wurden und wie er dementsprechend auf die Wiederherstellung der Verbindung reagieren soll.

Ebenfalls wichtig für die Schiffsführer ist das Gefühl für das Schiff. Spezifische Probleme liegen in der fehlenden akustischen Rückmeldung bei Bedienung der Maschine und Hebel sowie in der Schwierigkeit, Geschwindigkeit und Positionierung einzuschätzen ohne direktes Sehen. Auch die Wahrnehmung von Wind und Strömung ist stark eingeschränkt bzw. erschwert. An Bord braucht der Schiffsführer nur zur Seite zu blicken und die akustische Situation wahrzunehmen, während er am Fernsteuerstand nach den entsprechenden Elementen auf den Bildschirmen suchen muss.

Die Entwicklung der Fernsteuerung für die Binnenschifffahrt sei auf einem guten Weg, so ein Schiffsführer. Alle Grundfunktionalitäten wurden implementiert und das ferngesteuerte Fahren auf dem Duisburger Kanal war auch erfolgreich. Allerdings wird der aktuelle Stand eher als Computerspiel, statt als sinnvoller Arbeitsplatzersatz wahrgenommen. Die Weiterentwicklung des Leitstandes wurde von einem Schiffsführer als sinnvoll erachtet, um der Besatzung an Bord zu helfen. Der Plan, dass ein fernsteuernder Schiffsführer mehrere Schiffe gleichzeitig fährt, wird eher negativ gesehen. Mehrere Schiffsführer wiesen darauf hin, dass aufgrund der möglichen unterschiedlichen Schiffstypen und des schnellen Wechsels bei gleichzeitigen kritischen Situationen auf mehreren Schiffen ein Gefahrenpotenzial entstehen kann. Besonders gefährlich sei das Fahren mehrerer Schiffe mit unterschiedlichen Beladungszuständen, da die Schiffsdynamik stark vom Gewicht des Schiffes abhängt. Es besteht die Gefahr, dass der Schiffsführer ein leeres Schiff wie ein voll beladenes Schiff steuert. Um das Anlegemanöver zu erleichtern, wird teilweise der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen wie z.B. einer Parkdistanzkontrolle in Verbindung mit einem geregelten Bugstrahlruder gewünscht.

Auch zur Ausrichtung der Kameras gab es unterschiedliche Meinungen. Es wurden zusätzliche Kameras gewünscht, deren Bilder die Entfernung zum Ufer anzeigen, um das Anlegemanöver zu erleichtern. Auch die Heckkamera war für einige wegen der Ausrichtung schwer zu deuten und somit war die Einordnung des hinteren Schiffes nicht möglich. Einige sagen, es sei eine Frage der Gewohnheit, andere sagen, die Heckkamera sei zu hoch und zu weit vom tatsächlichen Heck entfernt angebracht. Als alternative Lösung wurde auch eine schwenkbare Kamera genannt.

18.2.3 Anmerkungen zum Fernsteuerstand

Die Schiffsführer stehen dem Fernsteuerstand für die Fernsteuerung in der Binnenschifffahrt grundsätzlich positiv gegenüber. Die Mehrheit betont die Notwendigkeit einer individuellen Anpassbarkeit der Bedienoberfläche und die Möglichkeit, den Arbeitsplatz nach persönlichen Bedürfnissen einzurichten. Es wird vorgeschlagen, weniger wichtige Anzeigen an den Rand zu verschieben und sich auf wesentliche Informationen wie Drehzahl und Geschwindigkeit zu konzentrieren. Die Möglichkeit, eigene Profile zu speichern und die Anordnung der Instrumente individuell anzupassen, wird als sehr vorteilhaft angesehen. Zudem berichten ein paar Schiffsführer von Schwierigkeiten, bestimmte Informationen schnell zu finden, da alle Anzeigen in einer Reihe und sehr ähnlich aufgebaut sind. Eine farbliche Unterscheidung oder alternative Anordnungen werden als mögliche Lösungen diskutiert. Ein Schiffsführer sprach z.B. von einem großen gebogenen Bildschirm, wie bei einer Kameraüberwachungszentrale, auf dem die Anzeigen in Kacheln angeordnet und untereinander austauschbar sind. Andere tendieren dazu, auf große Bildschirme zu verzichten und stattdessen mehrere kleine Bildschirme zu verwenden.

18.2.4 Gesellschaftliche Aspekte zur Fernsteuerung in der Binnenschifffahrt

Die Einführung von Fernsteuerungssystemen in der Binnenschifffahrt könnte signifikante Auswirkungen auf die Arbeitsbedingungen und Lebenssituation der Schiffsführer haben. Die Möglichkeit, die Arbeit besser mit dem Privatleben zu vereinbaren, wird von vielen als wesentlicher Vorteil angesehen. Die tägliche Rückkehr nach Hause eröffnet die Perspektive einer verbesserten Work-Life-Balance und mehr Zeit für die Familie. Dies könnte insbesondere für jüngere Schiffsführer attraktiv sein, die nicht mehr monatelang von zu Hause weg sein möchten. Durch die Umgestaltung des Berufs als Schiffsführer in der Binnenschifffahrt als normale Schichtarbeit mit täglicher Heimkehr könnte dazu beitragen, den Fachkräftemangel in diesem Bereich zu reduzieren. Ein solches Modell würde das Berufsfeld für potenzielle Bewerber attraktiver gestalten.

Einige Schiffsführer betonen jedoch auch die Vorteile ihres jetzigen Lebensstils. Sie genießen die Abwechslung und die sozialen Kontakte an Bord, die durch die Fernsteuerung verloren gehen könnten. Die Mehrheit der Befragten scheint die Arbeit von zu Hause aus als unattraktiv zu empfinden. Sie bevorzugen das dynamische Umfeld an Bord trotz der damit verbundenen Herausforderungen. Viele sehen die Schifffahrt als Teil ihrer Identität und Lebensweise an, die nicht durch eine Bürotätigkeit ersetzt werden kann. Zudem wird von einigen Seiten befürchtet, dass die Arbeit in einem isolierten Kontrollraum langfristig eintönig werden könnte und der direkte Kontakt mit Menschen verloren geht. Einige Schiffsführer erachten potenzielle Nachteile für ihre berufliche Entwicklung und Ausbildung als gegeben. Sie betonen die Bedeutung praktischer Erfahrungen an Bord und befürchten, dass zukünftige Generationen wichtige Fähigkeiten vermissen könnten. Zudem werden Bedenken hinsichtlich der Sicherheit geäußert, insbesondere im Hinblick auf mögliche Hackerangriffe oder Cyberattacken.

Die Hälfte zeigt sich skeptisch gegenüber einer vollständigen Umstellung auf Fernsteuerung. Dies stellt lediglich eine Möglichkeit für Reedereien dar, Kosten zu reduzieren und den Personalmangel zu kompensieren. Einige befürchten, ihre Bereitschaftszulagen zu verlieren, sollten sie nicht mehr rund um die Uhr an Bord sein.

18.2.5 Videoaufzeichnung-Probandenstudie

In der Videoaufzeichnung-Probandenstudie haben 11 angehende Schiffsführer und Matrosen im 2. oder 3. Ausbildungsjahr einen Einblick in den Steuerstand erhalten und ihre Meinungen dazu geäußert. Die Studie dauerte 1 Stunde pro Teilnehmer und bestand aus einer Einarbeitungsphase (ca. 10 Minuten), einer Wiedergabe einer normalen Fahrt (ca. 20 Minuten) sowie einem Befragungsteil (ca. 30 Minuten). Zunächst wurde dem Probanden das Fernsteuerungssystem mithilfe von Schulungsmaterialien (analog zur Realfahrt-Probandenstudie) erklärt und er in den Ablauf der Studie eingewiesen.

Die Kameras, das Radarbild, das ECDIS sowie die Navigationselemente des Versuchsschiffes wurden während einer normalen Fahrt auf dem Rhein aufgenommen und als Wiedergabematerial für die Probandenstudie verwendet. Die Aufnahme wurde auf 3 Minuten geschnitten, in denen eine Begegnung und ein Überholmanöver eines anderen Schiffes stattfanden. Außerdem wird untersucht, inwieweit die Bildauflösung und die Bildrate die sichere Wahrnehmung des Schiffsführers beeinflussen. Ein möglicher Vorteil dieser Untersuchung ist, dass die Datenübertragungsrate gezielt reduziert werden kann, wenn aus Sicht des Schiffsführers kein Unterschied zwischen zwei Qualitätsstufen der Bildübertragung erkennbar ist. In diesem Fall können der Datenverbrauch reduziert und Bandbreitenengpässe vermieden werden, ohne die Fahrsicherheit des Schiffsführers zu beeinträchtigen. Aus diesem Grund wurden die Kameraaufnahmen in 6 gleich lange Abschnitte unterteilt. Die Bildrate jedes Abschnittes wurde dann nach einer vordefinierten zufälligen Reihenfolge variiert. Abschließend wurden die Aufnahmen in 4 weitere niedrigere Auflösungsstufen konvertiert. Insgesamt stehen 5 Kameraaufnahmen mit gleichem Inhalt und unterschiedlichen Auflösungen zur Verfügung, wie in Tabelle 36 dargestellt. Ursprünglich wurden die Aufnahmen mit 1080p und 24 Hz gemacht. Bei der Wiedergabe der Kameraaufnahmen mit unterschiedlichen Auflösungen stehen die Radarbild, ECDIS und Navigationselemente stets in voller Auflösung und Bildrate (4K, 2 Hz) zur Verfügung.

Tabelle 36: Überblick über die Qualitätsabstufungen der Kameraaufnahmen

Betrachtete Auflösungen	96p	240p	480p	720p	1080p	
Betrachtete Bildraten	0,2 Hz	0,5 Hz	1 Hz	3 Hz	12 Hz	24 Hz

Die Reihenfolge der Aufnahmen, die den Probanden gezeigt werden, wird für jeden Probanden randomisiert, um den Ankereffekt zu reduzieren. Nach Beendigung jeder Aufnahme erfolgt eine Abfrage, inwieweit der Proband das Gefühl hatte, die Situation unter Kontrolle zu haben. Der Proband hat die Möglichkeit, einen Wert zwischen 1 (Bedeutung: Kontrolle über die Situation ist unmöglich) und 5 (Bedeutung: Die Situation ist völlig unter Kontrolle) zu nennen. Danach wird die nächste Aufnahme abgespielt, bis alle 5 Aufnahmen durchgespielt wurden. Während des Abspielens der Aufnahme bewertet der Proband ständig, ob die aktuelle Situation seiner Meinung nach sicher zu befahren ist oder nicht. Nachdem alle 5 Aufnahmen gezeigt wurden, erfolgt der Befragungsteil in Form eines Interviews.

18.2.6 Einfluss der Bildauflösung und Bildrate auf das sichere Fahrgefühl

Abbildung 200 zeigt die durchschnittliche Bewertung des Kontrollgefühls für alle Studienteilnehmer. Hier zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Bildauflösung und dem subjektiven Kontrollgefühl. Die Aufnahme mit der höchsten Bildauflösung von 1080p weist eine durchschnittliche Bewertung von 3,73 auf, während die Aufnahme mit 96p eine Bewertung von 2,55 aufweist. Mögliche Einsparungen der Datenübertragungsrate durch Verringerung der Bildauflösung sind aufgrund des deutlichen Unterschieds (>5 % zwischen den Qualitätsstufen) ausgeschlossen.

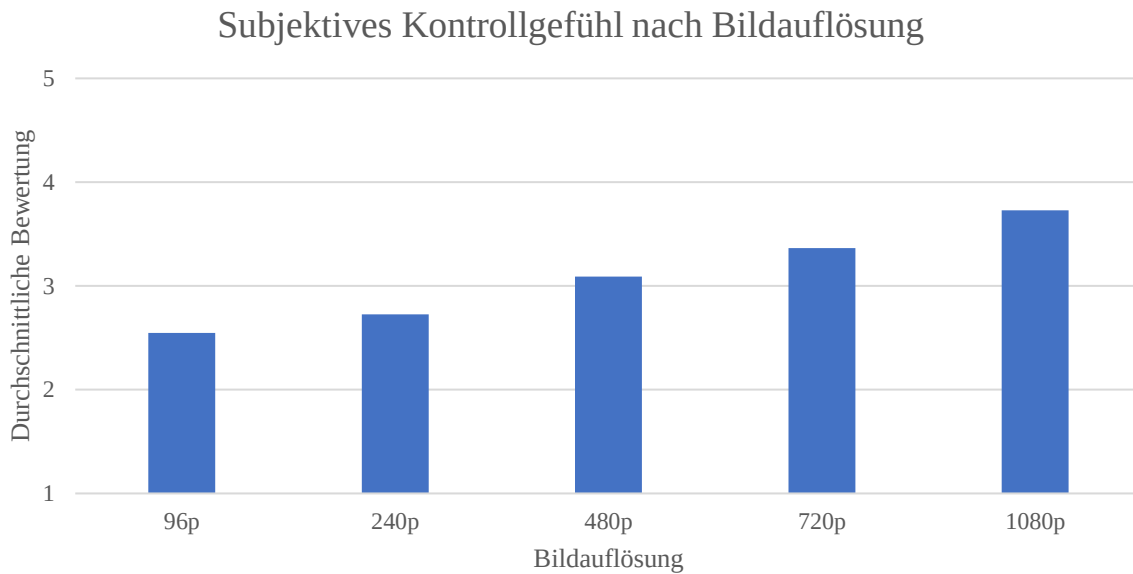


Abbildung 200 Subjektives Kontrollgefühl nach Bildauflösung

Die Ergebnisse der kontinuierlichen Bewertung des Probanden während der Wiedergabe der Aufnahmen sind in Abbildung 201 dargestellt. Es besteht ein proportionaler, nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Bildrate und dem Anteil der als sicher bewerteten Fahrt. Ein Anteil von 1 bedeutet, dass die Fahrt im entsprechenden Abschnitt für alle Auflösungsstufen sicher ist. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen 1 Hz und 3 Hz zu erkennen, während die Unterschiede zwischen 3, 12 und 24 Hz geringer sind. Dies deutet darauf hin, dass zur Einsparung von Datenübertragungsrate (z.B. bei Bandbreitenengpässen der Funkverbindung) die Bildrate auf bis zu 3 Hz reduziert werden kann, ohne die Aufgabe des Schiffsführers wesentlich zu erschweren oder die Fahrsicherheit zu beeinträchtigen. Im Falle einer ursprünglichen Bildrate von 24 Hz und einer übertragenen Bildrate von 3 Hz entspricht dies einer Ersparnis in der Datenübertragung von bis zu 87,5 %.

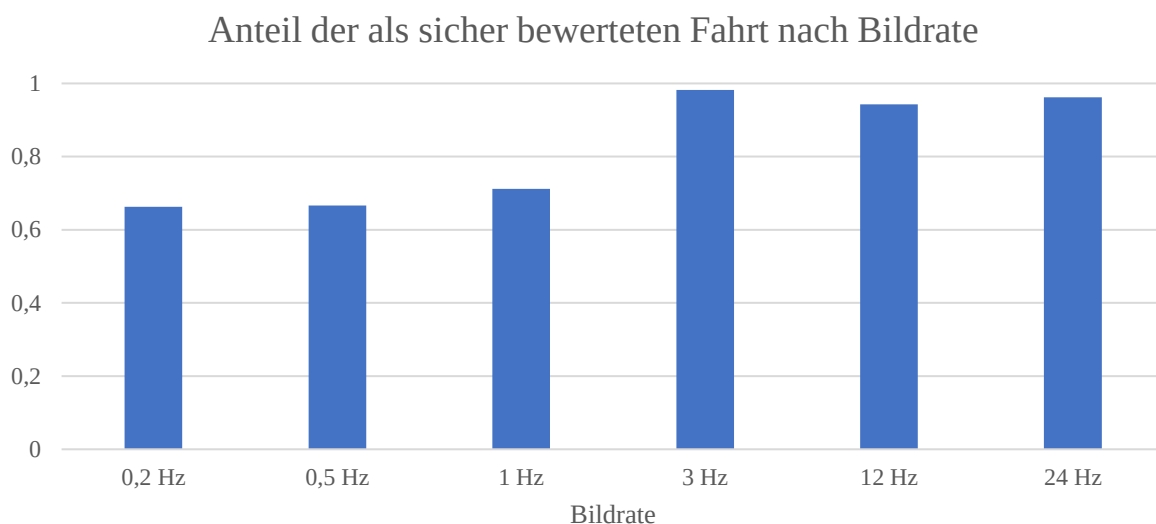


Abbildung 201 Anteil der als sicher bewerteten Fahrt nach Bildrate

Es wird allerdings nicht empfohlen, die gesamte Fahrt mit 3 Hz durchzuführen. Auch in diesem Bereich sollen zukünftig weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung psychologischer Aspekte stattfinden.

Das Anschauen von digitalen Bildschirmen mit einer zu niedrigen Bildrate über einen längeren Zeitraum könnte möglicherweise zu Übelkeit führen und die mentale Belastung des Schiffsführers dementsprechend erhöhen. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Reduzierung der Bildrate gegenüber der Reduzierung der Bildauflösung zur Einsparung von Datenübertragungsrate unter Berücksichtigung des subjektiven Fahrgefühls des Schiffsführers besser geeignet ist.

18.2.7 Anmerkungen zum Fernsteuerstand und zur Fernsteuerung in der Binnenschifffahrt

Die allgemeine Ausstattung des Steuerstandes wird von den meisten Teilnehmern als gut empfunden, ohne besondere Kommentare bezüglich der Ergonomie des Steuerstandes als Arbeitsplatz. Die Benutzeroberfläche wurde im Allgemeinen gut bewertet. Einige fanden sie intuitiv und ausreichend, andere wünschten sich mehr Anpassungsmöglichkeiten. Vorschläge zur Anpassbarkeit der Anordnung wurden mehrmals erwähnt, wie die flexible Platzierung der Bildelemente wie ECDIS sowie die Erweiterung um zusätzliche Kontrollanzeigen. Für die Ausrüstung auf dem Schiff wurden auch schwenkbare Kameras vorgeschlagen.

Die psychologischen und sozialen Aspekte der Fernsteuerung von Binnenschiffen wurden von den Studienteilnehmern unterschiedlich wahrgenommen. Einige hielten das Konzept für interessant, hatten aber Bedenken hinsichtlich der Verantwortung und möglicher Fahrlässigkeit. Andere waren skeptisch hinsichtlich der langfristigen Akzeptanz, insbesondere wegen des Verlustes des praktischen Reizes und der körperlichen Arbeit. Einige Teilnehmer sahen mögliche Vorteile für lange Fahrten oder weniger erfahrene Schiffsführer, äußerten aber auch Bedenken hinsichtlich Arbeitsplatzverlust und fehlender praktischer Erfahrung.

Als zukünftigen Arbeitsplatz sahen die meisten Teilnehmer die Vorteile der Fernsteuerung. Das ständige Beobachten der Bildschirme wurde allerdings als anstrengend empfunden, was zu Überanstrengung der Augen und Ermüdung führen kann. Viele Teilnehmer berichteten auch über einen möglichen erhöhten Stress während der Fahrt, insbesondere aufgrund technischer Probleme wie Signalverlust oder schlechte Bildqualität. Der Stress wurde häufig höher eingeschätzt als bei der direkten Steuerung auf dem Schiff. Einige sahen jedoch auch die Möglichkeit, dass der Stress mit der Zeit abnehmen könnte, äußerten aber auch Sorgen wegen der zusätzlichen Verantwortung als Schiffsführer mehrerer Schiffe.

18.3 Drohnen-Befliegungen zur Validierung

Um im Rahmen der geplanten Testfahrten am Projektende genaue Befliegungsergebnisse erzielen zu können, wurden zahlreiche Testflüge mit der angeschafften Drohne absolviert. Ziel war die Ermittlung von möglichen Lagefehlern mit und ohne RTK-Positionskorrektur.

Standardmäßig erfolgt die Korrektur der Drohnenposition über GPS-Daten mithilfe von RTK-Daten, die über Mobilfunk empfangen werden. In Bereichen mit schlechtem Mobilfunkempfang ist diese Korrektur erschwert, so dass eine Fehlerabschätzung für die Validierung notwendig ist.

Um Validierungsergebnisse aus der Drohnenbefliegung, aber auch aus LIVE-Daten in die Simulation einfließen zu lassen, wurden Grundlagen für eine Rückkopplungsschleife entwickelt. Ziel ist die Einführung eines Ausgleichsfaktors, mit dem zukünftige Berechnungen angepasst werden können, wenn ein Schiff real schneller oder langsamer als die Vorhersage ist.

Am 06. und 07.07.2023 wurden Testfahrten mit dem ferngesteuerten Schiff in den Niederlanden durchgeführt. Diese Fahrten wurden durch das ingenieurbüro kauppert begleitet, um die Verfolgung des Schiffs mit der Drohne zu proben und erste Aufnahmen zu erstellen. Eine Aufnahme der Ernst Kramer im niederländischen Testgebiet ist in Abbildung 202 dargestellt.

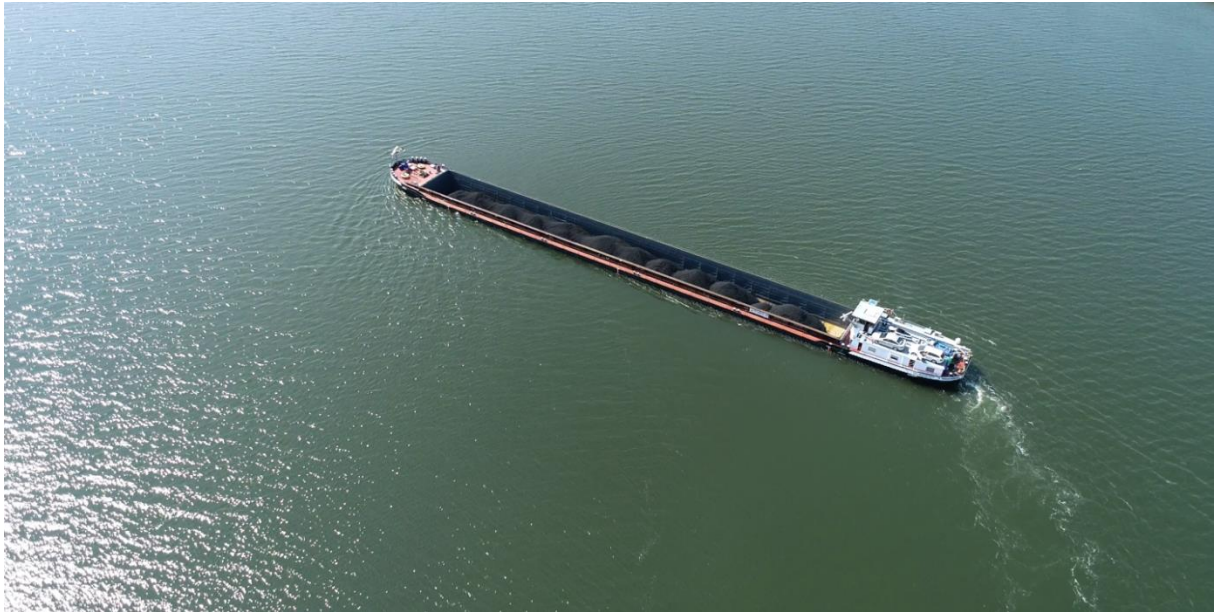


Abbildung 202: Drohnenaufnahme der Ernst Kramer im niederländischen Testgebiet am 07.07.2024

Im Anschluss an die Fahrten in den Niederlanden wurde Testfahrten im Wesel-Datteln-Kanal durchgeführt. Auch diese wurden durch das ingenieurbüro kauppert begleitet. Hier wurden die Ergebnisse der Verkehrssimulation vor Ort überprüft. So konnten Zeitpunkte von Brückendurchfahrten, Ort und Zeitpunkt von Schiffsbegegnungen vor Ort mit den prognostizierten Daten der Verkehrssimulation verglichen werden. Eine beispielhafte Drohnenaufnahme kurz vor einer Begegnung auf dem Wesel-Datteln-Kanal ist in Abbildung 203 dargestellt.

Auch während dieser Testfahrt lief mikroVon Kaskade im Livebetrieb. So konnten den Kollegen mit der Drohne vom Büro aus lohnenswerte Orte und Zeitpunkte für Drohnenaufnahmen vorab übermittelt werden, so dass diese sich vor Ort entsprechend positionieren konnten.

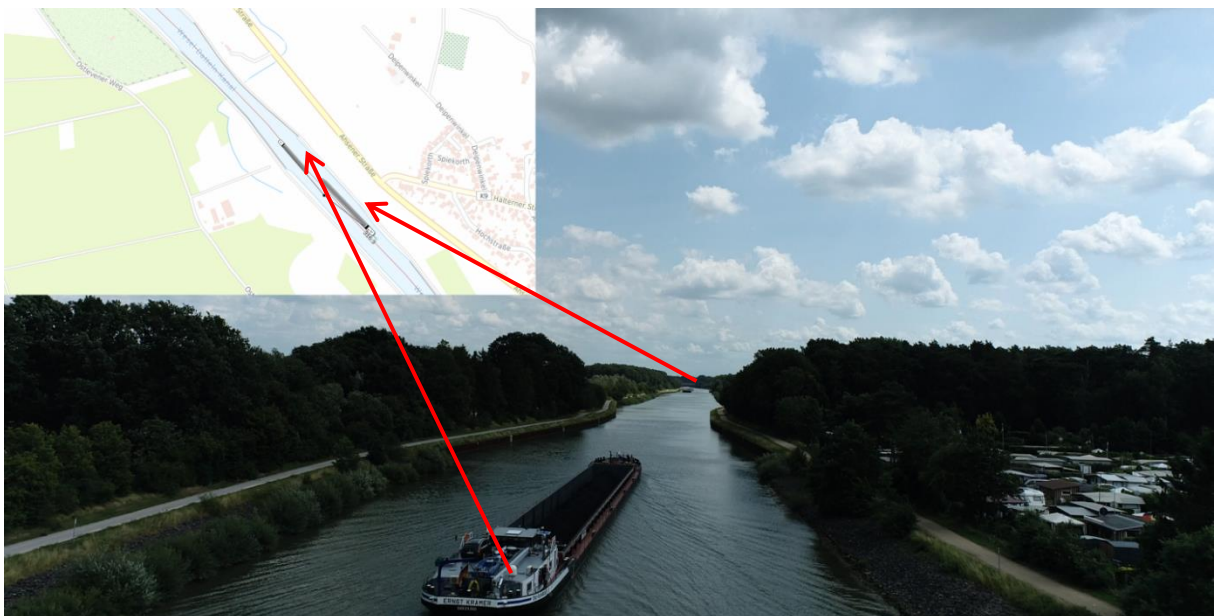


Abbildung 203: Beobachtete Begegnung der Ernst Kramer mit einem anderen Schiff am 13.07.2023 auf dem Wesel-Datteln-Kanal (Hintergrundkarte: TopPlusOpen)

Bei der Bearbeitung von AP 10400 zeigte sich, dass die On-Board-Daten durch den Projektpartner argonics in vollem Umfang geloggt werden und bereitgestellt werden können. Daher beschränkten sich die Arbeiten des ingenieurbüro kaupperts auf die Analyse und Verwendung der On-Board-Daten.

Die Anbindung der On-Board-Systeme an die Verkehrssimulation wurde realisiert. Es wurden Daten Live vom Schiff übertragen, durch die Verkehrssimulation nahezu in Echtzeit verarbeitet und für die Prognose der Schiffsbewegungen verwendet.

Für das AP 6500 (Erfassung von Daten landseitiger Sensoren) wurde der Bedarf von Projektpartnern an landseitigen Zusatzsensoren abgefragt. Es wurde seitens der Projektpartner aktuell kein Bedarf geäußert.

18.4 Analyse und Überwachung von Onboard-Live-Daten

Im AP 6100 wurden erste Arbeiten durch den AP-Leiter ausgeführt. Hier wurden entlang der Teststrecke entsprechende Messdaten erfasst. Eine Auswertung ergab, dass im Bereich der Teststrecke am südlichen DEK keine optimalen Mobilfunkempfangsverhältnisse vorliegen.

Im Rahmen eines Projekttreffens am 27.01.2022 wurden die Möglichkeiten zur Datenübertragung analysiert und verschiedene Kommunikationswege identifiziert. Auf dieser Basis konnten die verschiedenen Szenarien zur Kommunikation und den zugehörigen Kommunikationstechniken skizziert werden. Diese Szenarien umfassen digitale Kommunikation über Mobilfunk, aber auch analogen Funk über UKW-Welle.

18.5 Felderprobung

18.5.1 Fernsteuerungstests

Im Rahmen der Untersuchungen zur Fernsteuerung von Schiffen wurden umfangreiche Tests im Vinckekanal des Duisburger Hafens durchgeführt. Die Tests erstreckten sich über einen Zeitraum von mehreren Tagen und wurden jeweils dann durchgeführt, wenn das betreffende Schiff verfügbar war. Des Weiteren wurden weitere Versuche durchgeführt, darunter eine Probandenstudie, deren detaillierte Beschreibung in Kapitel 18.2.1 zu finden ist. Die Studie umfasste eine Reihe von Testszenarien, welche die Bewertung der Effizienz und Zuverlässigkeit der Fernsteuerung zum Ziel hatten. Ein weiterer Untersuchungsaspekt umfasste die Präsentation der Fernsteuerungstechnologie im Rahmen der Nationalen Maritimen Konferenz 2024 in Bremen. Diese Konferenz stellte eine ideale Plattform zur Vorstellung der Technologie gegenüber einem breiten Fachpublikum dar, um wertvolles Feedback zu erhalten. Die Versuchsreihe wurde mit einer Projektabschlussdemonstration abgeschlossen, in der die Ergebnisse und Forschungsfortschritte präsentiert wurden.

Das primäre Testgebiet für die Versuche und Präsentationen war der Vinckekanal, wie bereits in Abbildung 199 dargestellt. Das Gebiet bot ideale Bedingungen für die Durchführung der Versuche, da es eine kontrollierte Umgebung mit den notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen darstellt. Durch die verschiedenen Versuche konnte eine zuverlässige Mobilfunkverbindung für das Gebiet nachgewiesen werden.

Des Weiteren wurde eine Sonderfahrt von der Schleuse Meiderich durch die Schleuse Oberhausen und zurück durchgeführt. Der Verlauf dieser Fahrt ist in Abbildung 58 dargestellt. Die behördliche Genehmigung umfasste zudem das ferngesteuerte Ein- und Ausfahren in die Schleuse Oberhausen.

Die Ergebnisse der Untersuchung belegen, dass die Fernsteuerung in zahlreichen Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt werden kann. Dies umfasst auch komplexe Manöver wie das An- und

Ablegen sowie die Schleusennavigation. Allerdings wurden auch einige Herausforderungen identifiziert, insbesondere hinsichtlich der Stabilität der Mobilfunkverbindung und der Notwendigkeit, die adaptive Videoübertragung zu optimieren.

Die Versuche und Präsentationen folgten stets einem festgelegten Schema. Neben der vorgeschriebenen Besatzung befand sich ein zusätzlicher Mitarbeiter an Bord des Schiffes, um bei Bedarf vor Ort auftretende Probleme zu lösen und eine kontinuierliche Telefonkonferenz mit dem Steuerstand aufrechtzuerhalten. Vor Beginn jeder Fahrt wurden alle Funktionen gründlich überprüft, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Die detaillierte Prozedur für diese Überprüfungen ist in Anhang 24.1.2 dokumentiert.

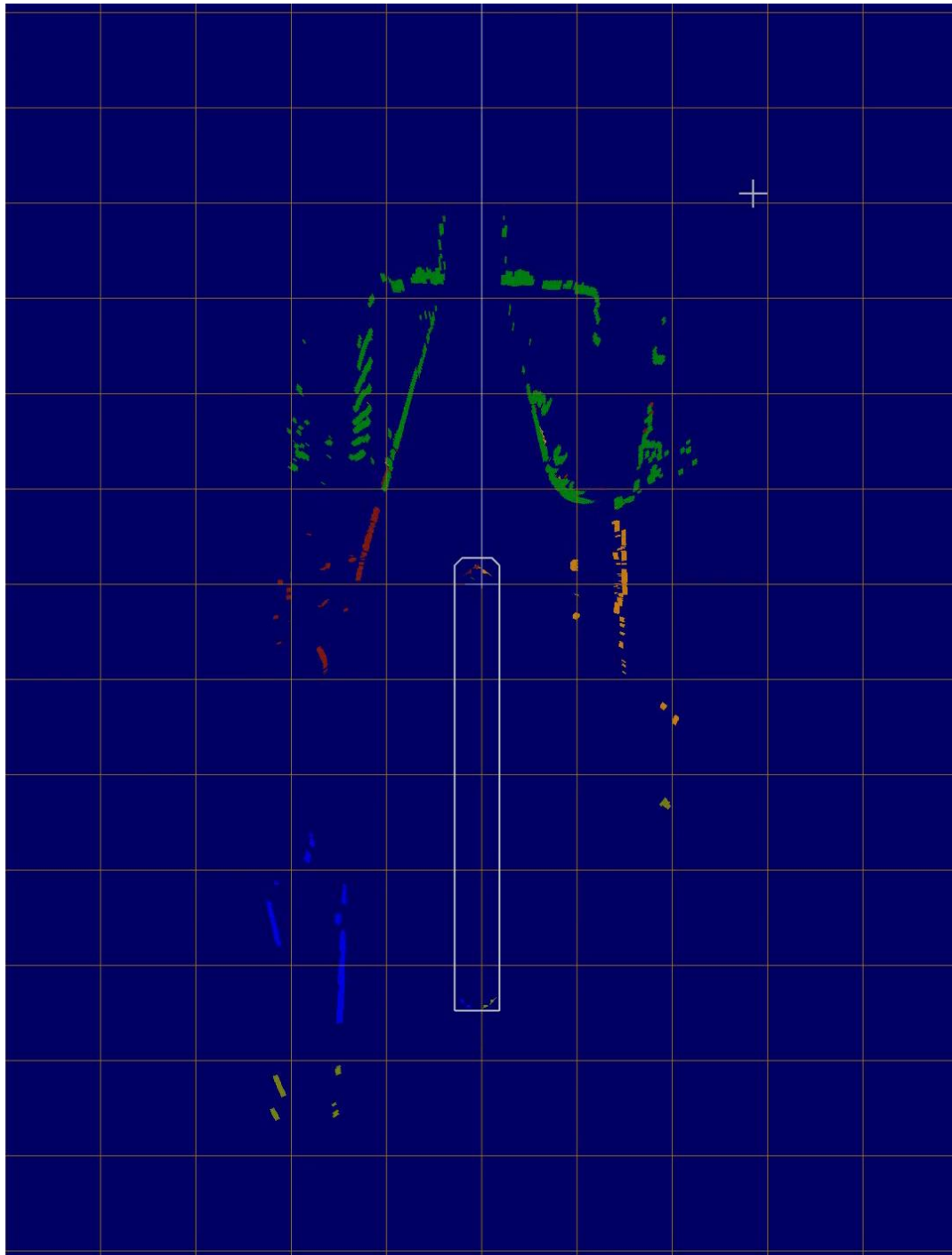


Abbildung 204 Übersichtsdarstellung LiDAR-Bilder

Die auf der Ernst Kramer installierten LiDAR-Sensoren konnten die unmittelbare Umgebung vor und hinter dem Schiff detailliert erfassen. Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft eine Situation bei der Einfahrt in eine Schleuse.

Abbildung 204 zeigt die gemeinsame Darstellung aller LiDAR-Bilder im Vorhafen einer Schleuse. Jeder LiDAR-Sensor ist in einer eigenen Farbe dargestellt. Der vorausschauende Scanner in grün, das LiDAR vorne links in rot und vorne rechts in orange. Entsprechend ist das LiDAR hinten links in blau und hinten rechts in beige dargestellt. Die Gitterlinien haben hier einen Abstand von 20 Metern.

Abbildung 205 zeigt die Situation in der Schleuse. Der Abstand der Gitterlinien beträgt auch hier 20 m. Der LiDAR-Sensor für die Vorausschau hat das Schleusentor erfasst

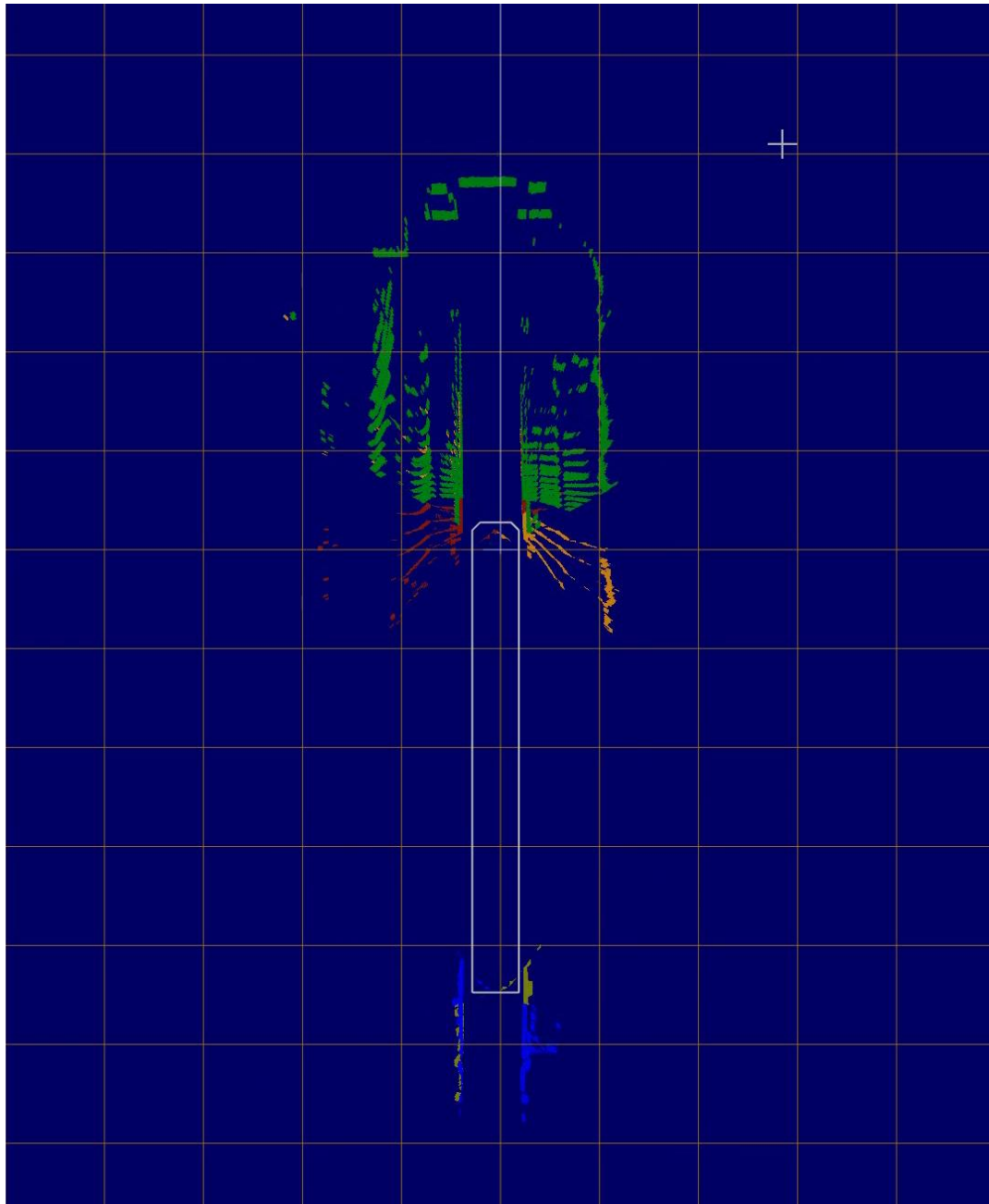


Abbildung 205

Für den operativen Betrieb sind diese Darstellungen aber nicht geeignet. Man erkennt den Abstand zur Schleusenwand nur sehr schwer. Die folgenden Bilder zeigen die Darstellung des Bereichs um den Bug

in kleineren Ranges. Das Bild Abbildung 205 zeigt die Einengung hin zur Schleusenammer in einer Range von 25 m, die Gitterlinien sind hier 5 m voneinander entfernt.

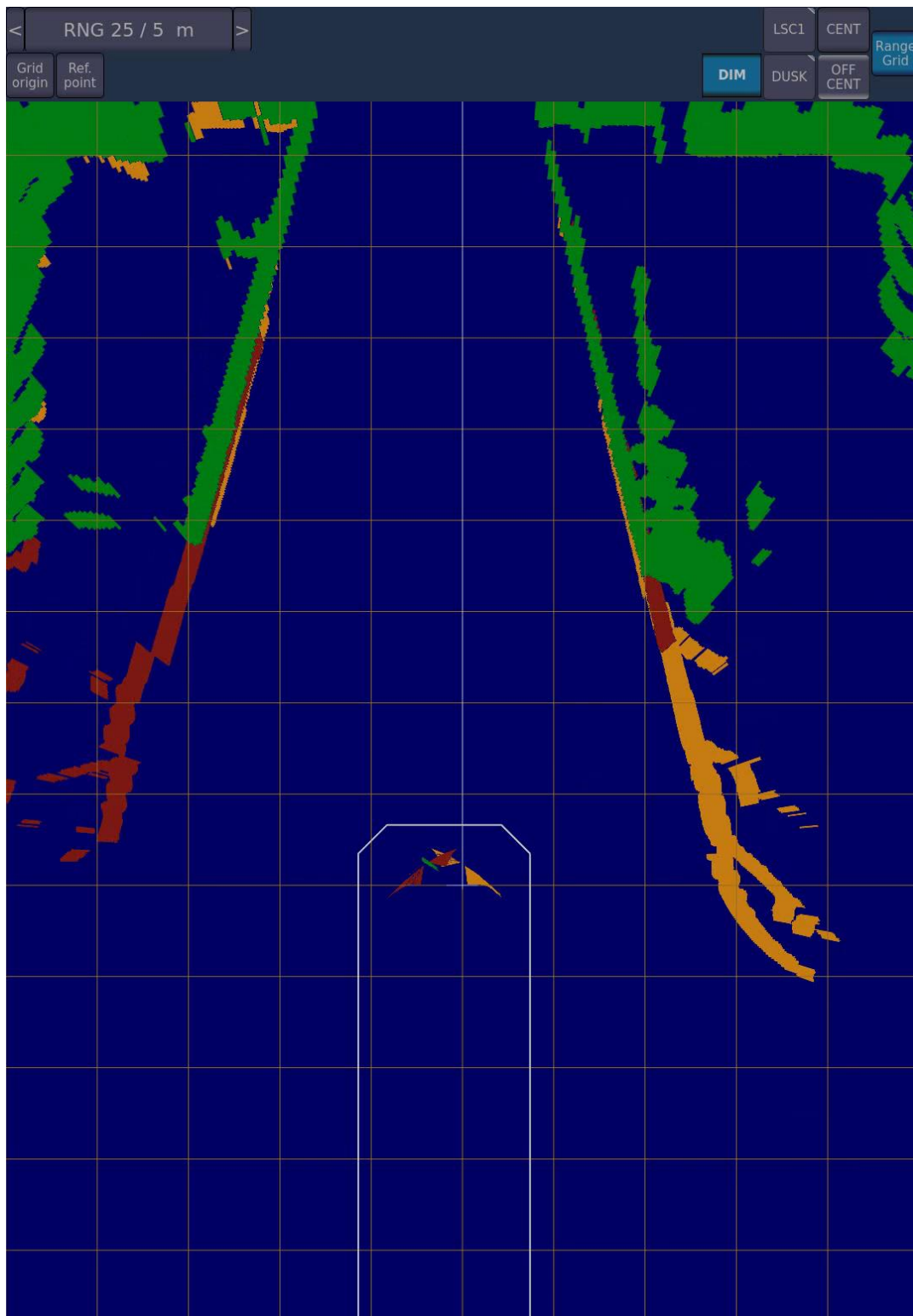


Abbildung 206

Abbildung 207 zeigt schließlich die Situation in der Schleusenammern in einem Darstellungsrang von 10 m, die Gitterlinien sind hier 2 Meter voneinander entfernt. Man erkennt hier jetzt deutlich die Abstände vom Schiff zur Schleusenwand.

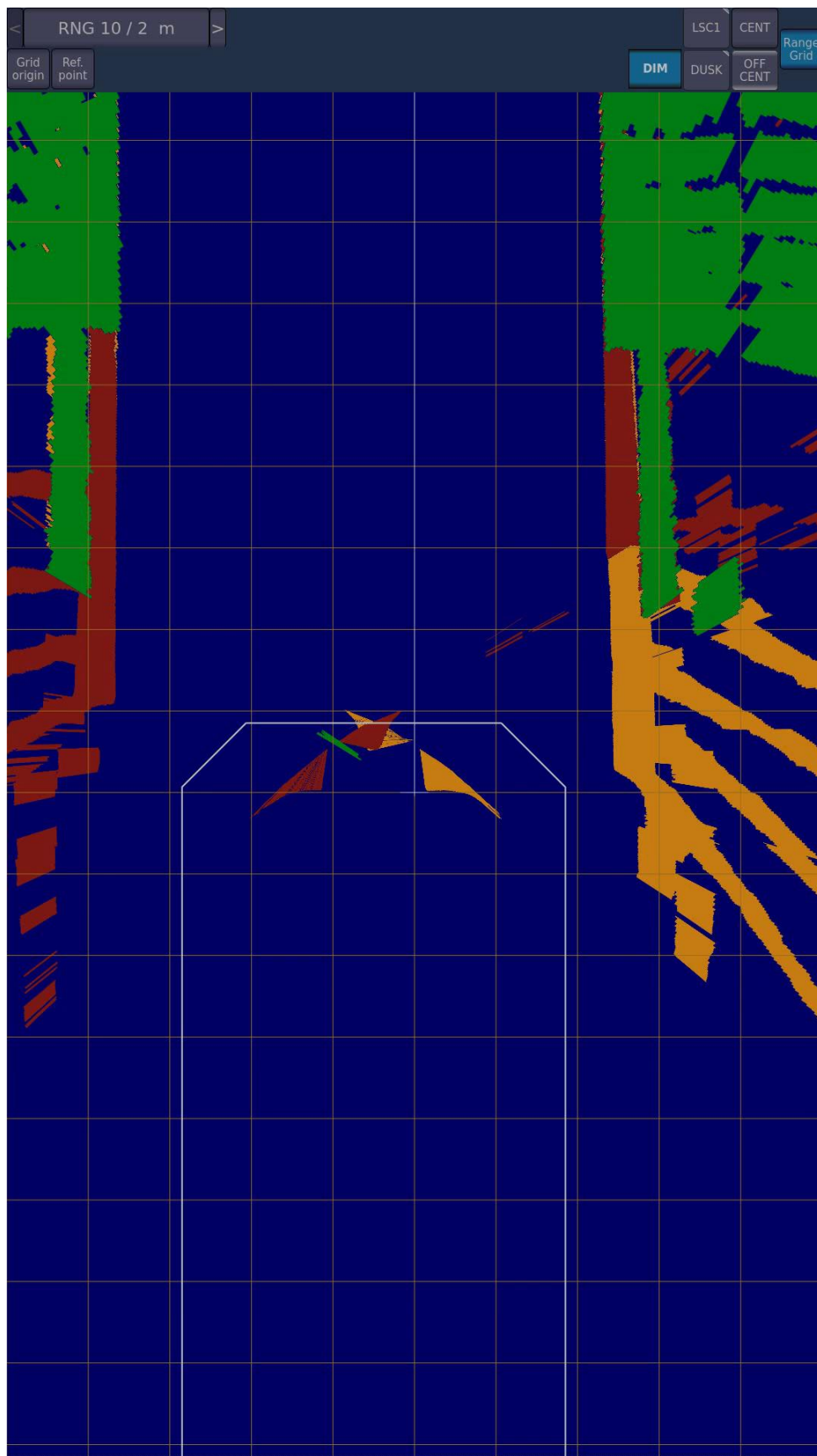


Abbildung 207

Am Heck des Schiffes ergeben sich folgende Darstellungen.

Abbildung 208 zeigt den Bereich vor dem Schleusentor im 25 m Range, der Abstand der Gitterlinien beträgt 5 m.

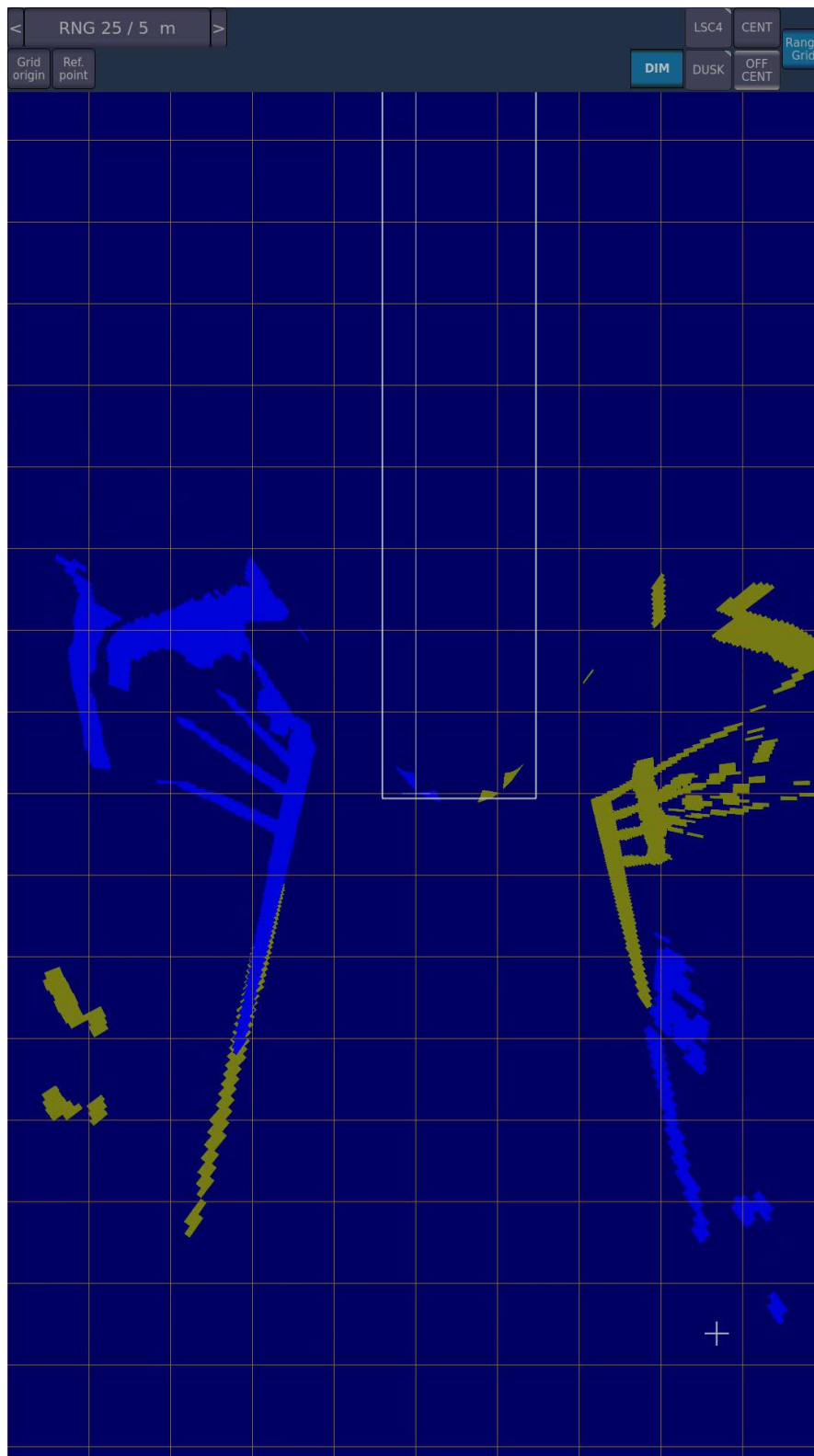


Abbildung 208: LiDAR-Bilder vom Heck vor Einfahrt in die Schleuse

Abbildung 209 zeigt das Heck des Schiffes in der Schleuse. Hier ist analog zu Abbildung 206 eine Range von 10 m eingestellt, der Abstand der Gitterlinien beträgt 2 Meter.

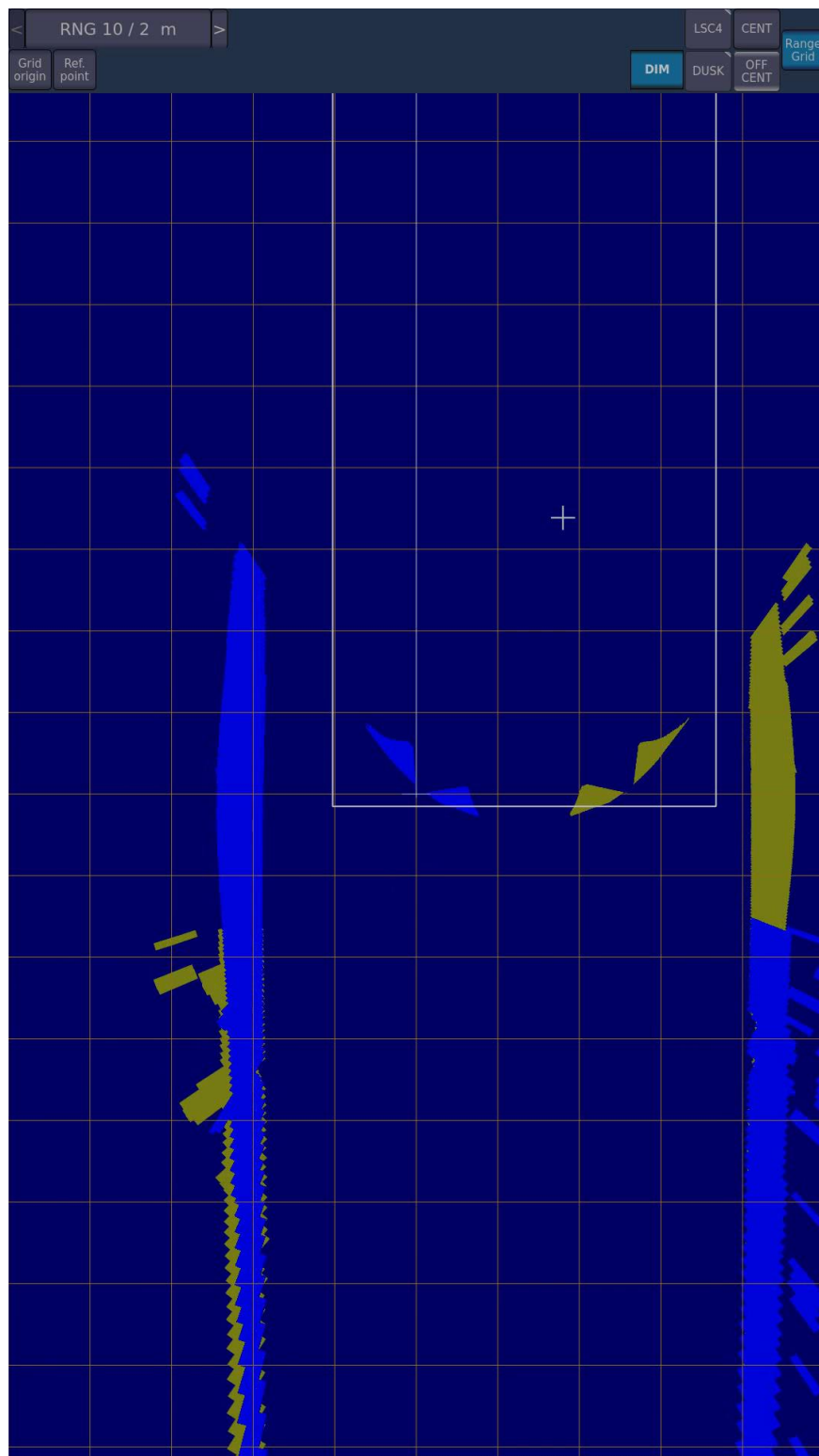


Abbildung 209

Aufgrund des großen Bandbreitenbedarfs der internen Darstellung der LiDAR-Bilder konnten sie nicht in den Fernsteuerstand übertragen werden.

18.5.2 Manövriertests

Es wurden Großausführungsmessungen mit dem Testschiff Ernst Kramer durchgeführt. Sie dienten der Validierung des Manövriermodells, der Validierung und Weiterentwicklung des Verfahrens zur indirekten Systemidentifikation, der Validierung und Entwicklung von Notfallfunktionalitäten und der Entwicklung des Digitalen Zwillings des Schiffes.

18.5.2.1 Durchführung verschiedener Manöver

Die Messkampagne setzte sich aus einem Abschnitt mit Manövrierversuchen in einem ausgewiesenen Testgebiet sowie einer Überfahrt nach Wesel mit weiteren Testfahrten im Wesel-Datteln-Kanal zusammen. Die Manövrierversuche wurden in den Niederlanden auf dem Vuile Gat zwischen km 1004 und 1011 durchgeführt. Die durchschnittliche Wassertiefe im Versuchsgebiet liegt bei etwa 8 m, womit für das Schiff nahezu Tiefwasserbedingungen vorlagen. Die Versuche fanden unter Glattwasserbedingungen statt. Es wurden zeitabhängige, tiebedingte Strömungen im Testgebiet beobachtet. Aufgrund des im Testzeitraum niedrigen Wasserstands auf dem Rhein wurde das Schiff auf einen Tiefgang von 2,5 m abgeladen.

Die Ernst Kramer wurde mit einem zusätzlichen Sensor zur hochgenauen Erfassung des Ruderwinkels ausgerüstet. Die weiteren relevanten Messgrößen (Position, Geschwindigkeit über Grund und durch das Wasser, Kurs, Bewegungen in 6 Freiheitsgraden, Propellerdrehzahl, Schub, Drehmoment, Drehzahl und Schubrichtung der Bugsteueranlage) wurden mit bereits zuvor installierten Sensoren erfasst und synchron aufgezeichnet. Für die Durchführung präziser Manöver hat der Projektpartner Argonics das Bahnführungssystem mit einer Funktionalität zur automatischen Durchführung von Zick-Zack-, R- und Drehkreismanövern ausgestattet.

Tabelle 37 stellt sieben Arten von Manövern dar. Die Versuche wurden im Rahmen einer Priorisierung in drei Gruppen unterteilt. Beschleunigungs-, Drehkreis-, Zick-Zack- und Propulsionstests haben die höchste Priorität. Alle Messungen haben die Anfahrphase des Manövers bis zum Erreichen der Startgeschwindigkeit beinhaltet.

Tabelle 37 Übersicht über die geplanten Versuchsarten. Die ersten vier Versuchsarten haben eine erhöhte Priorität

ID	Test	Startgeschwindigkeit	Anzahl	Wiederholungen
1	Beschleunigung/Verzögerung	16 km/h	2	0
2	Drehkreis	10 km/h	4	2
3	Zick-Zack	10 km/h	8	2
4	Propulsion	16 km/h	5	0
5	R-Manöver	10 km/h	10	4
6	Stopp-Test	12 km/h	3	0
7	Bugstrahlruder	0 km/h	21	0

Im Folgenden werden die einzelnen Versuchsarten näher erläutert:

Beschleunigung/Verzögerung

Diese Testreihe bestand aus drei Phasen: Beschleunigungsphase, stationäre Phase und Verzögerungsphase, siehe Abbildung 210. Während des Manövers sollte der Kurs gerade gehalten werden, wobei die Ruderausschläge so gering wie möglich sein sollten.

Beschleunigungsphase. Das Schiff sollte zu Beginn mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4 km/h und einem Ruderwinkel von 0° geradeaus fahren. Dann beschleunigte das Schiff mit maximaler Leistung bis zu einer Zielgeschwindigkeit von 16 km/h.

Stationäre Phase. Nachdem in der Beschleunigungsphase die Zielgeschwindigkeit erreicht wurde, wurde die Gashebelstellung konstant gehalten, bis das Schiff wieder einen Zustand mit konstanter Fahrtgeschwindigkeit erreicht.

Abbremsphase. Das Schiff fuhr mit einem Ruderwinkel von 0° geradeaus. Dann wurde die Leistung gedrosselt und der Propeller ausgekuppelt, sodass dieser sich frei drehen konnte, während das Schiff langsamer wurde. Der Test war beendet, als das Schiff eine Geschwindigkeit von 4 km/h erreicht hatte.

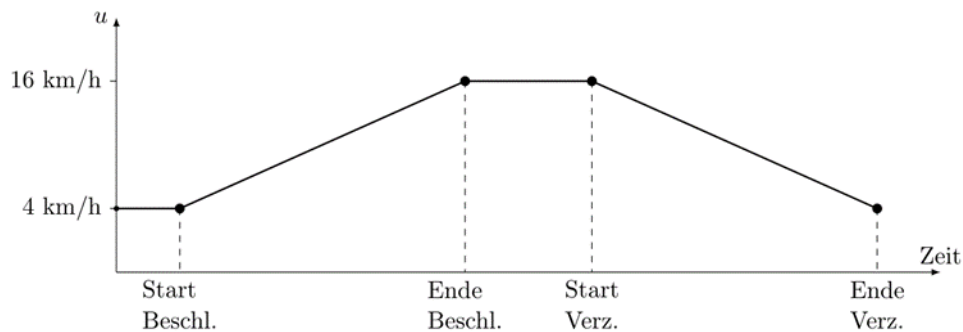


Abbildung 210 Beschleunigungs- und Verzögerungsphase während der Versuche

Drehkreismanöver

Drehkreismanöver sind sowohl nach Backbord als auch nach Steuerbord mit einer Startgeschwindigkeit von 10 km/h durchgeführt worden. Das Schiff sollte bei den Manövern eine Kurswinkeländerung von mindestens 540 Grad vollziehen oder bis die Drehrate konstant war. Die Trajektorie des Schiffes sollte außerdem näherungsweise einem Kreis entsprechen. Folgende Größen wurden gemessen: n , v , r , Position und Kurs.

Tabelle 38 Übersicht über die Drehkreismanöver

	Manöver	Richtung	Ruderwinkel
1	Drehkreis	Steuerbord	35°
2	Drehkreis	Backbord	35°
3	Drehkreis	Steuerbord	45°
4	Drehkreis	Backbord	45°

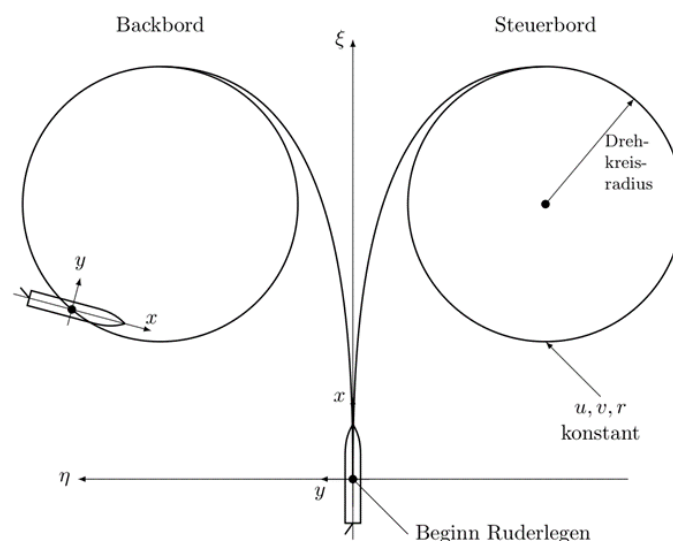


Abbildung 211 Ideale Trajektorien von Drehkreismanövern mit Ruderlage nach STB und BB

Zick-Zack Manöver

Zick-Zack-Manöver wurden jeweils mit Start nach Backbord und Steuerbord durchgeführt, um Einflüsse aus der Asymmetrie der Strömung um das Schiff zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass jeweils Paare von Zick-Zack-Manövern gefahren wurden. Vor Manöverbeginn beginnt, fuhr das Schiff mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h mit einer Ruderlage von 0° geradeaus.

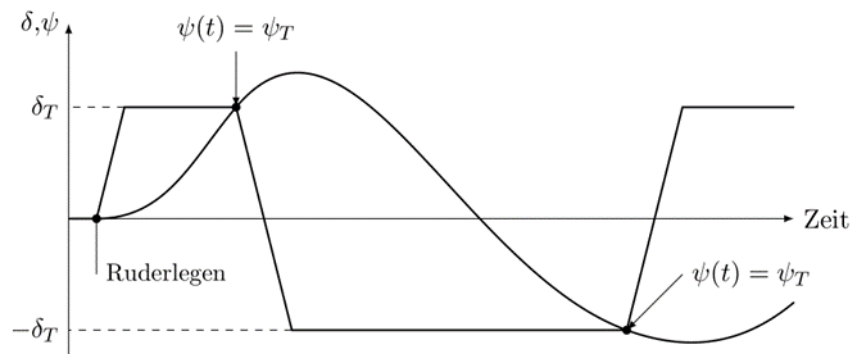


Abbildung 212 Zick-Zack Manöver. δ_T stellt den Ruderwinkel und ψ_T den Kurswinkel dar

Propulsionsversuche

Die Propulsionsversuche wurden bei Geradeausfahrt durchgeführt. Das bedeutet, dass der Ruderwinkel möglichst in neutraler Lage zu halten war. Die Versuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Propulsionsparameter aus den Modellversuchen mit dem realen Schiff abzugleichen, da in den Modellversuchen ein anderer Propeller verwendet wurde. Dadurch kann das Propulsionsmodell validiert und ggf. verfeinert werden. Die Propulsionsversuche starteten bei einer konstanten Geschwindigkeit von 4 km/h. Die Propellerdrehzahl wurde als n_1 aufgezeichnet. Nach einer Zeit bei konstanter Drehzahl und Schiffsgeschwindigkeit wurde die Propellerdrehzahl um den Betrag Δn erhöht und erneut konstant gehalten, bis eine konstante Vorwärtsgeschwindigkeit erreicht wurde. Dieses Verfahren wurde, wie in Abbildung 213 dargestellt, bis zu einer Geschwindigkeit von 16 km/h fortgesetzt.

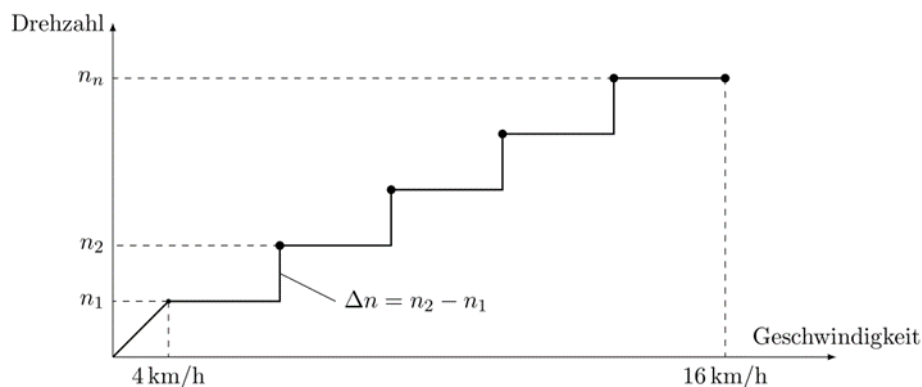


Abbildung 213 Propulsionsversuch

R-Manöver

Die R-Manöver wurden in Anlehnung an die ES-TRIN ausgewählt. Im Unterschied zum Zick-Zack-Manöver erfolgte die Umsteuerung des Ruders bei einer definierten Drehrate anstatt einer Kurswinkeländerung. Dies hat einen geringeren Platzbedarf zur Folge und ist daher insbesondere im Binnenbereich von Bedarf. Ein Graph der Zusammenhänge zwischen Ruderlage und Drehrate ist in Abbildung 214 dargestellt.

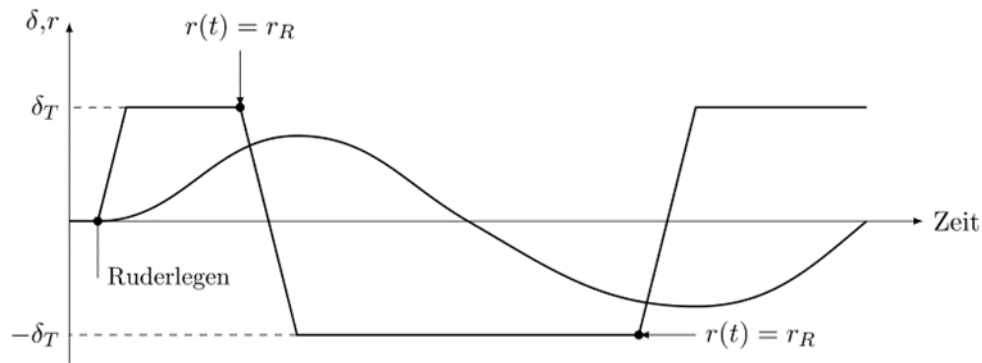


Abbildung 214 R-Manöver (Ruderwinkel δ_T und Drehrate r_R)

Stoppversuche

Bei Stoppversuchen wurde die Geschwindigkeit des Schiffes von einem konstanten Ausgangswert auf 0 km/h reduziert, indem durch Rückwärtsschub verzögert wird. Als weitere Variante wurden sog. Trägheitsuntersuchungen durchgeführt, bei denen das Schiff ohne Rückwärtsschub und ohne die Bremswirkung des Propellers, also mit frei drehendem Propeller, verzögert wurde.

Normaler Stoppversuch

1. Startgeschwindigkeit für eine Minute konstant halten.
2. Gegenschub einstellen.
3. Zeitpunkt aufzeichnen, bei dem der Propeller beginnt in die Gegenrichtung zu drehen.
4. Versuchsende, wenn das Schiff eine Geschwindigkeit von 0 km/h erreicht hat.

Trägheitstests

1. Startgeschwindigkeit für eine Minute konstant halten.
2. Propeller auskuppeln.
3. Versuchsende, wenn das Schiff eine Geschwindigkeit von 5 km/h erreicht hat.

Bugstrahlruder-Tests

Diese Versuche dienen dazu, einen möglichst genauen digitalen Zwilling des Bugstrahlers zu entwickeln. Daten zu dem Bugstrahler, welche diese Versuche ersetzen könnten, standen dem Projektconsortium nicht zur Verfügung und waren auch über den Hersteller der Anlage nicht beziehbar. Das Schiff sollte zu Beginn des Versuchs ohne Nutzung von Manövrierorganen auf der Stelle stehen. Während des Manövers wurde nur das Bugstrahlruder verwendet. Es wurden Versuche bei vier verschiedenen Schubrichtungen β durchgeführt (siehe Abbildung 215). Für jeden Winkel wurden fünf Schubeinstellungen des Bugstrahlruders untersucht. Jede Schubeinstellung wird so lange ausgeführt, bis die Geschwindigkeit des Schiffes und die Gierrate konstant waren.

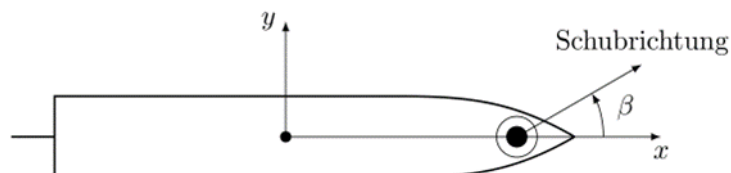


Abbildung 215 Position des Bugstrahlruders am Schiff und Schubrichtung β

Insgesamt wurden im Vuile Gat 87 Manöver gefahren, darunter:

- 2 Fahrten auf geradem Kurs durch das Testgebiet zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit
- 2 passive Stoppmanöver
- 10 Drehkreismanöver mit unterschiedlichen Ruderwinkeln und zu unterschiedlichen Seiten, teilweise mit anschließendem Ausschwingversuch
- 33 Zick-Zack-Manöver unter Variation des Ruderwinkels, des Kurswinkels, der Startrichtung (BB und STB) und der Fahrtrichtung (zu Berg und zu Tal)
- 2 Versuche mit periodischer Ruderlagenänderung
- 3 Propulsionsversuche
- 2 Vier-Quadranten-Propulsionsversuche
- 6 Bugstrahlerversuche
- 25 R-Manöver
- 2 Manöver mit durchgehendem Wechsel zwischen mehreren zufällig gewählten Ruderwinkeln

Im Wesel-Datteln-Kanal wurden Messungen bei unterschiedlichen Abständen zwischen Schiff und Kanalböschung durchgeführt, um die Einflüsse der Gewässergrenze (sog. Bankeffekte) auf das Fahrverhalten des Schiffes zu analysieren.

Es wurde vor der Durchführung der Versuche eine Weboberfläche entwickelt, mit der während der Versuchsfahrten alle Messwerte in Echtzeit angezeigt und die Güte der Versuche direkt beurteilt werden konnte. Dies ermöglichte eine effiziente Nutzung der Versuchszeit und eine deutlich höhere Anzahl von Versuchen, da Wartezeiten für Zwischenauswertungen minimiert werden. Des Weiteren konnte direkt erkannt werden, wann Wiederholungen von Versuchsfahrten, z. B. infolge von Störungen durch Wind und Strömung, erforderlich waren. Die Weboberfläche ist in Abbildung 216 dargestellt. Um die Messdaten zu speichern und an die Weboberfläche zu übermitteln, wurde ein Serverdienst programmiert, der folgende Messdaten übernimmt:

1. Messdaten der IMU,
2. Messdaten des Messverstärkers und
3. Messdaten aus dem vorhandenen OPC-UA-System

Für die IMU und einen zusätzlichen Messverstärker wurden jeweils einzelne Prozesse entwickelt, die die Messdaten mit 100 Hz in einer Datenbank ablegen und mit 10 Hz an den Serverprozess und damit an die Weboberfläche senden. Der Serverprozess überwachte alle Änderungen der Parameter im OPC-UA, speicherte diese in der Datenbank ab und sendete gleichzeitig die neuen Werte an die Weboberfläche. Das Speichern der Daten fand kontinuierlich statt. Über die Weboberfläche wurden in der Datenbank Zeitstempel für den Start- und Stoppzeitpunkt inkl. Bezeichnungen der jeweiligen Messfahrt gesetzt. Somit sind die Messdaten für den kompletten Zeitraum aller Messfahrten verfügbar, z. B. falls bei der Auswertung festgestellt wird, dass Daten außerhalb des angegebenen Messintervalls benötigt werden.



Abbildung 216 Echtzeitanzeige der Messdaten

18.5.2.2 Validierung der Manöversimulationen

Abbildung 217 zeigt einen Vergleich zwischen einer Großausführungsmessung und der mit dem Manövriermmodell berechneten Bahn des Schiffes für ein Drehkreismanöver mit 45° Ruderwinkel. Schwarze durchgezogene Linien stellen die Großausführungsmessung dar, rote gestrichelte Linien die Simulation. Die normierte Bahn des Schiffes ist im erdfesten Koordinatensystem dargestellt. Längen wurden mit der Schiffslänge L normiert. Der stationäre Drehkreisdurchmesser liegt bei etwa 0,8 Schiffslängen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist oben die normierte Geschwindigkeit über die die mittels Initialgeschwindigkeit U_0 und Schiffslänge normierte Zeit t dargestellt. Die Geschwindigkeitsreduktion beträgt etwa 65 %. Rechts unten ist analog dazu die normierte Drehrate über die Schiffslängenfahrtzeit dargestellt. Die berechneten und gemessenen Drehraten stimmen gut überein.

Im Versuch ist zwischen den dimensionslosen Zeiten von 5 und 20 eine Schwankung der Drehrate sichtbar. Diese ist auf die Gewässerströmung zurückzuführen. Die letztgenannte ist auch die Ursache für die spiralförmige Bahnlinie beim Drehkreisversuch. Außerdem weist auch die Längsgeschwindigkeit eine Schwankung auf. Dieses Verhalten wurde erwartet und kann später im digitalen Zwilling durch Berücksichtigung der Strömungsgeschwindigkeit abgebildet werden. Die Übereinstimmung des Manövriermodells mit den erhobenen Messdaten kann somit als gut bewertet werden.

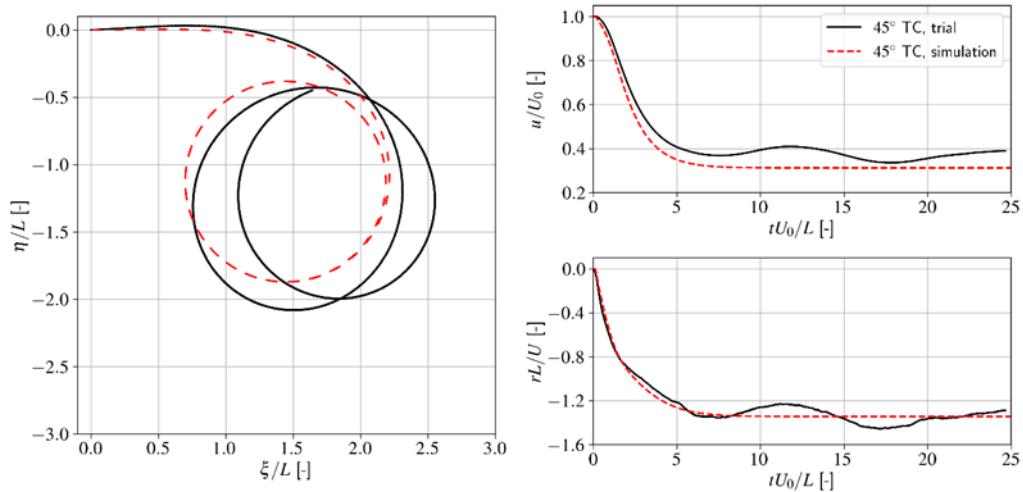


Abbildung 217 Vergleich zwischen Großausführungsmessung und Manöverberechnung für ein Drehkreismanöver mit 45° Ruderwinkel. Links: Normierte Bahn des Schiffes; rechts oben: Normierte Voraussgeschwindigkeit über normierte Zeit; rechts unten: Normierte Drehrate über normierte Zeit

Abbildung 218 zeigt einen Vergleich zwischen vier 35/10-Zick-Zack-Manövern und einer Manöversimulation mittels des Manövriervermodells. Schwarze Linien beziehen sich auf wiederholte Großausführungstests; die rote gestrichelte Linie auf simulierte Zick-Zack-Manöver. Die normierten Bahnen sind im erdfesten Koordinatensystem dargestellt. Die zugehörigen Zeitreihen zeigen jeweils normiert den Ruder- und Kurswinkel (links unten), die Voraussgeschwindigkeit (rechts oben), die Quergeschwindigkeit (rechts, 2. v. oben), die Drehrate (rechts, 3. v. oben) und den nicht normierten Driftwinkel (rechts unten).

Die Bahn des simulierten Zick-Zack-Manövers stimmt insgesamt mit den Großausführungsmessungen gut überein. Dies gilt allerdings nicht für die strömungsbedingte Driftbewegung nach Backbord. Simulierte und gemessene Zeitreihen von Ruderwinkel und Kurswinkel stimmen in guter Näherung überein. Die Unterschiede der gemessenen Bahnen sowie die zeitlichen Abweichungen zwischen den gemessenen Umsteuerzeitpunkten des Ruders und den gemessenen Kurswinkeln deuten auf eine zeitabhängige Veränderung der Strömung im Testgebiet infolge der Tiede hin. Insgesamt bildet das im Rahmen des Projekts entwickelte Manövriervermodell das Manövrierverhalten des Schiffes gut ab.

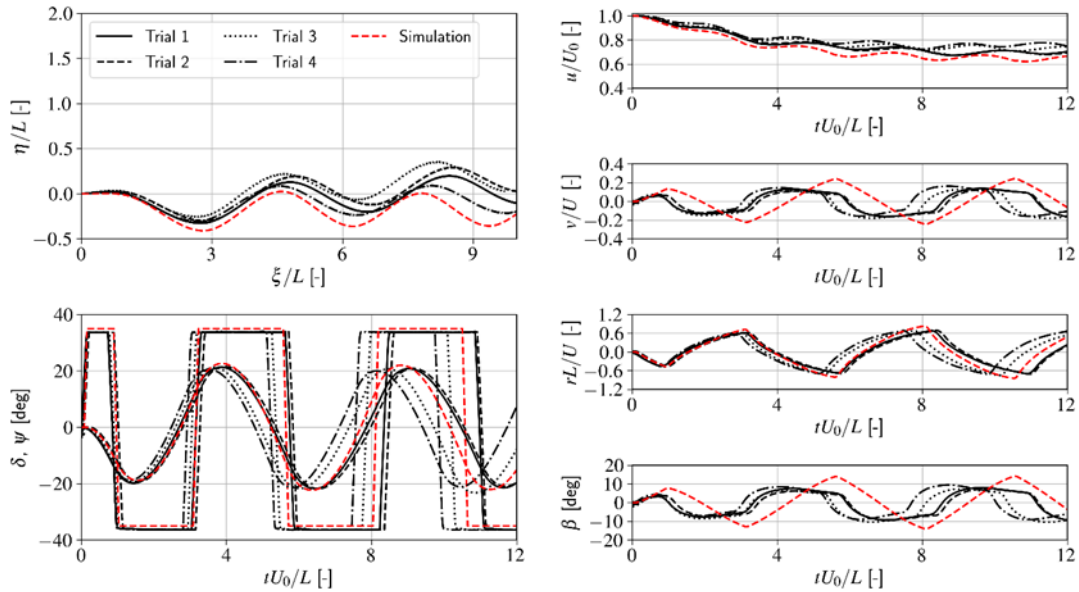


Abbildung 218 Vergleich zwischen Simulation und Messung für 35/10 Zick-Zack-Manöver nach Steuerbord (alle Größen normiert). Links oben: Bahn; links unten: Ruder- und Kurswinkel; rechts oben: Voraussgeschwindigkeit; rechts, 2. v. oben: Quergeschwindigkeit; rechts, 3. v. oben: Drehrate; rechts unten: Driftwinkel

18.6 Demonstrationen

Um den Steuerstand zu evaluieren, wurden zwei unterschiedliche Probandenstudien durchgeführt. Die Probanden erprobten die Funktionalitäten des Steuerstands; abschließend wurden Fragen in Form einer Online-Befragung und eines Interviews gestellt. In der ersten Probandenstudie steuerten erfahrene Schiffsführer die „Ernst Kramer“ vom Steuerstand aus. Dadurch konnten die Operatoren die Funktionalitäten des Steuerstands direkt testen und bewerten. In der zweiten Probandenstudie wurde angehenden Schiffsführern und Matrosen eine aufgezeichnete Fahrt am Steuerstand gezeigt. Damit erhielten die Auszubildenden als zukünftige Arbeitnehmer im Bereich einen Einblick in den Stand der Wissenschaft der Automatisierung in der Binnenschifffahrt. Teilweise wurde eine Eye-Tracking Brille eingesetzt. Diese Studien ergaben eine sehr positive Akzeptanz für die Fernsteuerung und auch Verbesserungsvorschläge für die Gestaltung des Fernsteuerstands. So wurde beispielsweise der Stream der nach achtern blickenden Kamera ursprünglich auf einem Monitor hinter dem Operator dargestellt, so wie es auf der realen Brücke oder auch in einem Schiffsführungssimulator ist. Dieser Monitor wurde dann nach vorne gesetzt, so dass sich schließlich alle Kamerabilder im Blickfeld voraus befinden.

Der Realerprobungen stellten sich aufgrund der Vorschriftenlage als große Herausforderung dar. Im Gegensatz zum Rechtsverständnis bei der Projektplanung, zeigte sich, dass die Erprobung der Fernsteuerung auf dem Rhein nicht zulässig ist. Zur Erfüllung von §1.09 der RheinSchPV genügt es nicht, wenn ein Rudergänger an Bord ist, der alle Vorgaben erfüllt. Die Vorschrift erstreckt sich auch auf jeden zusätzlichen Rudergänger in der Fernsteuerzentrale. Dasselbe gilt gleichermaßen für §1.09 BinSchStrO. Auf den Binnenwasserstraßen war schließlich eine Erprobung mit Sondergenehmigung nach §1.21 BinSchStrO möglich. Diese Sondergenehmigungen mussten allerdings für jede einzelne Testfahrt erteilt werden.

Erst nach Projektende ist in der BinSchStrO mit §1.28 eine Möglichkeit geschaffen worden, ferngesteuerte Versuchsfahrten regelmäßig beantragen zu können.



Abbildung 219 Testfahrt bei der Nationalen Maritimen Konferenz 2023

In der Realfahrt-Probandenstudie haben acht erfahrene Binnenschiffsführer den Steuerstand im realitätsnahen Betrieb erprobt und bewertet. Die Studie dauerte ca. 3 Stunden pro Teilnehmer und bestand aus einer Einarbeitungsphase (30 min), einer ferngesteuerten Fahrt (105 min) sowie einem Befragungsteil (45 min). Zunächst wurde dem Operator das Fernsteuerungssystem mithilfe von eigenem im Projekt entwickelten Schulungsmaterialien erklärt und er in den Ablauf der Studie eingewiesen. Die Schulungsmaterialien enthalten unter anderem Informationen zu den rechtlichen Voraussetzungen der Fernsteuerung, den installierten Kameras an Bord, dem Fernsteuer-Fahrstand und dessen Anzeigekomponenten sowie Hinweise zur Bedienung des Fernsteuerungssystems.

Bei der Abschlussdemonstration wurde schließlich auch eine Fahrt im Rhein-Herne-Kanal einschließlich einer Schleusung durchgeführt.

19 Nicht-technische Voraussetzungen für den Regelbetrieb

19.1 Qualifizierung

Dem übergeordneten Ziel des Vorhabens FernBin, eine Möglichkeit zu erschaffen, ein Binnenschiff (beziehungsweise perspektivisch eine Flotte von Binnenschiffen) sicher von einem zentralen Leitstand an Land aus durch einen Schiffsführer zu fahren, folgend ist die nicht-technische Voraussetzung, die fernsteuernden Schiffsführer für diese Tätigkeit zu qualifizieren. Dabei ist zukünftig noch zu definieren, ob es eine grundständige Ausbildung zum fernsteuernden Schiffsführer im Rahmen der Schiffsführer-Ausbildung geben soll, und/ oder eine Zusatzausbildung zum fernsteuernden Schiffsführer für bereits

geprüfte Schiffsführer. In jedem Fall müssen den angehenden fernsteuernden Schiffsführern die erforderlichen Qualifikationen vermittelt werden.

Hierfür wurde im Rahmen des Vorhabens ein Schulungskonzept erarbeitet. Dieses sollte auf bereits vorhandenen Schulungen und Ausbildungen zum „herkömmlichen“ Binnenschiffer aufbauen und sich nach Möglichkeit an „gängige Ausbildungskonzepte auf europäischer Ebene“ anlehnen. In der Realität sind die Ausbildungen in einzelnen Staaten allerdings sehr inhomogen. Daher wurde als Grundlage der „Europäische Standard für Qualifikationen in der Binnenschifffahrt“ (ES-QIN 2019) des CESNI 2019 gewählt. Dieser liegt allen europäischen Ausbildungskonzepten als Standard zugrunde und definiert zu vermittelnde und nachzuweisende Fähigkeiten und Kenntnisse. Die bereits im bestehenden ES-QIN 2019 dokumentierten Befähigungen und Grundsätze sind selbstverständlich auch im ferngesteuerten Betrieb weiterhin zu beachten und wurden hier dem Grundansatz der ES-QIN 20219 folgend fortgeschrieben. Dabei handelt es sich nicht um eine vollumfassende Beschreibung aller für den ferngesteuerten Betrieb notwendigen Befähigungen, sondern um eine Beschreibung derjenigen Befähigungen, die im Rahmen des Vorhabens auch implementiert und von Schiffsführern erfolgreich durchgeführt wurden:

1. Vorbereitung einer ferngesteuerten Fahrt
2. Übergabe in beide Richtungen
3. Ablegen
4. Fahrt
5. Wenden / Drehen
6. Anlegen / Festmachen

Weitere Befähigungen und deren Training können Bestandteil eines anschließenden Vorhabens sein.

Die Lerninhalte des FernBin Schulungskonzepts wurden in zwei Phasen gegliedert:

- Theoretische Vorbereitung auf die fernsteuernde Schiffsführung anhand von ausgehändigtem Schulungsmaterial.
- Praktische Umsetzung am Fernsteuer-Fahrstand in Form von Übungen und Trainingsfahrten.

Die Vermittlung der theoretischen Grundlagen erfolgt primär im Selbststudium auf Basis des Schulungsmaterials und unterstützender Medien wie Schulungsvideos. Ergänzend können theoretische Grundlagen zukünftig auch in Kleingruppen in Präsenz, in Webmeetings oder perspektivisch evtl. auch in web-based Trainings vermittelt werden. Die praktische Ausbildung am Steuerstand erfolgt in Einzelunterricht.

Begleitend zur Entwicklung der Schulungsinhalte wurden erfahrene Schiffsführer als Experten befragt; deren Feedback wurde in das Schulungskonzept integriert. Das Schulungskonzept liegt als ausführliche Beschreibung in Textform vor, inklusive einer Beschreibung der zu vermittelnden Kenntnisse und Fähigkeiten in Tabellenform, das dem Format der ES-QIN 2019 entspricht. Ferner liegt das Schulungsmaterial für den theoretischen Teil in Form von Präsentationsfolien vor, ergänzt um ein begleitendes Schulungsvideo.

Die Kerninhalte des Schulungsmaterials sind:

- Beschreibung des Aufbaus des Fahrstandes und der integrierten Bedienelemente und Funktionen
- Beschreibung der an Bord installierten Kameras und deren Steuerung
- Grundlegende technische Voraussetzungen des Systems

- Hinweise zu relevanten Unterschieden zur Schiffsführung an Bord, insbesondere optische Wahrnehmung und Latenzen
- Benennung von Grenzen des Systems und rechtliche Hinweise

Die entwickelten Schulungsmaterialien wurden im Rahmen der Probandenstudie mit – bis dahin an der Entwicklung des Fernsteuer-Fahrstandes unbeteiligten – Schiffsführern angewendet. Im Anschluss an die fernsteuernde Fahrt wurden die Probanden unter anderem auch zum Schulungsmaterial befragt. Das Feedback war durchgehend positiv; es wurde bescheinigt, dass eine gute Grundlage geschaffen wurde. Konstruktive Rückmeldungen aus der Probandenstudie wurden in das finale Schulungskonzept eingearbeitet.

In der Zukunft kann das Schulungskonzept dahingehend ergänzt und verbessert werden, dass die Inhalte auf eine modernere, abwechslungsreichere und medial unterstützte Art und Weise transportiert werden (interaktive Inhalte, Videos, Abfragen/Lernkontrollen, web-based Trainings etc.). Ferner sind perspektivisch auch Prüfungsrichtlinien und -formate zu entwickeln. Dies ist allerdings ein eigenes, komplexes Thema, das mit entsprechenden Aufwänden verbunden ist.

Grundsätzlich wird stark empfohlen, dass Thema Schulung und Ausbildung in Zukunft weiter professionell auszubauen. Der Stellenwert von Schulungen wird sowohl von den Projektpartnern als auch von externen Parteien aus dem Binnenschiffahrtsumfeld betont. Eine fundierte Ausbildung zum fernsteuernden Schiffsführer bildet und stärkt das Vertrauen der Schiffsführer in diese neue Technik.

19.2 Anpassungsbedarf der Vorschriften

Es wurde eine Recherche zu Richtlinien und Vorschriften durchgeführt, die in Bezug auf die schiffstechnischen Aspekte (Schiffbau, Ausrüstung, Mannschaft, etc.) Auswirkungen auf die Entwicklung ferngesteuerter Binnenschiffe haben können. Es wurden folgende Vorschriften einbezogen:

- Europäischer Standard „Technische Vorschriften für Binnenschiffe – ES-TRIN“
- Binnenschiffahrtsstraßenordnung – BinSchStrO
- Rheinschiffspersonalverordnung – RheinSchPersV
- Rheinschiffahrtspolizeiverordnung – RheinSchPV

Zusätzlich wurden verfügbare Informationen aus dem Projekt AUTOSHIP sowie das DNV GL Positionspapier „Remote Controlled and Autonomous Ships“ gesichtet. Ferngesteuerte Schiffe sind in keinem der Regelwerke explizit berücksichtigt; Sie werden allerdings einige bestehende Anforderungen an die Beschaffenheit der Systeme nicht einhalten können. Insofern besteht ein konkreter Anpassungsbedarf der bestehenden Vorschriften. Beispiele hierfür sind:

a) lt. Teil 1 §1.09 RheinSchPV bzw. §1.09 BinSchStrO ist die Anwesenheit eines Rudergängers auf dem Schiff gefordert.

b) lt. ES-TRIN 2021/1 darf ein Bugstrahler nur vom Steuerhaus aus fernbedient werden.

Nach der Rechtsauffassung der zuständigen Verwaltungen bzw. Behörden beziehen sich diese Vorschriften auf alle Rudergänger, d. h. alle Personen die Einfluss auf die Lage des Ruders nehmen können, und nicht nur auf einen Rudergänger. Damit ist der Betrieb der Fernsteuerung nicht einmal dann zulässig, wenn sich die volle Besatzung, einschließlich des verantwortlichen Schiffsführers an Bord im Steuerhaus befindet. Mit §1.28 BinSchStrO wurde nach Projektende die Möglichkeit geschaffen, für Versuchsfahrten auf den Bundeswasserstraßen eine Ausnahmegenehmigung für die Erprobung der Fernsteuerung zu erhalten. Ebenfalls besteht die Möglichkeit für den Rhein eine beschränkte Genehmigung zur Erprobung der Fernsteuerung zu erhalten. Inhaltlich ist die Notwendigkeit einer Genehmigung nicht

nachvollziehbar, wenngleich automatische Systeme, die Einfluss auf das Ruder nehmen, ohne weiteres unter Verantwortung des Schiffsführers betrieben werden können.

Bei der Einführung der Fernsteuerung im produktiven Betrieb ist dann auch eine Anpassung der Regelungen der RheinSchPersV über die Mannschaftsstärke erforderlich, damit perspektivisch nicht benötigtes Bordpersonal eingespart werden kann.

Im ersten Teil der ES-TRIN werden insbesondere Begrifflichkeiten definiert. Da teil- und vollautomatisierte Schiffe ebenso wie ferngesteuerte Schiffe dort nicht aufgeführt sind, besteht der erste Handlungsbedarf darin, diese Begriffe einzuführen und zu definieren. Weiterer Anpassungsbedarf besteht in Teil 2 der ES-TRIN. Dort sollte beispielsweise in Kapitel 5 der Artikel 5.05, Bordhilfsmittel für Probefahrt, um einen Punkt 3) ergänzt werden, damit eine Testung der Notanker-Vorrichtung vom landseitigen Fernbedienstand gefordert wird. In Kapitel 7 sind für die Anforderungen an das Steuerhaus die Artikel 7.01, 7.02, 7.05, 7.08 und 7.12 anzupassen. Diese beinhalten die allgemeinen Anforderungen an das Steuerhaus, die Sicht, Signalleuchten, Licht und Schallzeichen, die interne Sprechverbindung an Bord sowie die Höhenverstellbarkeit des Steuerhauses. Ebenso werden Anpassungen in den Kapiteln 10.19, 11.01, 11.04, 11.05 sowie 13.02 empfohlen. Die genannten Vorschriften beinhalten u. a. die Anforderungen an die Alarm- und Sicherheitssysteme für maschinentechnische Einrichtungen, die Bestimmungen für elektrische Antriebe. Des Weiteren müssten die Sonderbestimmungen für Schiffe, die mit der Mindestbesatzung fahren (Kapitel 31) angepasst werden. Von Bedeutung ist außerdem die Streichung eines Verbots für drahtlose Fernbedienungen sowie die Einbringung einer Lösung für Fahrtensschreiber auf Fernbedienungs-Fahrständen.

In der RheinSchPersV sind, analog zur ES-TRIN, Begriffsbestimmungen zu ergänzen. In Teil 2, Kapitel 2 muss eine Änderung der Mindestbesatzung an Bord erfolgen, die Schiffsführungspersonal am Fernsteuerstand ähnlich berücksichtigt, als wäre dieses an Bord. Der Anpassungsbedarf der Binnenschiff-fahrtsstraßenordnung orientiert sich im Wesentlichen an dem der ES-TRIN und wird daher hier nicht weiter ausgeführt.

Ausweichmanöver in sehr flachem Wasser ($h/T = 1,2$) sind besonders zu beachten. In der ES-TRIN wird ein Ausweichmanöver mit 45° Ruderwinkel und $28^\circ/\text{min}$ Drehrate für Flachwasser empfohlen. Allerdings, die Drehfähigkeit des Schiffs ist beim sehr flachen Wasser stark reduziert, so dass die erforderliche Ziel-Drehrate von $28^\circ/\text{min}$ nicht erreicht werden kann. Eine Anpassung der empfohlenen Ausweichmanöver bei sehr flachem Wasser ist vorzusehen.

20 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt „Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt – FernBin“ wurde ein System zur assistierten Fernsteuerung von Binnenschiffen entwickelt. Das System zeichnet sich dadurch aus, dass neben der Basistechnologie Fernsteuerung, also der Übertragung von Bild, Status und Steuerdaten zwischen einem landseitigen Steuerstand und einem Schiff, auch Assistenzfunktionen entwickelt und implementiert wurden. So wird der fernsteuernde Schiffsführer bei der Entscheidungsfindung unterstützt und es wird bereits ein niedriger Automatisierungsgrad erreicht. Weitergehende Assistenzfunktionen, insbesondere die Kollisionswarnung und automatischen Ausweichen wurden in der Simulation entwickelt, im Schiff aber nicht eingesetzt. Dies lag auch an den durch die Vorschriften bedingten, eingeschränkten Testmöglichkeiten auf der Wasserstraße.

Das System wurde umfangreichen Testfahrten unterzogen und der Öffentlichkeit in mehreren Veranstaltungen vorgestellt. Als Herausforderung für die Nutzbarkeit der Fernsteuerung zeigte sich insbesondere die Verfügbarkeit der Mobilfunkverbindung. Hier müssen Lösungen geschaffen werden, die einen sicheren Zustand des Schiffes auch ohne Schiffsführer auf der Brücke sicherstellen können. Komplementär dazu zeigt es aber auch die Notwendigkeit, die Lücken in der Mobilfunkabdeckung entlang der Wasserstraßen zu schließen.

Erfahrene Schiffsführer benötigen nur eine sehr kurze Einarbeitungszeit, um sich mit der Fernsteuerung vertraut zu machen, und sind dann in der Lage das Schiff sicher zu steuern. Die Schulungsunterlagen für die Fernsteuerung wurden im Projekt erarbeitet. Die Akzeptanz des Systems bei den fernsteuernden Schiffsführern konnte bislang als positiv eingestuft werden, sollte aber auch noch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Offen bleibt auch noch die Frage, ob es mit der Fernsteuerung gelingt, verstärkt Nachwuchs für den Beruf des Binnenschiffers zu gewinnen.

Die Firma Seafar entwickelte in den letzten Jahren ebenfalls ein System zur Fernsteuerung von Schiffen mit dem Ziel, die Fernsteuerung als Dienstleistung anzubieten. Es liegen nur wenige Detailinformationen zu dem System vor. Aus den öffentlich verfügbaren Informationen von Seafar geht hervor, dass hier inzwischen ebenfalls eine nicht näher spezifizierte Form der Automatisierung implementiert ist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass Fernsteuerungslösungen für Schiffe von vielen Seiten als wertvoll angesehen werden und ein gutes Marktpotenzial haben. Allerdings ist die Technologie noch nicht vollständig marktreif. Daraus lässt sich ableiten, dass Forschung und Forschungsförderung zum jetzigen Zeitpunkt ein wichtiger Schritt sind, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Anbieter in einer Branche zu erhöhen, die wirtschaftlich bedeutend ist, aber auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt ist, die Entwicklungen nicht aus eigener Kraft leisten können.

21 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- M. Huang, M. Kosch, J-J, Gehrt, R. Zweigel, D. Abel, "Application of Recent GNC Approaches for Automation in Shipping," abstract in Autonomous Inland & Short Sea Shipping (AISS), 2021
- H. Zhang, X. Xia, M. Nitsch and D. Abel, "Continuous-Time Factor Graph Optimization for Trajectory Smoothness of GNSS/INS Navigation in Temporarily GNSS-Denied Environments," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9115-9122, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3189824.
- M. Huang and D. Abel, "A*-guided Incremental Sampling for Trajectory Planning of Inland Vessels in Narrow Ship Canals," 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Aachen, Germany, 2022, pp. 658-663, doi: 10.1109/IV51971.2022.9827320.
- M. M. Moser, M. Huang and D. Abel, "Model Predictive Control for Safe Path Following in Narrow Inland Waterways for Rudder Steered Inland Vessels*," 2023 European Control Conference (ECC), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/ECC57647.2023.10178205.
- H. Zhang, Z. Wang and H. Vallery, "Learning-based NLOS Detection and Uncertainty Prediction of GNSS Observations with Transformer-Enhanced LSTM Network," 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 2023, pp. 910-917, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10422672.
- H. Zhang, C-C. Chen, H. Vallery and T. D. Barfoot, GNSS/Multi-Sensor Fusion Using Continuous-Time Factor Graph Optimization for Robust Localization, *IEEE Transactions on Robotics*, doi: 10.1109/TRO.2024.3443699
- T. Weber, C. Hürten and D. Schramm, "Concept of a Teleoperation System for Inland Shipping Vessels," 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Macau, China, 2022, pp. 349-354, doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9921862.
- C. Hürten, T. M. Weber, F. Mueller, J. Sutanto, F. E. Kracht and D. Schramm, "Concept of an Alert Management System for Remote-Controlled Inland Shipping Vessels," 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 2023, pp. 5889-5894, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10421954.
- M. Hohn and T. Weber, "Ferngesteuerte Binnenschifffahrt: Konzept und Lösungsansatz im Kontext vernetzter Mobilität," *Mobilität und Transport im Wandel: Strategie und Umsetzung*, vol. 2023, no. 59, pp. 140–151, 2023, doi: 10.17185/uepublico/78102.
- Staab, V., Böhmer, V., Hürten, C., & Liebherr, M. (in press). Die Zukunft der Schifffahrt: Chancen und Herausforderungen der Teleoperation im Hinblick auf das Wohlbefinden von Schiffsführenden. *Hybrides, Ortsflexibles, Multilokales Arbeiten? Wissenschaft im Dialog IV*, Dortmund. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 05.11. – 06.11.2024.
- A. Bejaoui, D. Söffker, (2024). Behavior planning and prediction based on action spaces applied to human-guided vehicle systems. *IEEE Access*, submitted.
- D. Söffker, A. Bejaoui, O. Shyshova, (2024). Progress towards multidimensionally scalable assisted and/or automated ship navigation and control - part II: human in the interaction loop. *Journal of Marine Engineering & Technology*, Taylor & Francis Group, special issue title "Advances on Maritime Autonomous Surface Ships", submitted.

- K. Donandt, D. Söffker, (2024). Incorporating Navigation Context into Inland Vessel Trajectory Prediction: A Gaussian Mixture Model and Transformer Approach. Proc. 27th IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION 2024), Venice, Italy, July, 7-11.
- A. Bejaoui, P. Gadhavi, O. Shyshova, D. Söffker, (2023). Integration of human factors-related knowledge into decision support systems applied to assisted and automated operating vehicles using examples for inland vessels. Proc. European Conference on Safety and Reliability (ESREL), Southampton, United Kingdom.
- A. Bejaoui, D. Söffker, (2023). Situated and sequential planning and prediction of human driving behavior as decision making support system. Proc. 13th Cognitive and Computational Aspects of Situation Management COGSIMA, Philadelphia.
- A. Bejaoui, D. Söffker, (2023). Situated and event discrete decision making support system applied to remotely operated vehicles. Proc. 33rd European Safety and Reliability Conference ESREL, Southampton.
- K. Donandt, K. Böttger, D. Söffker, (2023). Improved context-sensitive transformer model for inland vessel trajectory prediction. Proc. IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, Sep, 24-28, pp. 5903-5908.
- K. Donandt, D. Söffker, (2023). Spatial and social situation-aware transformer-based trajectory prediction of autonomous systems. Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Honolulu, Oahu, HI, USA, Oct, 1-4, pp. 4488-4493.
- A. Bejaoui, W. Boschmann, K. Donandt, O. Shyshova, N. S. Thind, D. Söffker, (2023). Addressing safety and reliability in autonomous inland shipping. Autonomous Inland and Short Sea Shipping Conference (AISS), Duisburg, Germany, Sep, 5-6.
- N. S. Thind, J. Hering, D. Söffker, (2022). Fast and precise generic model for position-based trajectory prediction of vessels. MDPI Automation, No. 4, pp. 633-645.
- Chilcice, O. el Moctar, (2023) "Data-driven system identification of hydrodynamic maneuvering coefficients from free-running tests", Physics of Fluids, 35(5).
- Y. Yang, O. el Moctar, (2022). Effects of Shallow Water on Added Mass. Proceedings of the 6th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Glasgow, Scotland, MASHCON 2022
- Y. Yang, G. Chilcice, O. el Moctar, (2023a) "Mathematical modelling of shallow water effects on ship maneuvering", Applied Ocean Research, 136, 103573.
- Y. Yang, G. Chilcice, O. el Moctar, (2023b) "Shallow water effects on circular motion tests using an efficient and robust approach", Ocean Engineering, 281, 114954.
- Y. Yang, O. el Moctar, (2024). A mathematical model for ships maneuvering in deep and shallow waters. Ocean Engineering 295, 116927.

22 Referenzen

Kürzel	LITERATURREFERENZ
[Abk1964]	ABKOWITZ, M. A.: LECTURES ON SHIP HYDRODYNAMICS – STEERING AND MANEUVERABILITY, HYDRO- OG AERODYNAMISK LABORATORIUM, LYNGBY / DÄNEMARK, REPORT NO. HY-5, 1964
[Gro1997]	GRONARZ, A.: RECHNERISCHE SIMULATION DER SCHIFFSBEWEGUNG BEIM MANÖVRIEREN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER ABHÄNGIGKEIT VON DER WASSERTIEFE, PHD-THESIS, UNIVERSITY OF DUISBURG (IN GERMANY), 1997
[Muc2015]	MUCHA, P., EL MOCTAR, O.: REVISITING MATHEMATICAL MODELS FOR MANOEUVRING PREDICTION BASED ON MODIFIED TAYLOR-SERIES EXPANSIONS., IN: SHIP TECHNOLOGY RESEARCH JOURNAL, 62(2), 2015, S.81–96, 2015
[Obe2016]	OBERHAGEMANN, J.: ON PREDICTION OF WAVE-INDUCED LOADS AND VIBRATION OF SHIP STRUCTURES WITH FINITE VOLUME FLUID DYNAMIC METHODS. PH.D. THESIS. UNIVERSITY OF DUISBURG-ESSEN, DUISBURG, GERMANY. HTTPS://DUEPUBLICO2.UNI-DUE.DE/RECEIVE/DUEPUBLICO_MODS_00043219 , 2016
[Wol1981]	WOLFF, K.: ERMITTLUNG DER MANÖVRIEREIGENSCHAFTEN FÜNF REPRÄSENTATIVER SCHIFFSTYPEN MIT HILFE VON CPMC-MODELLVERSUCHEN, INSTITUT FÜR SCHIFFBAU, HAMBURG, BERICHT NR. 412, 1981
[Fri2019]	FRIEDHOFF B., HOYER K., LIST S., AND TENZER M.: INVESTIGATION OF THE NOMINAL AND EFFECTIVE PROPELLER INFLOW FOR A FAMILY OF INLAND WATERWAY VESSELS. OCEAN ENGINEERING, 187:106180, 2019
[El2022]	EL MOCTAR, O., LANTERMANN, U., CHILLCCE, G. (2022). AN EFFICIENT AND ACCURATE APPROACH FOR ZERO-FREQUENCY ADDED MASS FOR MANEUVERING SIMULATIONS IN DEEP AND SHALLOW WATER. APPLIED OCEAN RESEARCH, VOL. 126, HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.APOR.2022.103259
[Ast2020]	EUROCONTROL: <i>All-purpose structured Eurocontrol surveillance information exchange (ASTERIX)</i> , 2024, https://www.eurocontrol.int/asterix
[GTA2022]	<i>GeoJSON Track Attribute Schnittstellenbeschreibung</i> , in -innovative navigation GmbH, 2022
[IEC61162]	INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: <i>IEC 61162-1 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 1: Single talker and multiple listeners</i> , 2010
[IEC61174]	INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: <i>IEC 61174:2015 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Electronic chart display and information system (ECDIS)</i> , 2015
[ITU1371]	INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION: <i>Rec. ITU-R M.1371 - Technical characteristics for an automatic identification system (AIS) using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band</i> , 2014
[inDTS-UM]	<i>inDTS Operator Manual</i> , in - innovative navigation GmbH, 2024
[inOMD-API]	<i>inOMD REST API</i> , in - innovative navigation GmbH, 2024
[inTAS-TM]	<i>inTAS Technical Manual</i> , in - innovative navigation GmbH, 2024
[inVNE-UM]	<i>inVNE Benutzerhandbuch</i> , in - innovative navigation GmbH, 2024

- [RFC7946] INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF): *RFC 7946 – The GeoJSON Format*, 2016, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7946>
- [RTZ2022] COMITÉ INTERNATIONAL RADIO-MARITIME (CIRM): *Route plan exchange format (RTZ)*, 2022, <https://www.cirm.org/rtz/>
- [Til2015] TILKOV, S. ET AL.: *REST und http, Entwicklung und Integration nach dem Architekturstil des Web*, 3. Auflage, dpunkt.verlag, Heidelberg, 2015
- [ARG1] SCHIEKOEFER, RAINER, ANDREAS SCHOLZ, AND MICHAEL WEYRICH. "REST BASED OPC UA FOR THE IIOT." 2018 IEEE 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION (ETFA). VOL. 1. IEEE, 2018.
- [ARG2] GRÜNER, STEN, JULIUS PFROMMER, AND FLORIAN PALM. "RESTFUL INDUSTRIAL COMMUNICATION WITH OPC UA." IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS 12.5 (2016): 1832-1841.
- [ARG3] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG:
[HTTPS://OPCCCONNECT.OPCFFOUNDATION.ORG/2015/12/WHY-SEMANTICS-MATTER/](https://opccconnect.opcfoundation.org/2015/12/why-semantic-matter/)
- [ARG4] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG:
[HTTPS://WWW.OPC-ROUTER.DE/WAS-IST-OPC-UA/](https://www.opc-router.de/was-ist-opc-ua/)
- [ARG5] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG:
[HTTPS://COPPERHILLTECH.COM/BLOG/SAE-J1939-BANDWIDTH-BUSLOAD-AND-MESSAGE-FRAME- FREQUENCY/](https://copperhilltech.com/blog/sae-j1939-bandwidth-busload-and-message-frame-frequency/)
- [ARG6] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG: [HTTPS://WWW.MANUFACTURINGTOMORROW.COM/ARTICLE/2016/05/5-REAL-TIME-ETHERNET-BASED- FIELDBUSES-COMPARED/8044/](https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2016/05/5-real-time-ethernet-based-fieldbuses-compared/8044/)
- [ARG7] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG: [HTTPS://WWW.FELDBUSSE.DE/VERGLEICH/UEBERSICHT_FELDBUSSE.SHTML](https://www.feldbusse.de/vergleich/uebersicht_feldbusse.shtml)
- [ARG8] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG:
[HTTPS://WWW.VECTOR.COM/DE/DE/KNOW-HOW/TECHNOLOGIEN/PROTOKOLLE/SAE-J1939/#C103384](https://www.vector.com/de/de/know-how/technologien/protokolle/sae-j1939/#c103384)
- [ARG9] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG: [HTTPS://WWW.HELIOS.DE/WEB/DE/PRODUKTE/LANTEST.HTML](https://www.helios.de/web/de/produkte/lan-test.html) (AUFGERUFEN AM 14.5.2021)
- [ARG10] INTERNETVERÖFFENTLICHUNG:
[HTTPS://WWW.BOOST.ORG/DOC/LIBS/1_76_0/LIBS/GRAPH/DOC/DIJKSTRA_SHORTEST_PATHS.HTML](https://www.boost.org/doc/libs/1_76_0/libs/graph/doc/dijkstra_shortest_paths.html)
- [RWTH1] M. Nitsch, J.-J. Gehrt, R. Zweigel und D. Abel (2021): „Tightly Coupled INS/GNSS Navigation Filter for the Automation of a River Ferry“. In: Proceedings of the 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS).
- [RWTH2] S. Liu, J.-J. Gehrt, D. Abel, R. Zweigel, "Dual-Constellation Aided High Integrity and High Accuracy Navigation Filter for Maritime Applications," Proceedings of the 2019 International Technical Meeting of The Institute of

- Navigation, Reston, Virginia, January 2019, pp. 762-774.
<https://doi.org/10.33012/2019.16723>
- [RWTH3] J. -B. LACAMBRE, M. NAROZNY AND J. -M. LOUGE: "LIMITATIONS OF THE UNSCENTED KALMAN FILTER FOR THE ATTITUDE DETERMINATION ON AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM," 2013 IEEE DIGITAL SIGNAL PROCESSING AND SIGNAL PROCESSING EDUCATION MEETING (DSP/SPE), NAPA, CA, USA, 2013, pp. 187-192, DOI: 10.1109/DSP-SPE.2013.6642588.
- [RWTH4] M. A. ABKOWITZ, "LECTURES ON SHIP HYDRODYNAMICS—STEERING AND MANOEUVRABILITY," TECH. REP., 1964
- [RWTH5] C. WILT, W. RUMML, "WHEN DOES WEIGHTED A* FAIL?", PROCEEDINGS OF THE 5TH ANNUAL SYMPOSIUM ON COMBINATORIAL SEARCH, SOCS 2012, 2012, pp. 137-144. DOI: 10.1609/socs.v3i1.18250.
- [RWTH-IRT1] H. ZHANG, X. XIA, M. NITSCH AND D. ABEL, "CONTINUOUS-TIME FACTOR GRAPH OPTIMIZATION FOR TRAJECTORY SMOOTHNESS OF GNSS/INS NAVIGATION IN TEMPORARILY GNSS-DENIED ENVIRONMENTS," IN IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, VOL. 7, NO. 4, pp. 9115-9122, OCT. 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3189824.
- [RWTH-IRT2] M. HUANG AND D. ABEL, "A*-GUIDED INCREMENTAL SAMPLING FOR TRAJECTORY PLANNING OF INLAND VESSELS IN NARROW SHIP CANALS," 2022 IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM (IV), AACHEN, GERMANY, 2022, pp. 658-663, DOI: 10.1109/IV51971.2022.9827320.
- [RWTH-IRT3] H. ZHANG, Z. WANG AND H. VALLERY, "LEARNING-BASED NLOS DETECTION AND UNCERTAINTY PREDICTION OF GNSS OBSERVATIONS WITH TRANSFORMER-ENHANCED LSTM NETWORK," 2023 IEEE 26TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC), BILBAO, SPAIN, 2023, pp. 910-917, DOI: 10.1109/ITSC57777.2023.10422672.
- [Bej2022a] A. Bejaoui and D. Söffker, "Supervision concept for situated human driving applied to inland shipping," *IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2022, DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922228.
- [Bej2023] A. Bejaoui und D. Söffker, „Situated and event discrete decision making support system applied to remotely operated vehicles,“ Southampton, United Kingdom, 33rd European Safety and Reliability Conference, 2023, DOI: 10.3850/978-981-18-8071-1_P257-cd.
- [Li2017] H. Li, J. Liu und L. Wen, „Dynamic Speed Control Model for Very Large ship in Restricted Waters,“ *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2017, ISBN: 978-1-880653-97-5.
- [Abr2011] U. Abromeit, D. Alberts, W. Bartnik, U. Fischer, P. Fleischer, M. Führer, C. Gesing, M. Heibaum, T. Holfelder, J. Kayser, G. Knappe, H.-J. Köhler, A. Liebrecht, W. Reiner, D. Schmidt-Vöcks, H. Schulz, B. Schuppener, B. Söhngen und R. Soyeaux, „Principles for the Design of Bank and Bottom Protection,“ Bundesanstalt für Wasserbau, 2011, pp. 35-43.
- [He2020] C. He und D. Söffker, „Establishing a modified CREAM approach for reliability evaluation,“ Rome, Italy,, IEEE International Conference on Human-

- Machine Systems (ICHMS), 2020, DOI: 10.1109/ICHMS49158.2020.9209509.
- [Bej2024] A. Bejaoui und D. Söffker, „Behavior planning and prediction based on action spaces applied to human-guided vehicle systems,“ *IEEE Intelligent vehicles Symposium, submitted*, 2024.
- [Bej2022b] A. Bejaoui, C. He und D. Söffker, „Novel model-based decision support system for reliable human machine systems in complex situations,“ *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society (PHM)*, 2022, DOI: 10.36001/phmconf.2022.v14i1.3167.
- [DVWK1991] DVWK. (1991). *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern*.
- [ODGA1989] Odgaard, A. (1989). *River-meander model - I: Development, II: Applications*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 11, pp. 1433 - 1464.
- [WILS2002] Wilson, C., Hervouet, J.-M., & Bates, P. (1. February 2002). Comparison of turbulence models for stage-discharge rating curve prediction in reach-scale compound channel flows using two-dimensional finite element methods. *Journal of Hydrology*, Volume 257, Issues 1–4, S. 42-58. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00553-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00553-4)
- [ALAH2016] Alahi, A., Goel, K., Ramanathan, V., Robicquet, A., Fei-Fei, L., & Savarese, S. (2016). Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces. In *29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: Cvpr 2016 : Proceedings : 26 June-1 July 2016, Las Vegas, Nevada* (pp. 961–971). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.110>
- [BAW2017] BAW. (2017). *Kalibrierung des 2D-HN Modells zwischen Bonn und Emmerich (Rh-km 654,4 – 852,0)*.
- [BAW2019] BAW. (2019). *Abladeoptimierung Mittelrhein - Projektphase „Vertiefte Voruntersuchung“. Flussbauliche Untersuchungen im Rahmen des Teilprojekts "Obere Gebirgsstrecke 1" (Rhein-km 528,8-547,5). Engpässe Lorcher Werth und Bacharacher Werth. Teilbericht 2*.
- [BAW2021A] BAW. (2021a). *Aufbau eines 2D-HN Modells von Sankt Goar bis Andernach*.
- [BAW2021B] BAW. (2021b). *Machbarkeitsstudie zur Redynamisierung der Rastatter Rheinaue – Betrachtung der Auswirkungen auf die Bundeswasserstraße Rhein*.
- [BÖTT2024] Böttger, K. (2024). *INSEL - Inland Navigation Service Library: Infrastruktur- und Verkehrsdaten für die Binnenschifffahrt*. BAW. insel.baw.de
- [BUBB2015] Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., Vollrath, M. (2015). *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Lipp2002] Lippert, C. (2002). *Preprocessor Janet: Benutzerhandbuch zur Janet-Version 1.5*. smile consult GmbH.
- [DIJT2020] Dijt, Pim and Mettes, Pascal (2020). Trajectory Prediction Network for Future Anticipation of Ships. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR '20)*, Dublin, Ireland.
- [DONA2022] Donandt, K., Böttger, K., & Söffker, D. (2022). Short-term Inland Vessel Trajectory Prediction with Encoder-Decoder Models. In *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Macau, China.

- [DONA2023] Donandt, K., Böttger, K., & Söffker, D. (2023). Improved context-sensitive transformer model for inland vessel trajectory prediction. In *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE ITSC 2023)*, Bilbao, Spain.
- [DONA2023] Donandt, K., & Söffker, D. (2023). Spatial and social situation-aware transformer-based trajectory prediction of autonomous systems. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2023)*, Oahu, Hawaii, USA.
- [DONG1982] Donges, E. (1982) *Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. In: *Automobil-Industrie* 27 (2), S. 183–190
- [GAL2016] Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian Approximation: Representing Model Uncertainty in Deep Learning. In *ICML '16, Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning - Volume 48* (pp. 1050–1059). JMLR.org.
- [LANG2024] Lang, G., Beck, T., (2024). *AIS-Portal: Schifffahrtsstatistiken im Binnen- und Seebereich*. BAW. ais-portal.baw.de
- [HERV2007] Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470319628>
- [HUAN2022] Huang, Z., Li, R., Shin, K., & Driggs-Campbell, K. (2022). Learning Sparse Interaction Graphs of Partially Detected Pedestrians for Trajectory Prediction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 1198–1205.
<https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3138547>
- [IBS2015] IB Schmid. (2015). *Bericht zu den Geschwindigkeitsmessungen auf dem Mittelrhein: Strömungsmessungen im Fahrwasserbereich der Berufsschiffahrt Rhein-km 557 bis Rhein-km 639*. Messungen vom 12.05.2015 bis 17.05.2015.
- [IBS2020] IB Schmid. (2020). *Bericht zu den hydraulischen Untersuchungen auf dem Rhein im Bereich der Moselmündung bei Wasserständen nahe GIW*.
- [IBS2021] IB Schmid. (2021). *Bericht zu den hydraulischen Untersuchungen auf dem Rhein im Bereich der Moselmündung bei einem Wasserstand MW + 1 m*.
- [JANG2017] Jang, E., Gu, S., & Poole, B. (2017). Categorical Reparametrization with Gumbel-Softmax. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, Toulon, France. <https://openreview.net/pdf?id=rkE3y85ee>
- [KARM2021] Karminke, R. (2004). *Rhein-Radar-Atlas: Der Rhein von km 150 (Rheinfelden) bis km 1033 (Hoek von Holland)* (4. Aufl.). Atlas Schifffahrt & Verlag GmbH.
- [KOCH2021] Koch, T., Gläser, D., Weishaupt, K., Ackermann, S., Beck, M., Becker, B., Burbulla, S., Class, H., Coltman, E., Emmert, S., Fetzer, T., Grüninger, C., Heck, K., Hommel, J., Kurz, T., Lipp, M., Mohammadi, F., Scherrer, S., Schneider, M., . . . Flemisch, B. (2021). DuMux 3 – an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling. *Computers & Mathematics with Applications*, 81, 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.02.012>
- [LORE2014] Lorenz, L. M. (2014). *Entwicklung und Bewertung aufmerksamkeitslenker der Warn- und Informationskonzepte für Fahrerassistenzsysteme*.

- Dissertation, Technische Universität München, <https://media-tum.ub.tum.de/1160623>
- [MESS2021] Messaoud, K., Deo, N., Trivedi, M. M., & Nashashibi, F. (2021). Trajectory Prediction for Autonomous Driving based on Multi-Head Attention with Joint Agent-Map Representation. In *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 165–170). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IV48863.2021.9576054>
- [NGUY2018] Nguyen, D., Vadaine, R., Hajdich, G., Garelo, R., & Fablet, R. (2018). A Multi-task Deep Learning Architecture for Maritime Surveillance using AIS Data Streams. In *IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, Turin, Italy.
- [PEGE2023] Pegelonline der WSV. (2023). *PEGELONLINE Webservices*. <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/pegeltabelle?scrollTop=0&gewasserFilter=5&pegelnameFilter=-&pegelnummerFilter=-¶meterFilter=3>
- [RHED2017] Rhede, J. G. (2017). *Konzeption und Evaluation einer hochintegrierten Anzeige für Fahrassistenzsysteme im Pkw in einer handlungsorientierten Warnstrategie*. Dissertation, Technische Universität Berlin,
<https://doi.org/10.14279/depositonce-5725>
- [SEKH2020] Sekhon, J., & Fleming, C. (2020). A Spatially and Temporally Attentive Joint Trajectory Prediction Framework for Modeling Vessel Intent. In *Conference on Learning for Dynamics and Control (PMLR)*, online.
- [SRIV2014] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 15(56), 1929–1958.
<http://jmlr.org/papers/v15/srivastava14a.html>
- [TELE2023] Telemac-Mascaret. (2023). *Telemac-2D - Two-dimensional hydrodynamic*. <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/17-telemac-2d-presentation>
- [VASW2017] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is All you Need. In *Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, Long Beach, CA, USA.
- [WIKI2023] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. (Ed.). (2023). *Kilometrierung*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=237165555>
- [WSV2016] WSV. (2016). *Erfolgskontrolle Rhein am gesamten frei fließenden Strom: Statusbericht 2015*.
- [WSV2021] WSV. (2021). *VV-WSV 26 01: Geodätische Grundlagen und Ordnungssysteme*. BMDV.

23 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
2DHN	2D-hydrummerisches Modell
ACL	Access Control List (Zugriffskontrolle in Netzwerken)
ADCP	Strömungssensor (aqua doppler current profiler)
AIS	Automatisches Identifikationssystem (System zum Austausch von digitalen Schiffsdaten und –positionen per Funk)
AP	Arbeitspaket
ASTERIX	All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information eXchange (standardisiertes Protokoll für den Austausch von Verkehrsüberwachungsdaten)
BAM	Bridge Alert Management
DST	Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme Duisburg
DTS/inDTS	Display for Traffic Systems (VTS-Anzeigesystem)
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System (Standard für digitale Seekarten)
ENC	Electronic Nautical Chart (Elektronische/Digitale Seekarte)
ETA	Expected Time of Arrival
ETD	Expected Time of Departure
GMS	Großmotorgüterschiff (Binnenschiffstyp)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HMI	Human Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IMO	International Maritime Organization
IN	in – innovative navigation GmbH
ITU	International Telecommunication Union
JSON	JavaScript Object Notation (Datenformat für strukturierte Daten)
MST/inMST	Multisensor-Tracker (IN Systemtracker)
NAS	Network Attached Storage
OMD/inOMD	Object Management and Distribution (IN Datenbank)
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture (Standard für den Datenaustausch)
REST	Representational State Transfer (Software-Paradigma)
RTSP	Real-Time Transport Protocol (Netzwerk-Übertragungsprotokoll)
RTZ	Route Plan Exchange (Austauschformat für Fahrrouten)
SBKR	Schifferberufskolleg Rhein
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SUS	System Usability Scale (Bewertungsskala für Bediensysteme)
TAS	Traffic Analysis System (IN Verkehrsanalyzesystem)
UDE	Universität Duisburg-Essen
VeLABi	Versuchs- und Leitungszentrum Autonome Binnenschiffe (am DST)
VLAN	Virtual Local Area Network
VNE/inVNE	Virtual Navigation Environment (IN VTS-Simulator)

VPN	Virtual Private Network
VTs	Vessel Traffic Services
WGS 84	World Geodetic System 1984
XML	Extensible Markup Language (Erweiterbare Auszeichnungssprache)

24 Anhang

24.1.1 Messprotokoll der Position der Sensoren

- Anlage 05 Schiffskoord_Ernst Kramer_Draufsicht
- Anlage 06 Schiffskoord_Ernst Kramer_Seitenansicht
- Anlage 07 KVZ_Ernst-Kramer
- Anlage 08 Fotodoku Ernst-Kramer
- Anlage 09 Warnstrategie

24.1.2 Fernsteuercheckliste

24.1.3 Ernst Kramer

Aktionen

1. Radar einschalten
2. Hauptmaschine einschalten
 - 2.1 Leerlauf
 - 2.2 Vorwärts einkuppeln
 - 2.3 Rückwärts einkuppeln
 - 2.4 Auskuppeln
3. Ruder legen
 - 3.1 30° Steuerbord
 - 3.2 10° Steuerbord
 - 3.3 10° Backbord
 - 3.4 30° Backbord
 - 3.5 0°
4. Bugstrahlruder einschalten
 - 4.1 Bugstrahlruder 90° Steuerbord drehen
 - 4.2 Bugstrahlruder 90° Backbord drehen
 - 4.3 Bugstrahlruder auf 0° drehen
 - 4.4 Bugstrahlruder Schub geben
 - 4.5 Bugstrahlruder in Leerlauf schalten
5. Blaue Tafel
 - 5.1 Ausklappen
 - 5.2 Einklappen
6. Übergabe vorbereiten

Prüfen

- Wird das Radarbild am Steuerstand angezeigt?
- Leerlaufdrehzahl am Steuerstand sichtbar?
Drehzahl für vorwärts am Steuerstand sichtbar?
Drehzahl für rückwärts am Steuerstand sichtbar?
Leerlaufdrehzahl am Steuerstand sichtbar?
- Werden 30° Steuerbord am Steuerstand angezeigt?
Werden 10° Steuerbord am Steuerstand angezeigt?
Werden 10° Backbord am Steuerstand angezeigt?
Werden 30° Backbord am Steuerstand angezeigt?
Wird 0° am Steuerstand angezeigt?
- Werden 90° Steuerbord am Steuerstand angezeigt?
Werden 90° Backbord am Steuerstand angezeigt?
Wird 0° am Steuerstand angezeigt?
Wird der Schub am Steuerstand angezeigt?
Wird Leerlauf am Steuerstand angezeigt?
- Wird die blaue Tafel korrekt am Steuerstand angezeigt?
Wird die blaue Tafel korrekt am Steuerstand angezeigt?
Kann der Steuerstand übernehmen?

24.1.4 Steuerstand

Aktionen

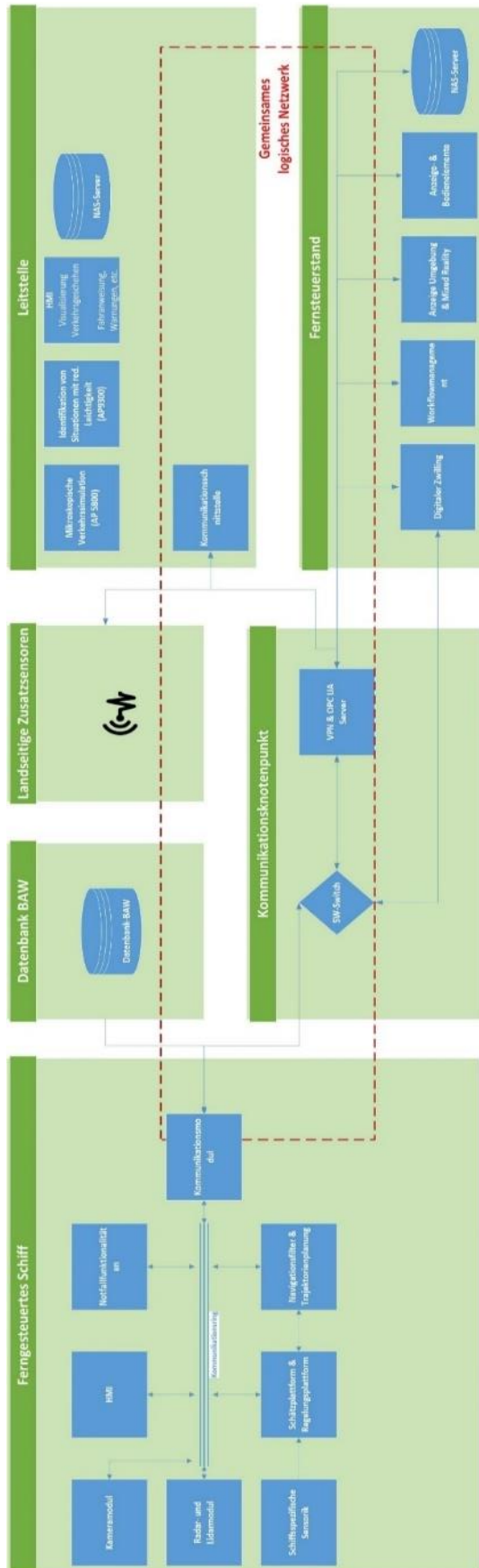
1. Übernehmen
2. Hauptmaschine
 - 2.1 Vorwärts einkuppeln
 - 2.2 Rückwärts einkuppeln
 - 2.3 Auskuppeln
3. Ruder legen
 - 3.1 30° Steuerbord
 - 3.2 10° Steuerbord
 - 3.3 10° Backbord
 - 3.4 30° Backbord
 - 3.5 0°
4. Bugstrahlruder
 - 4.1 Bugstrahlruder ausschalten
 - 4.2 Bugstrahlruder einschalten
 - 4.3 Bugstrahlruder 90° Steuerbord drehen
 - 4.4 Bugstrahlruder 90° Backbord drehen
 - 4.5 Bugstrahlruder auf 0° drehen
 - 4.6 Bugstrahlruder Schub geben
 - 4.7 Bugstrahlruder in Leerlauf schalten
5. Blaue Tafel
 - 5.1 Ausklappen
 - 5.2 Einklappen

Prüfen

- Übernahme erfolgreich?
- Drehzahl für vorwärts am Steuerstand sichtbar?
Wie ist die Drehzahl auf dem Schiff?
- Drehzahl für rückwärts am Steuerstand sichtbar?
Wie ist die Drehzahl auf dem Schiff?
- Leerlaufdrehzahl am Steuerstand sichtbar? Wie ist die Drehzahl auf dem Schiff?
- Werden 30° Steuerbord auf dem Schiff angezeigt?
- Werden 10° Steuerbord auf dem Schiff angezeigt?
- Werden 10° Backbord auf dem Schiff angezeigt?
- Werden 30° Backbord auf dem Schiff angezeigt?
- Wird 0° auf dem Schiff angezeigt?
- Bugstrahlruder ausgeschaltet?
- Bugstrahlruder eingeschaltet?
- Werden 90° Steuerbord auf dem Schiff angezeigt?
- Werden 90° Backbord auf dem Schiff angezeigt?
- Wird 0° am Steuerstand angezeigt?
- Wird der Schub auf dem Schiff angezeigt?
- Wird Leerlauf auf dem Schiff angezeigt?
- Wird die blaue Tafel ausgeklappt?
- Wird die blaue Tafel eingeklappt?

24.1.5 Systemstruktur

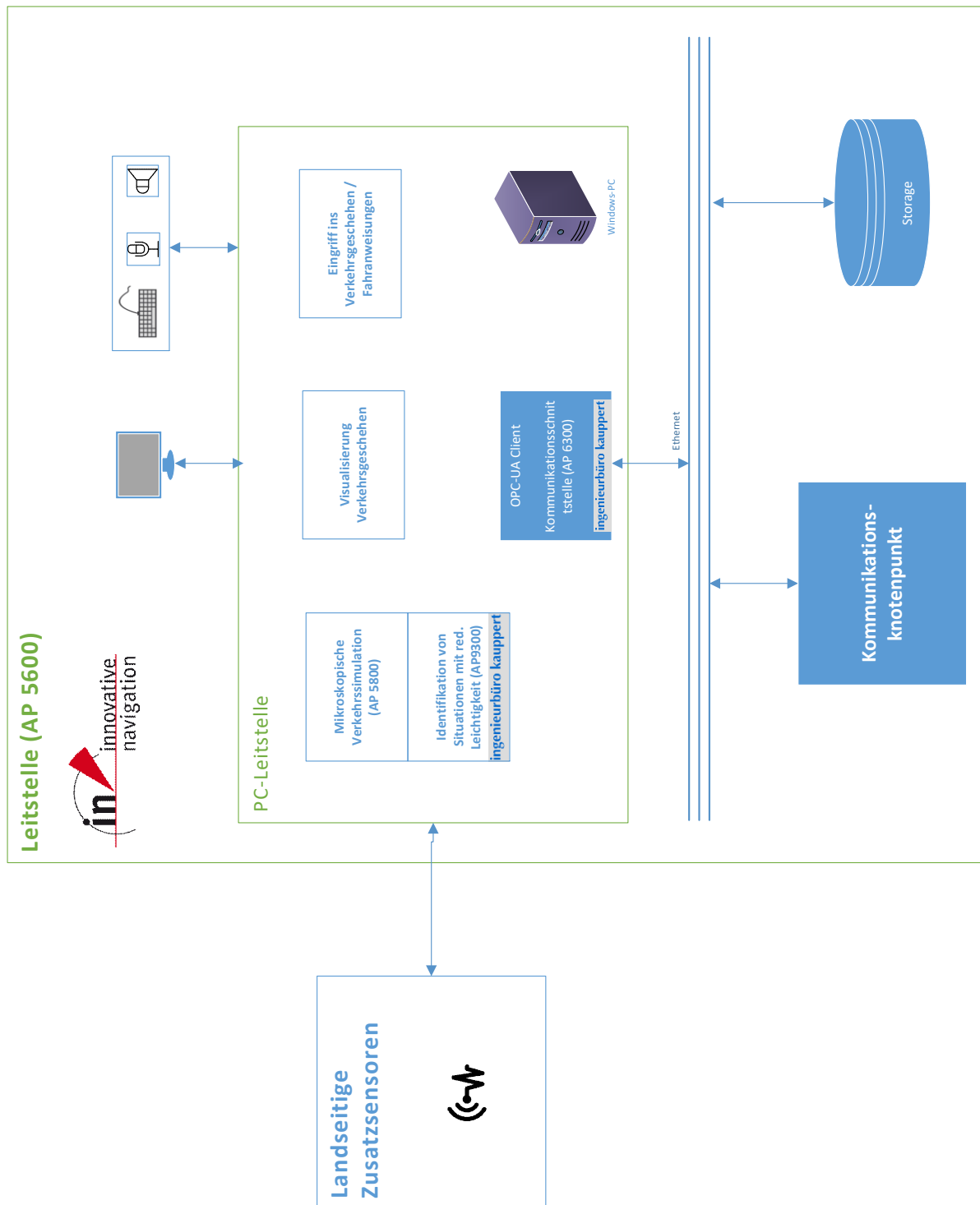
24.1.5.1 Gesamtstruktur



256



24.1.5.3 Leitstelle



24.1.5.4 Schiff

