



**Identifikation von Beinahekollisionen in maritimen
Verkehrsdaten als Ground-Truth für szenariobasiertes
Testen**

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades
und Titels eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

von Herrn Arne Lamm

geboren am 16. August 1992 in Delmenhorst

GutachterInnen

Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Prof. Dr. Daniela Nicklas

Tag der Disputation

31. Mai 2023

Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Axel Hahn. Du gabst den Anstoß für meine wissenschaftliche Laufbahn, die ich ohne deine Begeisterung für das Thema wohl nie in Erwägung gezogen hätte und eröffnetest mir hierdurch eine neue Welt. Danke für deine Unterstützung und deinen Glauben an mich, der mich von der Universität Oldenburg über das OFFIS e.V. bis zum DLR e.V. geführt hat. Die unzähligen ermutigenden und fachlichen Gespräche halfen mir, trotz Krisen, immer wieder auf Kurs und halfen zur Anfertigung dieser Arbeit.

Ich danke Daniela Nicklas für die Bereitschaft zur zweiten Begutachtung dieser Arbeit. Der Austausch, vor allem in den letzten Zügen, gab nochmal die Impulse und Denkanstöße, die ich gebraucht habe, um der Arbeit den letzten Schliff zu verleihen.

Ebenso möchte ich den weiteren Mitgliedern meiner Prüfungskommission, Wolfram Wingerath für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und Marco Grawunder für sein Einbringen als Mitglied der Prüfungskommission danken.

Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Systemanalyse und -optimierung (Universität Oldenburg) und der Gruppe Kooperierende Mobile Systeme (OFFIS e.V.) für die unzähligen Gespräche und Kaffeepausen und die hier entstandenen kritischen Fragen und fachlichen Anmerkungen zu meiner Arbeit, die es gebraucht hat, um das Ergebnis in die richtige Richtung zu lenken. Ohne den Blick von außen, würde es diese Arbeit in dieser Form wohl nicht geben.

Ich danke euch: Malte, Britta, Ingo, Leo, Michi, Maren, Simone und Jens, dass ihr mich so nehmt wie ich bin und ich bei euch auch mal die Arbeit vergessen konnte.

Ich danke meinen Eltern Martina und Birger dafür, dass Sie mich auf meinem Lebensweg stets ermutigt, bestärkt und unterstützt haben. Ohne den bedingungslosen Rückhalt eurerseits hätte ich nie der Mensch werden können, der ich heute bin.

Der größte Dank gebührt meiner Frau Jana, die mein Leid, mein Fluchen und meine geistige Abwesenheit während der Anfertigung dieser Arbeit ertragen musste, mir dennoch den Rücken gestärkt und freigehalten hat, sodass diese Arbeit überhaupt entstehen konnte. Ich danke dir, dass du deine Träume aufgegeben hast, damit ich meinen verwirklichen konnte.

Und zum Schluss meiner wundervollen Tochter Alva. Mit deiner Geburt habe ich gelernt, dass es größere Dinge im Leben gibt. Deine Ankündigung gab den letzten Anstoß für die Finalisierung dieser Arbeit. Dein Papa liebt dich sehr. Sei dir meines Rückhalts auf deinem Lebensweg stets gewiss!

Zusammenfassung

Die Evaluation von hochautomatisierten Fahrfunktionen lässt sich aufgrund der steigenden Komplexität mit herkömmlichen Werkzeugen und Methoden nicht mehr bewältigen. Die Funktionsgrenzen können daher nicht mehr exakt bestimmt, sondern mit Szenarien lediglich systematisch abgetastet werden. Hierfür werden durch Verfahren der geführten Simulation gezielt relevante Szenarien generiert, um mit diesen ein mögliches Fehlverhalten des zu testenden Systems zu provozieren. Ob ein System auch die in der Realität auftretenden Konfliktsituationen bewältigen kann, muss durch die Verwendung von realen Verkehrssituationen in der Simulation oder dem Einsatz des Systems in der Realität gezeigt werden. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Unfalldatenbanken aus der Unfallforschung. Da Unfälle stetig seltener auftreten, wird verstärkt auf Vorfälle, also sicherheitsgefährdende Situationen, für den Erkenntnisgewinn zurückgegriffen. Die Gefährdungsbeurteilung erfolgt aktuell jedoch durch die subjektive Einschätzung und Erfahrung von Fachleuten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Forschungsfrage untersucht, wie sich validierungsrelevante Beinahekollisionssituationen aus historischen Verkehrsdaten detektieren und als Ground Truth nutzen lassen. Hierfür werden zunächst aus den Grundlagen die Anforderungen an die Datenbeschaffung, Datenanalyse und das Verfahren zur objektiven Detektion von Beinahekollisionen erhoben und gegen den Stand der Forschung und Technik geprüft. Gemäß dem datenwissenschaftlichen Prozess folgt eine Systemarchitektur, die eine kontinuierliche Verkehrsbeobachtung und die Speicherung und Untersuchung dieser erfassten Verkehrssituationen erlaubt. Zur Bestimmung von Beinahekollisionen werden zunächst die relevanten Einflussfaktoren hergeleitet und es folgt, gemäß der Definition, die Entwicklung mehrerer Methoden und Werkzeuge zur Identifikation von fahrerreaktionsbasierten, funktionsreaktionsbasierten, kontextbasierten und historienbasierten Auffälligkeiten. Als Vorbereitung auf die Evaluation schließt sich die Implementierung und Integration der Systemartefakte in das maritime Testfeld eMIR an.

Die Evaluation erfolgt anhand der prototypischen Umsetzungen, indem zunächst die einzelnen Artefakte separat für sich und abschließend als Gesamtsystem überprüft werden. Insgesamt kann durch die Implementierung und Evaluation die Erfüllung der Anforderungen und der Nutzen einer Beinahekollisionsdatenbank im Sinne der Wertschöpfung, gezeigt werden.

Abstract

Due to the increasing complexity, the evaluation of highly automated driving functions can no longer be managed with conventional tools and methods. The functional limits can therefore no longer be determined exactly, but can only be systematically tested with scenarios. For this purpose, guided simulation methods are used to generate specific relevant scenarios in order to provoke a possible misbehavior of the system under test. Whether a system is also able to cope with conflict situations occurring in reality must be demonstrated by using real traffic situations in the simulation or by using the system in reality. One possibility is the use of accident databases from accident research. Since accidents are occurring less and less frequently, more use is being made of incidents, i.e. situations that pose a risk to safety, to gain knowledge. However, the risk assessment is currently based on the subjective assessment and experience of experts.

In the context of this thesis, the research question is therefore investigated how validation-relevant near-collision situations can be detected from historical traffic data and used as ground truth. For this purpose, the requirements for data acquisition, data analysis and the procedure for objective detection of near-collisions are first collected from the basics and checked against the state of the art. According to the data science process, a system architecture follows that allows continuous traffic observation and the storage and investigation of these detected traffic situations. For the determination of near-collisions, first the relevant influencing factors are derived and, according to the definition, the development of several methods and tools for the identification of driver reaction-based, function reaction-based, context-based and history-based conspicuities follows. In preparation for the evaluation, the implementation and integration of the system artifacts into the maritime testbed eMIR follows.

The evaluation is carried out on the basis of the prototypical implementations by first checking the individual artifacts separately and finally as an overall system. In summary, the implementation and evaluation can demonstrate the fulfillment of the requirements and the benefits of a near-collision database in terms of value creation.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Unfall- und Testfalldatenbanken zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen.....	3
1.2.	Herausforderungen.....	4
1.3.	Zieldefinition und Beitrag.....	10
1.4.	Aufbau der Arbeit.....	15
2.	Datenbanken als Werkzeug in der Unfallforschung.....	17
2.1.	Angewandte Unfalluntersuchungsmethoden.....	17
2.2.	Unfallverhütung in der Seeschifffahrt.....	23
2.2.1.	Maritime Regularien zur Vermeidung von Unfällen.....	23
2.2.2.	Ship Domain als Forschungsansatz zur Unfallvermeidung.....	26
2.3.	Maritime Infrastruktur.....	34
2.4.	Moving Objects in Databases.....	41
2.4.1.	Geodaten schemata.....	43
2.4.2.	Spatial Data Warehouse.....	45
3.	Stand der Forschung und Technik.....	49
3.1.	Anforderungserhebung.....	49
3.1.1.	Anforderungen and das Datenmanagement.....	51
3.1.2.	Anforderungen an die Detektion von Beinahekollisionen.....	54
3.1.3.	Anforderungen an die Bereitstellung von Beinahekollisionen in einem Testfeld.....	57
3.2.	Verwandte Arbeiten zur Detektion von Beinahekollisionen.....	58
3.2.1.	Domänenspezifische verwandte Arbeiten.....	59
3.2.2.	Domänenübergreifende verwandte Arbeiten.....	70
3.2.3.	Reflexion der verwandten Arbeiten und Handlungsbedarf.....	72
4.	Konzept zum Aufbau einer Beinahekollisionsdatenbank.....	75
4.1.	Gesamtarchitektur.....	76
4.2.	Datenbeschaffung.....	79
4.3.	Datenhaltung.....	83
4.3.1.	Spatial Data Warehouse.....	84
4.3.2.	Vorverarbeitung.....	88
4.4.	Analyse von Verkehrssituationen.....	92

4.4.1.	Herleitung der Einflussfaktoren	93
4.4.2.	Bewertung von Begegnungssituationen	98
4.4.3.	Kontextbetrachtung	107
4.4.4.	Bestimmung von Fahrerreaktionen und Unsicherheiten.....	113
4.4.5.	Berücksichtigung der Kollisionsverhütungsregeln.....	118
4.5.	Zusammenfassung und Anforderungserfüllung.....	123
5.	DaWINCSi - Data Warehouse for Incidents and Near Collision Situations.....	125
5.1.	Sensor Data Distribution Node	127
5.2.	Traffic Data Warehouse.....	130
5.3.	Near Collision Detection.....	134
5.4.	Zusammenfassung und Anforderungserfüllung.....	136
6.	Evaluation.....	139
6.1.	Begegnungen klassifizieren mit Wahrscheinlichkeiten und Ähnlichkeitsanalyse.....	139
6.2.	Risikobewertung unter Berücksichtigung von Kontextinformationen.....	141
6.3.	Fahrerreaktionen und Unsicherheiten erkennen mittels Manövernetz.....	143
6.3.1.	Evaluation der Manövererkennung mit CUSUM.....	143
6.3.2.	Evaluation des Manövernetzes – Anwendungsbeispiel 1: Routenempfehlung.....	147
6.3.3.	Evaluation des Manövernetzes – Anwendungsbeispiel 2: Anomalieerkennung	148
6.4.	Evaluation der Detektion vom Manöver des letzten Augenblicks.....	150
6.5.	Klassifikation von Beinahekollisionen.....	154
6.6.	Zusammenfassung und Anforderungserfüllung.....	156
7.	Fazit und Ausblick	159
	Literaturverzeichnis	163
	Abbildungsverzeichnis.....	181
	Abkürzungsverzeichnis.....	185
	Anhang.....	191

1. Einleitung

Durch die fortschreitende Digitalisierung im Zuge der Verbesserung von Sicherheit und Effizienz auf See, steigt die Komplexität maritimer Technologien, was die maritime Domäne vor neue Herausforderungen stellt [Dnvg18, ScZu16]. Komplexe cyberphysische Systeme erfordern ein hohes Maß an Absicherung, da andernfalls eine Gefahr für Mensch und Umwelt besteht [DaKa17]. Die korrekte Funktionalität dieser sicherheitskritischen Systeme kann mit herkömmlichen Unit- oder Funktionstests nicht mehr ausreichend erprobt werden [MGLW15, S.443 ff.]. Zum Testen von hochautomatisierten und autonomen Fahrerassistenzsystemen kommen daher vermehrt Testfalldatenbanken mit enthaltenen, komplexen Verkehrssituationen zum Einsatz [PüZK17]. In diesen werden Verkehrssituationen gespeichert, um sie später in simulativen oder hybriden (mixed-reality) Verfahren in kontrollierter Umgebung zu reproduzieren [HKYF16, QTZS10]. Durch Verfahren der geführten Simulation und Parametrisierung entstehen so neue künstlich erzeugte Fahr- oder Verkehrsszenarien. Diese werden in einer Simulationsumgebung ausgeführt und die Funktion des sicherheitskritischen Systems anhand dieser untersucht (szenariobasiertes Testen).

Aus Realfahrten, wie Feldversuchen (engl. Field Operational Tests; FOT) und naturalistische Fahrstudien (engl. Naturalistic Driving Studies; NDS) werden Unfälle zwecks Metadaten und Reproduktion des Unfallhergangs gesammelt [Asse09, DKNP06, PZBE17]. Die dafür verwendeten und befüllten Datenbanken lassen sich in den gesamten Produktlebenszyklus, wie er in der Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization; ISO) 17894 (General principles for the development and use of programmable electronic systems in marine applications) als Adaption der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (engl. International Electrotechnical Commission; IEC) 61508 beschrieben wird, integrieren und können diesen vor allem in der Designphase unterstützen [Inte05, S.39 ff., PZBE17, S.2]. Die IEC fördert mittels dieser Norm die Bewältigung der komplexen Entwicklung neuartiger hochautomatisierter Systeme [Inst11]. Während relevante, historische Verkehrssituationen für die Entwicklung von sicherheitskritischen Systemen aus der Datenbank extrahiert werden, werden während der Test- und Betriebsphase neue Unfallsituationen gesammelt und für spätere Anpassungen oder Neuentwicklungen durchgehend im Entwicklungsprozess genutzt [PZBE17, S.2]. Hierdurch entsteht ein stetiger Verbesserungsprozess, in welchem relevante Unfallsituationen aus der Praxis untersucht und für die Entwicklung neuer Assistenzsysteme eingesetzt werden. Neben der stetig wachsenden Komplexität der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IKT) gibt es seitens der EntwicklerInnen und StakeholderInnen Bestrebungen die Assistenzsysteme in den Fahrzeugen stetig intelligenter zu machen, um auch zukünftige oder bis dato unbekannte

Situationen sicher bewältigen zu können [BDFM12, DaKa17]. Auch hierfür können aufgezzeichneten Unfallsituationen zur Validierung intelligenter Systeme genutzt werden.

Der geforderte Funktionsumfang soll nicht mehr auf einen konkreten Anwendungsfall angepasst werden, sondern die Systeme sollen zukünftig selbstständig Entscheidungen in den verschiedensten und zum Teil unbekanntem Situationen treffen können, weshalb selbstlernende Verfahren als Lösungsansatz in Frage kommen [DaKa17, S.401 f.]. Diese Verfahren benötigen sowohl für die Trainings- als auch für die Testphase eine ausreichend große Menge an relevanten Verkehrsszenarien, welche eine Absicherung im Realverkehr gewährleisten können. Für die Auswahl und Bewertung relevanter Szenarien ist die Betrachtung des Realverkehrs erforderlich. Um eine Einschätzung über das Gefahrenpotenzial und Relevanz von Begegnungssituationen treffen zu können, müssen demnach reale Begegnungssituationen untersucht werden, um die Erprobung künftiger hochautomatisierter Systeme auf den realen Einsatz auszurichten und die Validität sicherzustellen. Aus diesem Grund soll ein Verfahren entwickelt werden, dass Begegnungen im Schiffsverkehr automatisiert nach ihrem Potential in einer Kollision zu resultieren, bewertet und als Ground Truth für die spätere Systemvalidierung in einer Datenbank sichert. Unter dem Kollisionspotential soll in dieser Arbeit die quantifizierbare Möglichkeit einer Kollision zwischen zwei Schiffen verstanden werden. Hierfür werden ausschließlich real aufgetretene Verkehrssituationen empirisch untersucht. Zum einen, weil menschliches Fehlverhalten nach wie vor die größte Quelle für Unfälle im Seeverkehr darstellt (vgl. Abbildung 1), wodurch diese Fehler ebenfalls in der Datenbasis enthalten sind. Zum anderen um Gemäß der Definition, eine Ground Truth (Referenz basierend auf Messdaten aus der Realität) für zukünftige Evaluationen aufzubauen [Stev87]. Die Abbildung 1 kategorisiert die in Deutschland geprüften Seeunfälle gemäß technischen und menschlichen Ursachen. Gerade das Kriterium „Falsche Beurteilung der Situation“ deutet darauf hin, dass eine Verkehrssituation nicht immer eine eindeutige Bewertung erlaubt und demnach auch für technische Systeme eine Herausforderung bei der Entscheidungsfindung in diesen speziellen Situationen zu erwarten ist.

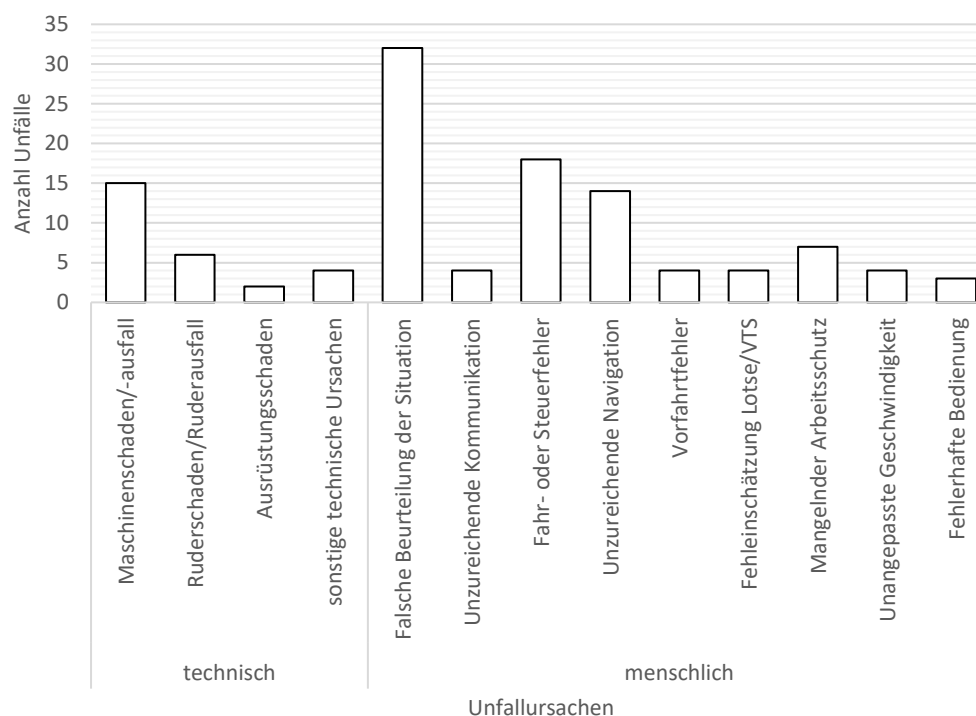


Abbildung 1: Verteilung Unfallursachen der von der Bundesstelle für Seeunfalluntersuchungen zu prüfenden Seeunfälle (Gesamt) in 2021 [Bund22, S.54 f.]

1.1. Unfall- und Testfalldatenbanken zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen

In der Automobilbranche existieren bereits verschiedene Initiativen zum Aufbau und zur Befüllung von Datenbanken, welche für den Erkenntnisgewinn über das Fahrverhalten, insbesondere in sicherheitskritischen Situationen, genutzt werden [RWGT12]. Der Großteil dieser Datenbanken (z.B. 100-Car event database), generieren ihre Daten aus NDS heraus. Hierfür werden in großangelegten Studien, ausgewählte Fahrzeuge mit verschiedenster Sensorik zur Umfeld- und Zustandserfassung ausgerüstet [NKKD02]. Die präparierten Fahrzeuge sammeln während ihrer Teilnahme am Straßenverkehr eine Fülle an Daten, die am Ende der Studie persistiert werden [DKNP06, Fotn16a, NKKD02, RWGT12]. Diese Datenbanken und die daraus gewonnen Erkenntnisse legen den Grundpfeiler für neue Assistenzsysteme, um dadurch die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen [Fotn16a]. In Deutschland hat sich das Projekt PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen) damit beschäftigt, eine Testfalldatenbank zur Absicherung von hochautomatisierten Fahrfunktionen aufzubauen [PüZK17]. In diese gelangen neben Situationsdaten aus FOT, auch Daten aus Verkehrssimulationen, sowie künstlich erstellte Verkehrsszenarien [PZBE17, S.4]. Die zu entwickelnden automatisierten

Assistenzsysteme verändern das Verkehrsverhalten nachhaltig und führen außerdem zu neuen Konfliktsituationen [MGLW15, S.440 f.]. Aus diesem Grund sinkt die Aussagekraft der Verkehrsdatenbanken mit Etablierung neuer Automatisierungssysteme über die Zeit. Auch die Unfälle und ihre Hergänge verlagern sich [MGLW15, S.440 f.]. Daher ist eine permanente Neubetrachtung und Abschätzung der Maßstäbe zur Bewertung von kritischen und unkritischen Verkehrssituationen notwendig. Kritikalität im Kontext technischer Systeme meint allgemeinhin Fehlverhalten, welches zum Verlust von Menschenleben (hohe Kritikalität), Gefährdung der Gesundheit des Menschen oder Zerstörung von Sachgütern (mittlere Kritikalität) oder der Beschädigung von Sachgütern ohne den Menschen zu gefährden führen kann (geringe Kritikalität) [Drös99, Vere18]. Im Rahmen von maritimen Verkehrssituationen trifft diese Beschreibung beispielsweise auf Kollisionen und Grundberührungen zu. Da bei (hochautomatisierten) Assistenzsystemen vor allem die Entscheidungssituation bei der Wechselwirkung von Verkehrsteilnehmern in Begegnungssituationen eine große Herausforderung für die Verantwortlichen darstellt [MGLW15, Winn12], können hierfür bereits ereignete Situationen mit negativem Ausgang, wie beispielsweise Kollisionen, genutzt werden. Die Unfallforschung nutzt hierzu Unfalldatenbanken wie die German In-Depth Accident Study (GIDAS) oder die European Marine Casualty Information Platform (EMCIP), um Erkenntnisse über die Unfallursachen und Hergänge zu gewinnen [MGLW15, S.351 ff.].

1.2. Herausforderungen

Um eine Validierung, also die Bestätigung durch objektive Nachweise, dass die Anforderungen für einen bestimmten praktischen Verwendungszweck erfüllt sind [Inte05, S.4], im Rahmen des Entwicklungsprozesses von Systemen gerecht zu werden, ist der Aufbau einer Ground Truth, wie sie beispielsweise im Rahmen der Unfallforschung entsteht, notwendig [ErHa08]. Nur durch die Betrachtung des Realverkehrs kann der Einsatz von Assistenzsystemen im vorgesehenen Einsatzgebiet nachgewiesen werden [MGLW15, Winn12]. Die Erkenntnisse, die aktuell aus der Unfallforschung gewonnen werden, dienen vor allem dem besseren Verständnis des Systems Verkehr und als Basis zur Entwicklung neuartiger (Fahrassistenz-)Systeme. Nach Etablierung neuer Systeme zur Verbesserung der Sicherheit im Verkehrswesen, verändert sich, wie bereits erwähnt, das Verkehrsverhalten nachhaltig, was eine permanente Analyse von Verkehrsdaten und Neuanpassung von Schwellenwerten mit sich zieht [MGLW15, S.440 f.]. Demnach besteht die Herausforderung darin, eine Möglichkeit zu schaffen, erfasste Daten dauerhaft zu sammeln und automatisiert zu untersuchen. Ein Unfall ist allgemeinhin definiert als ein ungeplantes Ereignis oder Kette von Ereignissen, welches zu unerwünschten Situationen führt [Roth02, S.1]. Eine Teilmenge dieser Unfälle bilden die Kollisionen, welche in diesem Kontext den Zusammenstoß von zwei Verkehrsteilnehmenden meint. Sie decken jedoch lediglich einen kleinen Teil aller ereigneten

(kritischen) Situationen auf See, in der Luft oder auf der Straße ab [Reas90, S.477]. Allein die Untersuchung von Unfällen fließt, über die daraus gewonnen Erkenntnisse, in die Verbesserung der Sicherheit durch die Entwicklung neuer Systeme und Regularien ein [Reas90, S.475 ff., Roth00]. Um demnach diese zuvor erwähnte Kette von Ereignissen, die folglich in einen Unfall oder eine Kollision resultiert zu verstehen und zu durchbrechen, bedarf es einer genauen Rekonstruktion und Aufschlüsselung der unterschiedlichen Ereignisglieder. Die Häufigkeit von Unfällen im Seeverkehr ist verhältnismäßig gering. Die Wahrscheinlichkeit ob eine Begegnungssituation in einer Kollision resultiert hängt von mehreren Faktoren ab [FrRE08, S.39 ff.]. Neben menschlichen und technischen Fehlern (vgl. Abbildung 1) spielen auch immer wieder Umwelteinflüsse, wie schlechte Sicht (bspw. Nebel oder Sprühregen), Wind, Wellen oder Strömungen eine wesentliche Rolle [FrRE08, S.39]. Im Allgemeinen lässt sich ein Unfall, meist nicht nur anhand eines einzelnen Umstandes ausmachen, sondern ist stets die Abfolge oder gar das Zusammenspiel mehrerer Faktoren, wie schlechte Sicht gepaart mit zu hoher Geschwindigkeit eines oder mehrerer Verkehrsteilnehmenden [FrRE08, S.37]. Neben den Umweltfaktoren spielt bei Begegnungssituationen auch die Unsicherheit (i.e.S. Ungewissheit; engl. uncertainty) eine entscheidende Rolle. Während der Begriff Unsicherheit in der Entscheidungstheorie den Entscheidenden daran hindert ein konkretes Wahrscheinlichkeitsurteil zu bilden [LaGS18, S.35], bedingt die Unsicherheit, im Rahmen des Risikomanagements, das Ergebnis in positiver oder negativer Weise [Inte09]. Unsicherheit im Kontext dieser Arbeit meint die Schwierigkeit das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmenden korrekt einzuschätzen (vgl. Abbildung 2) und darauf basierend die nachfolgenden oder intendierten Aktionen bestimmen zu können. Während im Rahmen der Entscheidungsfindung eine Vorhersage bzw. Einschätzung anderer Teilnehmender häufig vom Erfahrungswert der Entscheidungsperson abhängt und dadurch lediglich subjektiv geschätzt und nicht objektiv gemessen werden kann [LaGS18, S.52], wird für eine Risikomesung ein zukünftiges unsicheres Ereignis mithilfe von Wahrscheinlichkeiten objektiviert [Wolk16, S.1; 13ff.]. Hierzu ist es notwendig eine Risikomessung durchzuführen, da nur Risiken bestimmt werden können, welche auch quantifizierbar sind [Wolk16, S.13]. Die Objektivierung der Risiken erfolgt laut ISO 31000:2009 nach vorangegangener Identifikation dieser, auf Basis empirischer Erhebungen, qualitativ oder quantitativ [Inte09]. Mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen lässt sich so die Auftrittswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse messen und beschreiben [CoDö13, S.5]. Abbildung 2 und die damit zusammenhängende Arbeit zeigt stellvertretend, dass die Unsicherheit mit zunehmenden Vorhersagehorizont steigt und somit der mögliche Szenarienraum und das Verhalten des zu vorhersagenden Verkehrsteilnehmenden beliebig komplex werden kann. Beruft man sich bei der

Vorhersage auf die Erfahrung, kann mittels Statistik und Wahrscheinlichkeitsbetrachtung das Auftreten einiger Szenarien eher in Betracht gezogen werden als anderer.

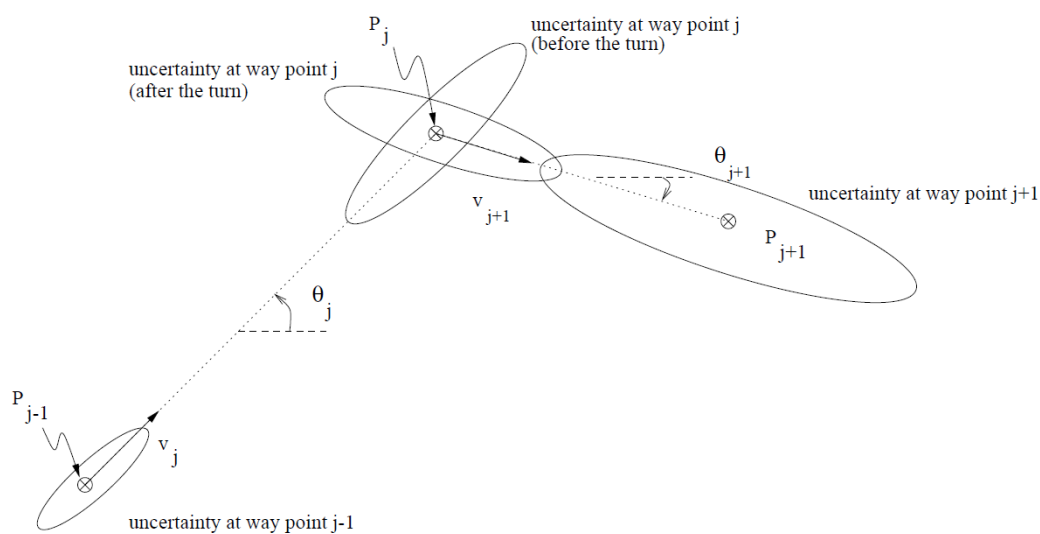


Abbildung 2: Vorhersagemodell für die Bewegung von Verkehrsteilnehmern während eines Manövers [PHLS00]

Fällt die Auftrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses nämlich unter einen bestimmten Schwellenwert [MoBa16a, S.33], spricht man im Forschungsfeld der der Extremwerttheorie (engl. extreme value theory; EVT) von einem seltenen Ereignis (engl. rare event). Diese seltenen oder extremen Ereignisse manifestieren die Grenzen komplexer Systeme [GYHM11, S.297]. Für den Erkenntnisgewinn sind diese Ereignisse demnach von unschätzbarem Wert, da sie potenzielle Fehler aufzeigen und die Entwicklung und Evaluation von Assistenzsystemen dadurch verbessern [BaBl93, S.1464]. Gerade weil sie nur selten auftreten sind sie, aufgrund der empirischen Evidenz, schwer zu untersuchen oder gar vorherzusagen [GYHM11, S.297].

Demnach weisen seltene Ereignisse stets eine höhere Unsicherheit auf und es kann die Annahme getroffen werden, dass es sich bei seltenen Ereignissen vermehrt um Störungen, wie Unfälle oder Beinaheunfälle handelt. Laut den „Guidance on near-miss reporting“ der International Maritime Organization (IMO) ist eine Beinaheunfall (engl. Near Miss) wie folgt definiert [Imo08, S.3]:

„A sequence of events and/or conditions that could have resulted in loss. This loss was prevented only by a fortuitous break in the chain of events and/or conditions. The potential loss could be human injury, environmental damage, or negative business impact (e.g., repair or replacement costs, scheduling delays, contract violations, loss of reputation).“

Alleinig eine zufällige Unterbrechung der Ereigniskette, welche normalerweise zu einem Unfall führen würde, unterscheidet einen Unfall von einem Beinaheunfall. Demnach kann ein Beinaheunfall auch erst a posteriori bestimmt werden. Ein Unfall ist in der maritimen Domäne im „Gesetz zur Verbesserung der Sicherheit der Seefahrt durch die Untersuchung von Seeunfällen und anderen Vorkommnissen (Seesicherheits-Untersuchungs-Gesetz – SUG)“ definiert. Im SUG unterscheidet man zwischen drei Kategorien an Unfällen [Gese00]:

sehr schwerer Seeunfall (SSU)

- „ein Seeunfall, der einem Schiff zustößt und bei dem es zu einem Totalverlust des Schiffes, zum Tod eines Menschen oder zu einer erheblichen Verschmutzung kommt.“ [Gese00, §1a]

schwerer Seeunfall (SU)

- „ein Seeunfall, der nicht als ‚sehr schwerer Seeunfall‘ einzuordnen ist und bei dem es insbesondere zu einem Brand, einer Explosion, einem Zusammenstoß, einer Grundberührung, einem Kontakt mit einem festen Körper, einem durch schweres Wetter verursachten Schaden, einem Eisschaden, einem Riss oder einem vermuteten sonstigen Schaden in der Außenhaut mit einer oder mehreren der nachstehenden Schadensfolgen.“ [Gese00, §1a]

weniger schwerer Seeunfall (WSU)

- „Alle anderen Seeunfälle, die nicht als SSU oder SU einzuordnen sind.“ [Gese00, §1a]

Eine klare Differenzierung zwischen Vorkommnissen und Unfällen bietet das SUG jedoch nicht. Laut SUG zählen auch Bagatellschäden zu den Vorkommnissen. Alleinig die Luftfahrt definiert Beinaheunfälle auf nationaler Ebene im „Gesetz über die Untersuchung von Unfällen und Störungen bei dem Betrieb ziviler Luftfahrzeuge (Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz – FIUUG)“. Die hier als schweren Störungen betitelten Vorfälle werden im FIUUG von Störungen separiert und werden wie folgt definiert [Gese98, Abschn.1]:

Störung

- „Ein anderes Ereignis als ein Unfall, das mit dem Betrieb eines Luftfahrzeugs zusammenhängt und den sicheren Betrieb beeinträchtigt oder beeinträchtigen könnte.“ [Gese98, Abschn.1]

schweren Störung

- „Ein Ereignis beim Betrieb eines Luftfahrzeugs, dessen Umstände darauf hindeuten, daß sich beinahe ein Unfall ereignet hätte“ [Gese98, Abschn.1]

Die im internationalen Sprachgebrauch auch als Aircraft Proximity Hazard (AIRPROX) bekannten Situationen, beschreiben im Grunde die zuvor erwähnten potenziellen Unfallsituationen [MaOc03, ShKi02, StRA08]. Betrachtet man Abbildung 3 erkennt man, dass diese schweren Störungen im Jahr 2016 knapp 90% der aufgezeichneten Vorfälle in Deutschland ausgemacht haben. Wie aus der Abbildung 3 ebenfalls ersichtlich wird, schwanken die Zahlen, zeigen aber einen klaren Trend nach unten. Dies soll nur als objektive Erkenntnis aus der Betrachtung der Zahlen zu verstehen sein. Es kann angenommen werden, dass auch die Reduktion des Verkehrsaufkommens in der Luftfahrt, aufgrund der Corona Pandemie, eine Verminderung von Unfällen und Störungen zur Folge hatte. Laut einer Studie der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU) aus dem Jahr 2017 wurden Annäherungen und Kollisionen im deutschen Luftraum zwischen 2010 und 2015 untersucht [Bund17]. Aus dieser Studie ergibt sich, dass in dem untersuchten Zeitraum 2010 bis 2015 insgesamt 490 Meldungen über Annäherungen, Nearmisses, Zusammenstöße, Staffelungsunterschreitungen, Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)-Ereignisse, AIRPROXE, Beinahezusammenstöße und Kollisionen von Luftfahrzeugen gemeldet wurden, jedoch 436 dieser gemeldeten Vorfälle als nicht weiter untersuchungswürdig kategorisiert wurden [Bund17, S.33]. Diese Erkenntnis gibt Anlass zur Annahme, dass es sich gerade bei Störungen um subjektives Empfinden handelt und unterstreicht die Hypothese, dass die Beurteilung von Störungen und Verkehrssituationen nicht eindeutig ist.

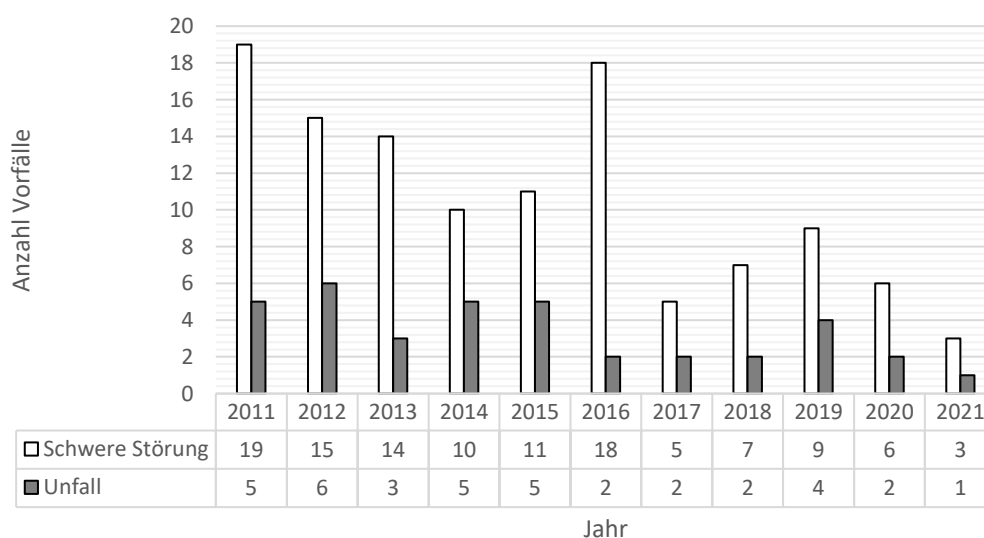


Abbildung 3: Anzahl der Vorfälle im Luftverkehr von 2011-2021¹

¹ Zugrundeliegende Daten von der OpenData Initiative der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchungen unter: https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/OpenData/opendata_node.html (abgerufen am 22.03.2023)

Um Vorfälle und Unfälle von anderen Situationen unterscheiden zu können muss ein Maß für das Potenzial eines Unfalles bestimmt werden. Um Begegnungssituationen objektiv bewerten zu können müssen zunächst quantifizierbare Maße gefunden werden, an denen das Unfallpotenzial bemessen werden kann.

Ob eine Situation als Störung eingeschätzt wird basiert, wie in der Definition des FIUUG dargestellt, stark auf Erfahrungen und Entscheidungen von ausgebildeten DomänenexpertInnen. In der Luftfahrt entscheiden beispielsweise die Fluglotsenden und die PilotInnen selbst, ob eine Situation als kritisch einzustufen ist. Diese Form der Situationsbewertung hat einige Nachteile. Zum einen fließt die persönliche Erfahrung des Entscheidungsträgers ein, was eine gewisse Subjektivität zur Folge hat. Zum anderen existiert in unserer Gesellschaft eine sogenannte „blame culture“ [LuWa18]. Das Eingestehen oder das Übernehmen von Verantwortung, die aus einem Fehler resultiert ist aus Angst vor Kritik oder gar rechtlichen Konsequenzen, unüblich [LuWa18, S.41 f.]. Dies ist unter anderem ein Grund, weshalb vor allem Unfälle für die Herleitung von Maßnahmen herangezogen werden. Demnach muss eine Verlagerung der Erfassung von Vorfällen im Verkehrswesen von einer subjektiven zu einer objektiven Wahrnehmung erfolgen. Dies lässt sich unter anderem mit einer ausreichend großen Datenbasis relevanter Verkehrssituationen erreichen.

Die Erkenntnisse aus der hier vorliegenden Einleitung lassen sich mit der Arbeit von Rothblum gut zusammenfassen [Roth02]. Rothblum (2002) spricht in ihrer Arbeit nämlich ebenfalls die Bedeutung der Berücksichtigung von Ereignissen wie Beinahekollisionen für das Verständnis von Kollisionen an. Sie adressiert in ihrer Arbeit den Human Factor (Human Error) als wesentlicher Faktor für die Entstehung von Schiffsunfällen [Roth00]. Dabei definiert sie eine Kollision nicht nur als ein einzelnes Ereignis, sondern vielmehr als eine Abfolge von Ereignissen [Roth02]. Indem auch Beinahezusammenstöße für die Datenanalyse und das Kollisionsverständnis berücksichtigt werden, erhöht sich die Informationsmenge. Diese Situationen haben laut Rothblum vergleichbare Kriterien wie Unfälle und helfen Vorfälle besser zu verstehen. Angelehnt an das „Schweizer-Käse“-Modell [Reas90b, WiSh99] ist ein Vorfall das Ergebnis mehrerer aufeinanderfolgender Fehler, welche nicht unterbrochen wurden. Demnach kann die Auswertung aller Arten von Vorfällen helfen, Sicherheitsprobleme zu verstehen und korrigierend einzugreifen, bevor ein Unfall passiert. Um die Zahl an Unfällen zu reduzieren, sollten demnach alle Kollisionen, also auch Beinahekollisionen, berücksichtigt werden [Roth02]. Rothblum schlägt demnach eine „Incident Database“ vor auf deren Basis Datenanalysen, sowie Data-Driven Research durchgeführt werden sollen, um Erkenntnisse in der Entstehung von Unfällen zu gewinnen [Roth02]. Die Autorin führt Empfehlungen zum Aufbau dieser Datenbank an und plädiert für ein Datenbankschema welches

auf die geplante Untersuchung ausgerichtet ist. Dies setzt voraus, dass der Einsatz der Datenbank und die Fragen, welche mit dem Datensatz beantwortet werden sollen, klar definiert sind. Weiter soll die Eintragung der Daten von Fachleuten erfolgen, die bereits ein Verständnis über die zugrundeliegenden Daten besitzen und diese im Idealfall auch auswerten [Roth02]. Dies reduziert die Möglichkeit von Missverständnissen des Datensatzes. Um eine Essenz aus der Vorfallforschung zu gewinnen, ist laut Rothblum die Zusammenfassung beziehungsweise Einordnung der verschiedenen Vorfälle zu Kategorien hilfreich, um die Erkenntnisse zur Prävention nutzen zu können und um ein besseres Verständnis über das Geschehen aufzubauen. Rothblum nennt auch die zehn häufigsten Ursachen, die es zu berücksichtigen gilt. Neben schiffs- oder brückeninternen Faktoren fallen darunter auch Kriterien wie etwa die Durchführung risikoreicher Entscheidungen und eine nachlässige Anpassung der Schiffsführung an die äußerlichen Gegebenheiten (Unwetter, Seegebiet oder hohes Verkehrsaufkommen). Gemäß dem Vorschlag von Rothblum wird zur besseren Eingrenzung und Konzentration im Rahmen der Arbeit der Fokus bei der automatisierten Detektion auf Beinahekollisionen, als Teil der Unfälle und Vorfälle gelegt. Die Kollisionen bilden, im Vergleich zu anderen Unfallarten, noch immer die größte Menge an erfassten Unfällen, noch vor den Kontakten mit festen Gegenständen und Hindernissen und der Grundberührung [Bund22]. Demnach wird im Folgenden nur noch von Beinahekollisionen gesprochen, wenn es um die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Ereignisse geht.

1.3. Zieldefinition und Beitrag

Im Folgenden sollen die in der Einleitung vorgestellten Herausforderungen und Erkenntnisse resümiert und in die Zieldefinition und den Beitrag der aus dieser Arbeit erwächst umgeformt werden. Die in der Forschungsarbeit entstehende Methode hat den Anspruch, auf Basis von Sensordaten und Kontextinformationen der maritimen Infrastruktur Begegnungssituationen in einer Datenbank zu sammeln, und hieraus einen Prozess zur automatisierten Detektion von Beinahekollisionen abzuleiten. Die abgeleiteten Situationen haben den Anspruch bei der Erprobung für die Validierung von künftigen Assistenzsystemen genutzt zu werden. Die vorgestellte Problemstellung zeigt, dass eine objektive Beurteilung von Begegnungssituationen für Generierung einer Datenbasis unabdingbar ist. Dabei sollen sowohl domänenspezifische Ausprägungen, Vorgänge bei Unfalluntersuchungen, sowie gängige Systementwicklungsprozesse berücksichtigt und unterstützt werden. Daher soll die vorgestellte Thesis eine Antwort auf die folgende Forschungsfrage liefern:

F1: Wie lassen sich validierungsrelevante Beinahekollisionssituationen aus historischen Verkehrsdaten detektieren und als Ground Truth nutzen?

Das resultierende Konzept zur Datenverwaltung und Informationsverarbeitung von maritimen Verkehrsdaten und der Detektion von Beinahekollisionen wird als Implementierung in der e-Maritime Integrated Reference Platform (eMIR)² aufgehängt, um auf der einen Seite die bestehende Infrastruktur für die Datenerhebung zu nutzen und auf der anderen Seite als Werkzeug zur Validierung von künftigen Fahrfunktionen weiterverwendet und in den Systementwicklungsprozess eingebettet zu werden. Das Gebiet der Nordsee und Unterelbe welches von eMIR instrumentiert ist, gilt als eines der vielbefahrensten Gewässer der Welt und hat in verschiedenen Studien und Berichten ein hohes Unfall- und Kollisionsrisiko zu verzeichnen [Bund20, S.37].

Für die Beantwortung der Forschungsfrage treten mehrere Teilfragen (TF) auf, die anschließend in Zielvorgaben (Z) umformuliert werden.

TF1: Welche Faktoren spielen bei der Bewertung von Begegnungssituationen eine Rolle?

Aufgrund der zum Teil uneindeutigen Formulierungen der Internationale Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See (Kollisionsverhütungsregeln - KVR)³ obliegt die Bewertung und Einschätzung einer Begegnungssituation dem/der wachhabenden OffizierIn auf der Brücke. Diese/r trifft, basierend auf der aktuellen Situation, Entscheidungen zur Konfliktbewältigung. Dieser Entscheidungsprozess erfolgt zumeist subjektiv, basierend auf Erfahrungswerten. Daher muss zunächst bestimmt werden, welche Faktoren für die Lageeinschätzung von Relevanz sind, um daraus die Wirkzusammenhänge auf das Potenzial einer Kollision bei einer Begegnung zu ermitteln. Hierfür muss ein Ansatz erarbeitet werden, der die unterschiedlichen Faktoren berücksichtigt und zusammenbringt. Nicht alle dieser Faktoren sind auf den ersten Blick quantifizierbar und müssen demnach für eine Automatisierung der Detektion messbar gemacht und vorverarbeitet werden.

Z1: Abbildung von Begegnungssituationen und deren Umwelteigenschaften aus Sensordaten

Um die Einflussfaktoren entsprechend berücksichtigen zu können, müssen diese digital erfassbar sein. Daher muss überprüft werden, ob die abgeleiteten Faktoren bereits messbar und repräsentierbar sind. Neben der Erfassung der Begegnung zwischen zwei Schiffen, besteht die Herausforderung darin auch die Einflussfaktoren, wie Umwelteinflüsse und die auf der Brücke befindlichen Informationen die zur Entscheidungsfindung herangezogen

² Testfeld zur Erprobung von hochautomatisierten Systemen (vgl. [RüLH19])

³ In der vorliegenden Dissertation werden die Formulierungen der KVRs verwendet. Wenn in internationalen Arbeiten von den COLREGs gesprochen wird, wird dies durch die Nennung COLREGs kenntlich gemacht. Die beiden Begriffe werden synonym verwendet.

werden, abzubilden. Informationen, die nicht direkt detektierbar sind, müssen aus den zur Verfügung stehenden Daten abgeleitet werden, um ein möglichst vollständiges Bild der Situation zu erzeugen und den Verlauf der Situation zu rekonstruieren. Bei den zu analysierenden Daten handelt es sich um spatiotemporale Daten, also Daten die eine zeitliche, sowie eine räumliche Komponente haben und somit nur für einen bestimmten Zeitpunkt oder -abschnitt und ein bestimmtes Gebiet gültig sind. Daher müssen die Daten für eine aufbauende Analyse zunächst in Beziehung zueinander gesetzt werden. Die erfassten Daten unterliegen einem gewissen Messfehler. Die Güte der Ergebnisse hängt demnach auch von der Qualität der zugrunde liegenden Daten ab. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, ist ein Verständnis über die Daten und deren Fehler notwendig.

Z2: Aufbau eines relationalen Datenmanagementsystems zur Aufbereitung der Geodaten

Technologische Veränderungen wie höhere Manövrierbarkeit der Schiffe, verstärkter Einsatz und Weiterentwicklungen von Frühwarnsystemen führen zu einer Verbesserung der Sicherheit auf See und demnach zu einer Veränderung der Grenzen bei der Bewertung von Kollisionsrisiken. Zum anderen führt diese Technologisierung auch zu neuen Fehlerquellen und Risikofaktoren, die eine permanenten Neubetrachtung der Kollisionsrisiken aktueller Begegnungen bedingen. Daher müssen die genutzten Daten persistiert werden, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und auch eine Aktualität über die Erkenntnisse zu gewährleisten. Für die Reproduzierung von aufgetretenen Begegnungen und die spätere Einspeisung in virtuelle und physische Testfelder zur Evaluation künftiger Schiffsführungssysteme ist die Kenntnis über die Güte der zugrundeliegenden Daten und das Verständnis über die genutzten Situationen essenziell.

TF2: Wie lassen sich Ereignisse mit hohem Kollisionspotenzial identifizieren?

Unfälle dienen in der Verkehrsforschung als Basis für die Aufdeckung von Schwachstellen bei der Sicherheit auf See. Durch die Verbesserung von Ausbildung und eingesetzten Technologien werden Kollisionen stetig seltener. Dies hat zur Folge, dass auch der Erkenntnisgewinn bei der Untersuchung derartiger Vorfälle durch die Reduktion der statistischen Signifikanz sinkt. Da eine Kollision eher das Resultat einer Verkettung von Ereignissen als deren Ursache ist, besteht die Herausforderung darin, weitere Vorfälle zu detektieren, welche zum besseren Verständnis des Hergangs dienen. Demnach ist, wie bereits mehrfach erwähnt, die Aufweitung der zu untersuchenden Vorkommnisse über klassische Kollisionen hinaus von Bedeutung. Daher lässt sich die Menge an Situationen aufweiten, wenn auch Situationen mit Kollisionspotential eingeschlossen werden. Um anders als in der Luftfahrt die

Entscheidung, ab wann eine Situation Kollisionspotenzial besitzt oder nicht, nicht der subjektiven Empfindung zu überlassen, soll systematisch ein Prozess entwickelt werden, der das ExpertInnenwissen als Basis nimmt und dieses für einen automatisierten Prozess mitberücksichtigt.

Z3: Objektivierung der Risikobewertung von Begegnungssituationen

Da eine Risikobewertung alleine, wie bereits in der Einleitung als Annahme in den Raum gestellt, das menschliche Empfinden und die automatisierten Prozesse im Kopf der entscheidungstragenden Person nicht gänzlich abbilden kann und somit auch insbesondere die Erfahrung der Personen auf der Kommandobrücke nicht einschätzen kann, muss ein weiteres Konzept für das Feststellen von Unsicherheit oder Reaktionen zur Meidung potentieller Kollisionen entwickelt werden.

Z4: Aufdeckung von Meidungsreaktionen und Unsicherheiten

Um die Erkenntnisse aus den Vorfällen für die Systementwicklung nutzbar zu machen, besteht die Notwendigkeit darin, aus den Situationen das Ergebnis als konkretes Problem zu formulieren. Der Problemlösungszyklus nutzt diese Problemdefinition für eine daran anschließende technische Lösungsentwicklung. Die technische Entwicklung ist geprägt von mehreren Anforderungs- und Entwurfsiterationen bis ein Gesamtsystem oder mehrere Subsysteme synthetisiert und in die Anwendung kommen. Das entstehende System wird somit nach erfolgreicher Verifikation in das Verkehrssystem integriert und fortan genutzt. Dies resultiert in einen neuen Status quo, welcher neue Vorgänge auslösen kann, der wiederum in bereits existierende oder neue Vorfälle resultiert. Die Auswirkungen dieses Systems auf den vorliegenden Zustand des Verkehrs lässt sich im Vorfeld durch die Nutzung der Situationen, die zu der Problemdefinition geführt haben untersuchen. Daraus kann eine Validierung des Zielsystems entstehen.

TF3: Wie lassen sich relevante Verkehrssituationen für die Validierung von Schiffsführungssystemen bereitstellen?

Der Einsatz von Testfeldern hat sich bei der Einführung neuer und komplexer Assistenzsysteme bewährt. Diese verhelfen durch eine permanente Justierung und Überprüfung der Systemfunktionalität durch die parallele Verifikations- und Testphasen schon während der Entwicklung zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit [Brin18]. Um also abschließend die Nutzbarkeit der detektierten Situationen zu zeigen, müssen diese folglich in eine sichere Testumgebung eingespeist und für die Validierung und Verifikation von hochautomatisierten Systemen bereitgestellt und reproduzierbar sein. Zur Bereitstellung der ermittelten Situationen und anschließende Erprobung maritimer Schiffsführungssysteme müssen die

Eingaben der Testumgebung mit den erforderlichen Datensätzen angereichert werden. Die Daten müssen die notwendigen Informationen bereitstellen, um eine realitätsgetreue Nachbildung der Situation zu emulieren. Darüber hinaus können diese potenziellen Kollisionssituationen auch als Grundlage für die Generierung von weiteren, darauf aufbauenden Szenarien eingesetzt werden. Aber auch als Trainingsset um Systeme die ein bestimmtes Verhalten oder eine bestimmte Funktion erst erlernen müssen, können die detektierten Situationen denkbar sein.

Z5: Integration der Beinahekollisionen in ein Testfeld

Wissenschaftlicher Beitrag. Zusammenfassend lässt sich der Kernbeitrag dieser wissenschaftlichen Arbeit insbesondere der TF2 zuordnen. Durch das Forschungsgebiet des szenariobasierten Testens gewinnen Daten über Verkehrssituationen an Bedeutung [PZBE17]. Da in der Forschung jedoch vor allem das Thema der simulativen Erzeugung und theoretischen Modellierung, insbesondere von seltenen Ereignissen betrachtet wird, soll hier ein Ansatz zur Nutzung von Realdaten durch das extrahieren von interessanten Situationen vorgeschlagen werden. Um einen Nutzen im Sinne der Wertschöpfung aus dieser Arbeit zu ziehen bilden TF1 und TF3 den ingenieurwissenschaftlichen Rahmen, um eine Anwendung und Weiterverwendung der Forschungs- und Arbeitsergebnisse sicherzustellen. Aus diesem Grund lässt sich der Kernbeitrag wie folgt definieren:

Entwicklung eines Prozesses zur Detektion von maritimen Beinahekollisionen durch die Identifikation von Fahrerreaktionen und Unsicherheiten in Beobachtungsdaten historischer Begegnungssituationen.

1.4. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist an das Vorgehensmodell empirischer Forschung angelehnt, welche den Ablauf eines Erkenntnisprozesses in die fünf Phasen Erkundungsphase, Theoretische Phase, Untersuchungsphase, Auswertungsphase, sowie der Entscheidungsphase unterteilt [Clef15, S.7 ff.].

In der ersten Phase, der Erkundungsphase, geht es darum, zunächst eine Vorstellung über mögliche Zusammenhänge und Entstehungen des zu untersuchenden Gegenstandes zu erhalten. Dies erfolgt in der vorliegenden Arbeit im Kapitel 2, in welchem zunächst die Grundlagen der Unfallforschung, maritimer Kollisionsverhütung und Infrastruktur, sowie der Handhabung von geospatialen Daten und Datenmanagement beschrieben werden. Die gewonnen Erkenntnisse werden in Anforderungen überführt und mit dem existierenden Stand der Forschung und Technik gegenübergestellt, um die Wahrnehmung über eine vermeintliche Forschungslücke und den Beitrag dieser wissenschaftlichen Arbeit zu verifizieren (vgl. Kapitel 3).

Gemäß den Erkenntnissen wird in der theoretischen Phase, ein Konzept (Kapitel 4) entwickelt, dass zum einen den Rahmen für die Beantwortung der zugrundeliegenden Forschungsfragen schafft und zum anderen konkrete Artefakte als wissenschaftliche Beiträge liefert.

Zur Vorbereitung auf die Evaluation und Prüfung der konzeptionellen Lösungsvorschläge gegen die erhobenen Anforderungen wird in Kapitel 5 gemäß der Untersuchungsphase die Umsetzung und Realisierbarkeit der konzeptionellen Ergebnisse demonstriert und beschrieben.

Die Auswertungsphase prüft zunächst die einzelnen Komponenten (Verifikation) auf ihre Funktionalität. Abschließend werden die einzelnen Teile zu einem Gesamtprozess zusammengeführt, um die erfolgreiche Problemlösung durch das vorgeschlagene Gesamtkonzept zu untersuchen (Validierung). Diese Phase spiegelt sich in Kapitel 6 wider.

Zu guter Letzt wird das Ergebnis der Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Ausblick über die möglichen anknüpfenden Forschungsthemen gegeben. Dies bildet die Entscheidungsphase, die im Rahmen der empirischen Forschung den zukünftigen Einsatz, sowie die Validierung des Ergebnisses zum Inhalt hat.

Das vollständige Vorgehen und Aufbau dieser wissenschaftlichen Arbeit ist in Abbildung 4 dargestellt.

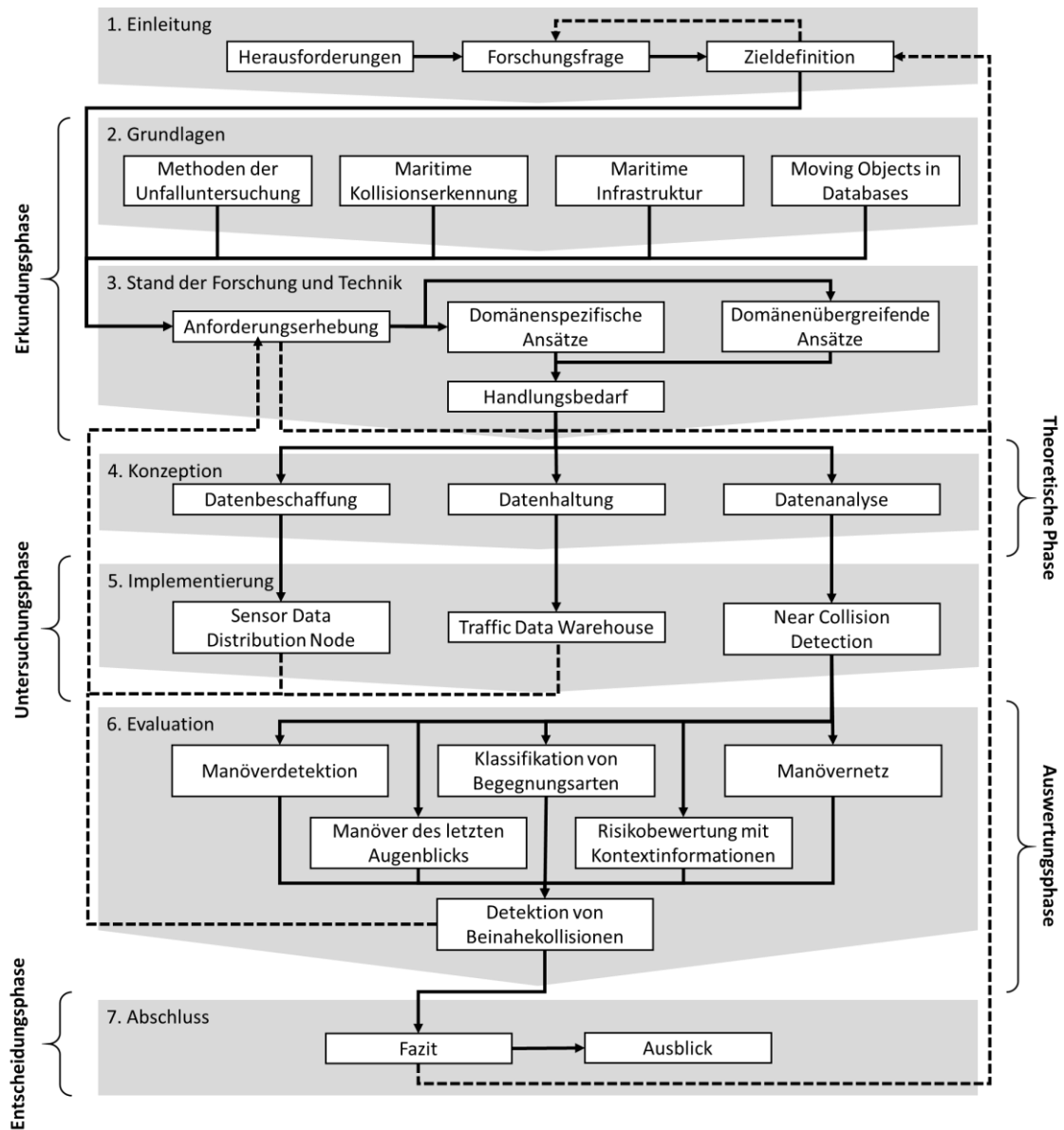


Abbildung 4: Aufbau der Arbeit basierend auf dem empirischen Vorgehensmodell von [Clef15]

2. Datenbanken als Werkzeug in der Unfallforschung

Die Erhebung und Untersuchung von Situationen mit Kollisionspotential welche als Ground Truth zur Validierung von hochautomatisierten Systemen dienen, lässt sich als übergeordnetes Ziel zusammenfassen. Daher sollen im Folgenden die zur Beantwortung der Forschungsfragen erforderlichen Grundlagen vorgestellt und zusammengefasst werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden in Abschnitt 3.1 die Anforderungen erhoben und mit den Forschungsarbeiten, die den Stand der Technik bilden, abgeglichen. Abschließend wird der Handlungsbedarf abgeleitet.

Abschnitt 2.1 startet mit dem aktuellen Stand zur Erhebung und Auswertung von Unfällen und Vorfällen im Transportwesen. Es werden die drei Domänen Schifffahrt, Luftfahrt und Straßenverkehr beleuchtet. In Abschnitt 2.2 werden die domänenspezifischen Bestimmungen und Techniken zur Unfallvermeidung vorgestellt. Diese dienen der Beschreibung des Ist-Standes bei der Beurteilung und dem Vorgehen in Begegnungssituationen. Zur Datenerhebung ist der Einsatz maritimer Sensorik unabdingbar. Daher soll in Abschnitt 2.3 auf die Besonderheiten der maritimen Infrastruktur eingegangen und die für die Erhebung der relevanten Informationen erforderlichen Technologien vorgestellt werden. Der Umgang mit spatiotemporalen Datensätzen stellt sowohl die Datenhaltung als auch die Nutzung vor besondere Herausforderungen. Der aktuelle Stand der Technik im Bereich von Geodaten(-banken) insbesondere in der Handhabung von Moving Objects, wird im Abschnitt 2.4 näher beleuchtet.

2.1. Angewandte Unfalluntersuchungsmethoden

Um die Sicherheit im See-, Flug- und Straßenverkehr weiter zu erhöhen und das System Transportverkehr besser zu verstehen, sind viele DomänenexpertInnen bemüht auf Basis von Verkehrsuntersuchungen Erkenntnisse zu generieren, die bei der Entwicklung von Assistenzsystemen und der Vermeidung von Unfällen generell, zweckdienlich sein können.

Um ein Verständnis über Unfälle und mögliche Korrelationen über die Entstehung aufzudecken, werden in den unterschiedlichen Domänen Unfalldatenbanken eingesetzt, in welchen Unfallberichte textuell gespeichert werden. Die GIDAS sammelt im Automobilbereich seit 20 Jahren für jeden Bericht Informationen über Unfallabläufe, Unfallstellen, Skizzen, beteiligte Fahrzeuge, Beschädigungen am Kraftfahrzeug und involvierten Personen, sowie die Ergebnisse der Rekonstruktion [Gida19]. Der Lenkungsausschuss besteht aus etablierten Konzernen wie Ford, Volkswagen, BMW oder Bosch. Dieser nutzt die Erkenntnisse für eine langfristige Entwicklung und Etablierung potenzieller Assistenzsysteme zur Unfallreduktion [Bosc19, Komp19]. Auch andere Länder wie Indien, Brasilien und China haben bereits

eine Unfalldatenbank nach deutschem Vorbild aufgesetzt [Bosc19, S.4 ff.]. Die gewonnenen Erkenntnisse werden neben der Fahrzeugtechnik auch für Erkenntnisse in den Bereichen Infrastruktur, Medizin, sowie der Psychologie genutzt, um ein zukunftsweisendes Verständnis über Unfälle und die Abläufe drumherum zu schaffen [Wisc19]. Die zukünftigen Technologien beschränken sich demnach nicht nur auf die Automatisierung von Fahrzeugen, sondern ein Zusammenspiel auch aus der Infrastruktur und der Vorsorge im Hinblick auf ärztliche Versorgung vor, während und nach Unfällen [Wisc19, S.11].

In der maritimen Domäne, sowie der Luftfahrt sind Berichterstellung und Aufbereitung/Aufklärung der Unfälle rechtlich geregelt [Gese00, Gese98]. Die Unfallberichte werden zumeist national erhoben und auf europäischer Ebene in einer Datenbank gesammelt und für Auswertungen bereitgestellt [Euro17]. Die European Maritime Safety Agency (EMSA) verwaltet die EMCIP und deren Zugänge. In der Luftfahrt wird unter dem Namen Jet Airliner Crash Data Evaluation Centre (J.A.C.D.E.C.) ein privates Dienstleistungszentrum zum Bewerten der Sicherheit von Fluglinien angeboten. Hierfür sammeln und nutzen die Betreibenden Unfallberichte und werten diese aus, woraus jährliche Rankings und Berichte entstehen [RiWo19].

Um aus Unfällen zu lernen und Maßnahmen gegen diese zu ergreifen, gibt es weitere Bestrebungen auch Vorfälle zu untersuchen, die eine Gefährdung der Sicherheit im Transportwesen darstellen. Durch die Betrachtung von Vorfällen, bei denen es aufgrund der Unterbrechung der Ereigniskette nicht zu einem Unfall gekommen ist, lassen sich durch ihre hohe Kongruenz auch Maßnahmen für Unfälle aufstellen [Brow02, Roth02].

Ein Beispiel aus dem maritimen Kontext zur Untersuchung von Beinaheunfällen an Bord stellt das nearmiss System⁴ dar. Es handelt sich bei nearmiss.dk um einen gemeinschaftlichen Zusammenschluss dänischer Reederverbände und Seahealth, bei der eine Datenbank mit Berichten über Ereignisse und Erfahrungen (an Bord), die als kritisch aufgefasst wurden, entsteht. Der Austausch dieser Erfahrungen ermöglicht es allen Reedereien aus den Erkenntnissen zu profitieren und ihre Mitarbeitenden dahingehend weiter zu sensibilisieren [StET12].

Für den Erkenntnisgewinn im Hinblick auf die Entwicklung und Etablierung von Assistenzsystemen und die daraus resultierende Akzeptanz und Veränderung des Verkehrsverhaltens existieren vor allem in der Automobilbranche unterschiedliche Ansätze und Methoden zur Erforschung und Sammlung von Daten über den Straßenverkehr.

⁴<https://nearmiss.dk/>(abgerufen am 25.02.2023)

Um neuartige Systeme im realen zu erproben hat sich das sogenannte FOT Verfahren, speziell in der Automobilbranche etabliert. Eine einheitliche Methodologie und Definition für FOT ist im Rahmen des Projekts „field operational test support action“ (FESTA) entstanden. Laut dem vom Konsortium veröffentlichtem Handbuch ist ein FOT [Fotn16a, S.14]:

“A study undertaken to evaluate a function, or functions, under normal operating conditions in road traffic environments typically encountered by the participants using study design so as to identify real-world effects and benefits.”

Das Ziel eines FOT ist es, die Auswirkungen von beispielsweise Assistenzsystemen im Straßenverkehr zu bewerten und untersuchen zu können. FOT können als großangelegte Nutzerstudien betrachtet werden, bei der die Fahrzeuge der Probanden mit diverser Sensorik ausgestattet werden, um die Einflüsse des Assistenzsystems im Straßenverkehr beurteilen und bewerten zu können. Wichtig ist auch die Erkenntnis darüber, wie sich das Fahrverhalten der Nutzenden ändert [Fotn16a].

Im Handbuch wird der Nutzende durch die Schritte Planung, Vorbereitung, Ausführung, Analyse und Berichterstattung geführt (vgl. Abbildung 5). Auch die rechtlichen und ethischen Vorgaben haben einen Einfluss auf die Durchführung von Nutzerstudien. Zwar suggeriert die Abbildung, dass es sich bei der Planung und Durchführung eines FOT um ein lineares Vorhaben handelt, FOT sind aber häufig von iterativen Vorgängen geprägt. Das Ziel von FESTA liegt unter anderem auch an der Wiederverwendbarkeit und Weitergabe der Daten. Da viele FOT Studien lediglich auf die Beantwortung einer einzelnen Forschungsfrage oder Hypothese ausgelegt sind, lassen sich durch die langfristige Datenhaltung auch weitere Fragen nachträglich beantworten [Fotn16a].

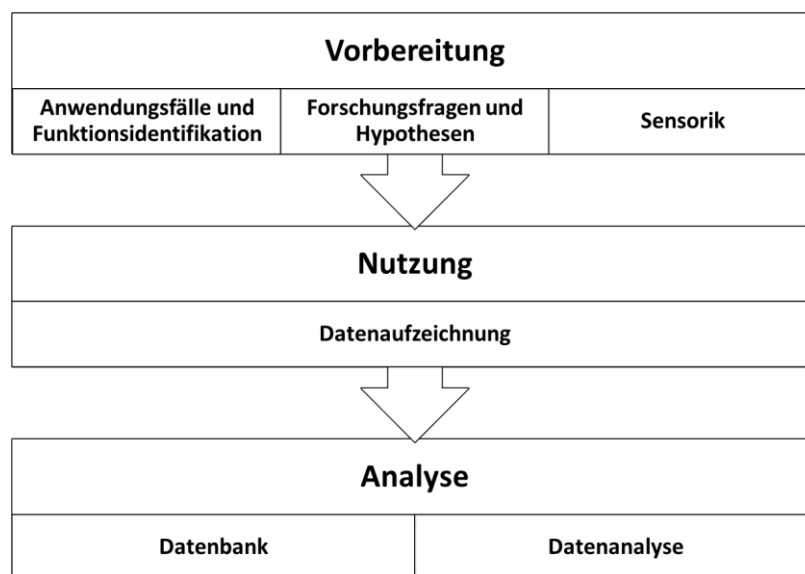


Abbildung 5: Wesentliche Schritte zur Durchführung eines FOT [Fotn16a]

Den Kernbeitrag in der Vorbereitungsphase stellen hierbei die Funktionsidentifikation des zu testenden Systems, die Anwendungsfallbeschreibung, sowie die notwendige IKT zur Aufzeichnung der relevanten Indikatoren dar.

Vor allem die Definition sowie Abgrenzung der Begrifflichkeiten Anwendungsfall, Situation und Szenario ist in diesem Schritt ausschlaggebend. Das Konsortium hat eine entsprechende Definition vorgelegt, um die Unterschiede dieser Begrifflichkeiten zu charakterisieren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Anwendungsfälle, Situationen, Szenarien und deren gegenseitige Abhängigkeit [Fotn16a]

Begriff	Definition	Kommentar	Beispiel
Anwendungsfall	Ein bestimmtes Ereignis, bei dem erwartet wird, dass sich ein System entsprechend einer bestimmten Funktion verhält	Ein Anwendungsfall ist ein System- und Fahrerzustand, wobei "System" die Gewässer- und Verkehrsumgebung umfasst.	Schiff folgt
Situation	Eine bestimmte Stufe oder eine Kombination von bestimmten Stufen von Situationsvariablen	Eine Situation ist also ein Zustand der Umwelt	Regnerisches Wetter + Dunkelheit + Segeln auf einem Verkehrstrennungsgebiet
Szenario	Ein Anwendungsfall in einer bestimmten Situation	Anwendungsfall + Situation = Szenario	Schiff folgt innerhalb eines Verkehrstrennungsgebiets bei Regen und Dunkelheit

Basierend auf der Erläuterung in Tabelle 1 kann festgehalten werden, dass es sich bei einem Anwendungsfall um eine textuelle Darstellung der Nutzung aus Sicht des Anwendenden handelt. Situationen sind etwas Beobachtbares. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit folglich von Situationen bei den beobachtenden Begegnungen gesprochen, da Sie anders als das Szenario keiner Intention folgen.

Es lässt sich erkennen, dass die Komplexität der Beschreibung eines Versuchsaufbaus mit der Konkretisierung steigt. Auch wird deutlich, dass nicht nur der Testgegenstand entscheidend zu einem Szenario beiträgt, sondern oder gerade auch die Umwelt berücksichtigt werden muss. Hierzu zählen nicht nur Wettereigenschaften, sondern auch die Verkehrsverhältnisse, die Beschaffenheit der Fahrwege (physikalische, dynamische Eigenschaften) oder Hindernisse (geographische Eigenschaften) [Fotn16a].

Von besonderer Bedeutung für die Feldstudien sind besondere Ereignisse, die die Randfunktionalitäten der Systeme abdecken und überprüfbar machen. Neben klaren Ereignissen, wie Unfällen, welche ein Indikator für Fehler im Assistenzsystem sein können, sind auch kritische Situationen, wie Überholvorgänge, bei denen das Fahrzeug bewusst auf die Gegenseite gelangt, von Bedeutung. Für sogenannte „Crash Relevant Events“ hat das FESTA Komitee eine eigene Anlage zur genauen Definition erstellt [Fotn16b]. Diese Ereignisse sind signifikant für die Bewertung der Sicherheit bzw. der korrekten Funktionalität des Assistenzsystems. Da sie weit häufiger als Kollisionen auftreten, lassen sich durch sie Rückschlüsse auf die Entstehung von Kollisionen schließen. Um ein übergreifendes Verständnis über derartige Ereignisse zu haben, hat das Komitee eine sehr ausführliche Definition zusammengetragen.

Das starke Bremsvorgänge der alleinige Indikator für Gefahrensituationen sind, lässt sich anhand von Erkenntnissen aus der Realität selbstredend nicht bestätigen [Fotn16b]. Daher werden im Folgenden die wesentlichen Kriterien zur Erkennung von kritischen Situationen präsentiert:

1. Fahrerreaktionsbasierte Identifikation
 - Deutliche kinematische Änderungen, wie Be- oder Entschleunigung und starke Richtungswechsel
2. Funktionsreaktionsbasierte Identifikation
 - Kollisionswarnungs- und Assistenzsysteme reagieren
3. Kontextbasierte Identifikation
 - Bewusste Missachtung der Verkehrsregeln zur Vermeidung von Unfällen
4. Historienbasierte Identifikation
 - Erfassung von anomalem/untypischem Verhalten

Um hieraus vor allem die seltenen Situationen und Schwellenwerte zu definieren wird im Anhang C weiter das Gaussian Mixture Model (GMM) vorgeschlagen. Dies kam laut Anhang bereits im euroFOT Projekt zum Einsatz. Die größte Herausforderung bei der Detektion liegt vor allem in der zuverlässigen Filterung von falsch-positiven Ereignissen [Fotn16b].

Um sich der Sicherheit im Verkehr von einer anderen Seite zu nähern, existiert ein weiterer Ansatz, die sogenannten NDS. Dabei steht das Erlernen über Verkehrsverhalten im Vordergrund. Anders als bei den FOTs, zielen die NDS darauf ab aus den gewonnenen Erkenntnissen erst im Nachhinein (ex post) Lösungen für die aufgedeckten Probleme zu entwickeln. Es geht vor allem darum, möglichst wenig Einfluss auf die Versuchsteilnehmenden zu nehmen, um ein unverfälschtes Bild über das generelle Verkehrsverhalten zu bekommen (vgl. Abbildung 6).

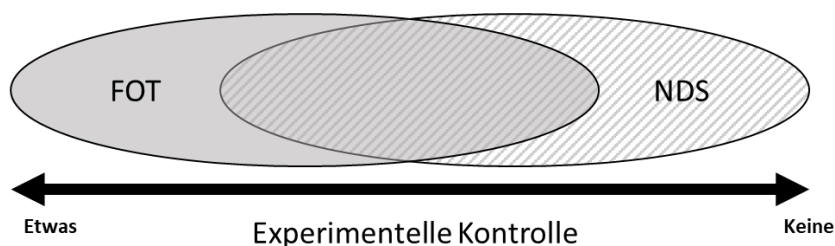


Abbildung 6: FOT gegenüber NDS nach [Fotn16a]

Durch die vorgestellten Verfahren entsteht eine große Menge an Verkehrsdaten, welche zur Generalisierung und empirischen Betrachtung herangezogen werden können. Weiter geht es darum, die Akzeptanz von Assistenzsystemen zu untersuchen und unter realen Bedingungen zu erproben. Da Realfahrten sehr kostspielig sind, jedoch für eine valide Akzeptanz unumgänglich, stellt sich auch hier die Frage nach einer Option, die generierten Daten möglichst verlustfrei in die simulative Welt zu integrieren, um reale Situationen als Szenarien für das szenariobasierte Testen nutzbar zu machen (vgl. Abbildung 7). Hierdurch würden sich diverse Mehrwerte ergeben. Zum einen lassen sich simulative Testläufe reproduzieren und wiederholen, zum anderen werden nicht ausschließlich künstliche Szenarien zur Validierung des Systems verwendet, was eine höhere Aussagekraft zur Folge hat.

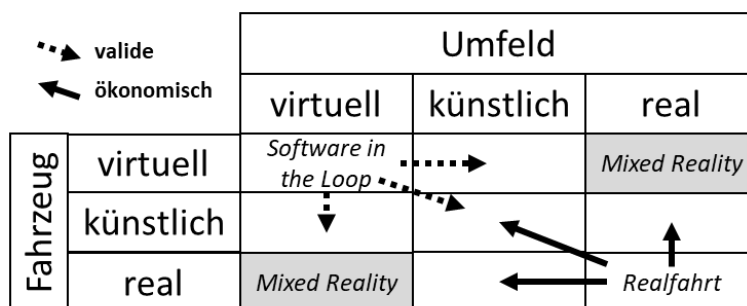


Abbildung 7: Einteilung von Testwerkzeugen für den Test von autonomen Fahrzeugen [MGLW15, S.460]

Als Beispiel einer abgeschlossenen NDS sei hier vor allem die „100-Car Naturalistic Driving Study“ genannt. Die 100-Car ist eine der ersten NDS, bei der der Hauptzweck darin bestand, Daten vor einem Unfall zu sammeln. Dabei wurde eine große Anzahl an Beinaheunfällen

aufgezeichnet. Es wurde viel Wert darauf gelegt, den teilnehmenden Probanden so wenig Anweisungen wie möglich zu geben und die Instrumente der Datenerfassung möglichst unauffällig in die Fahrzeuge zu integrieren [NKKD02]. Die Auswertung belegen das Heinrichs Triangel Theorem [HeOt41]. Heinrichs Triangel auch als Accident Triangle bekannt besagt, dass statistisch gesehen bei einer Menge von 330 gleichartigen Unfällen, an denen dieselben Personen beteiligt sind, 300 Unfälle ohne Verletzungen, 29 Unfälle mit leichten Verletzungen und 1 Unfall mit schwerem Arbeitsausfall auftritt [AnDe10, S.1]. Heinrich wies darüber hinaus darauf hin, dass Unternehmen häufig Unfälle mit Verletzungen gleichsetzten und nicht alle Unfälle zu Verletzungen führen, aber viele das Potenzial haben, Verletzungen zu verursachen. Zur Schadensbegrenzung schlug Heinrich demnach vor, alle Unfälle, sowohl Sach- als auch Personenunfälle, zu melden und zu prüfen [AnDe10, S.2]. Diese Erkenntnis lässt sich auch auf maritime Verkehrssituationen adaptieren und untermauern die Annahme, dass mehr Beinahekollisionen als Kollisionen existieren. Bei der NDS wurden im Zeitraum von einem Jahr 69 Unfälle und dem gegenüber 761 Beinaheunfälle aufgezeichnet [GKHD10].

2.2. Unfallverhütung in der Seeschifffahrt

Um Unfälle und insbesondere Kollisionen und deren Entstehung besser nachvollziehen zu können, empfiehlt es sich zu schauen, welche Rahmenbedingungen zur Unfallverhütung bereits existieren, um daraus mögliche Lücken und Schwachstellen aufzudecken, auf die sich ein Ansatz zur automatisierten Detektion konzentrieren kann. Aus diesem Grund werden zunächst die existierenden Regularien vorgestellt und anschließend die Ship Domain als etablierter Ansatz zur Kollisionsverhütung.

2.2.1. Maritime Regularien zur Vermeidung von Unfällen

Der Untergang der RMS Titanic im 15. April 1912 zählt wohl zu den bekanntesten, aber auch verheerendsten Schiffsunglücken in der Geschichte. Diese Katastrophe gab den Anstoß für den ersten Entwurf der International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Bis heute gab es fünf Versionen der Konventionen. Die Aktuellste besteht bereits seit 1974. Die SOLAS werden stetig verändert und erweitert. Übliche Vorfälle bei denen es zu der Verfassung von Ergänzungsprotokollen kommt, sind fatale Schiffsunfälle bei welchen die Umstände zuvor nicht in den SOLAS berücksichtigt wurden und demnach ergänzt werden müssen [Inte00a].

Bei den SOLAS handelt es sich um ein internationales Übereinkommen, welches die Sicherheit auf See regelt und gewährleisten soll. Hauptverantwortlich für die SOLAS ist die IMO. Die IMO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen, welche es sich unter anderem zur Aufgabe gemacht hat:

1. die Meeresverschmutzung durch die Schifffahrt zu reduzieren und
2. Die Sicherheit der Schiffe und der Seefahrt im Allgemeinen zu verbessern.

Hierbei setzt sie vorwiegend auf die Entwicklung von Standards, aber auch die Durchsetzung von Abkommen zwischen allen Mitgliedstaaten ist Aufgabe der IMO [Hist00].

Die SOLAS sind wohl der wesentlichste Beitrag der IMO für die Erreichung ihrer Ziele. Sie bestehen insgesamt aus 14 Kapiteln, die allgemeine Regelungen, über Brandschutzbestimmungen und Funkanlagen bis hin zu Vorgaben über Sicherheitsmaßnahmen für Schiffe, die in polaren Gewässern arbeiten, beinhalten.

Für die allgemeine Schifffahrt ist Kapitel V – „Safety of navigation“, das bekannteste, da diese Regelungen jedes Schiff unabhängig vom Typ adressieren. Im Hinblick auf Schiffsunfälle sei hier auch die Regel I/21 genannt, da diese auf den Umgang mit Verlusten eingeht und die Verwaltungsgesellschaften verpflichtet, Untersuchungen über jeden Schiffsunfall durchzuführen.

Die Untersuchung von Seeunfällen soll bei der Verbesserung und Wahrung der Sicherheit auf See helfen. Die Regularien und Durchführung dieser Untersuchungen werden durch das am 20.06.2002 in Kraft getretene SUG festgelegt. Es setzt damit die Richtlinie 2009/18/EG des europäischen Parlaments und des Rates „zur Festlegung der Grundsätze für die Untersuchung von Unfällen im Seeverkehr“ um. Diese resultieren wiederum aus der SOLAS-Regel I/21.

Das SUG sowie die Richtlinie 2009/18/EG sind unter dem Aspekt interessant, als dass sie erläutern, wie ein Unfall auf See untersucht werden muss und welche Informationen und Daten bei der Untersuchung eine Rolle spielen.

Neben organisatorischen Vorgaben, wie Kostenfragen, Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedstaaten, Datenschutz oder Fristen behandeln die Gesetze auch Begriffsdefinitionen und Vorgaben zur Verfassung von Sicherheitsempfehlung nach abgeschlossenen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 1.2).

Im Hinblick auf die eingehende Fragestellung sei ein besonderes Augenmerk auf SUG §37 und 2009/18/EG Artikel 17 gelegt. In diesem Artikel geht es um die permanente Speicherung der Daten über Unfälle und Vorkommnisse auf See. Diese sollen in einer europäischen elektronischen Datenbank gespeichert und ausgewertet werden.

Hierfür hat die Kommission eine entsprechende Möglichkeit mit dem Titel „Europäisches Informationsforum für Unfälle auf See“ (EMCIP) eingerichtet.

Wie in Kapitel 1 erwähnt übernimmt die Verwaltung der EMCIP die EMSA. Die EMSA veröffentlicht jährlich auf Basis der EMCIP einen Bericht mit relevanten Statistiken und Entwicklungen über Unfälle und Vorfälle auf See [Euro09].

Für die Durchführung der Untersuchungen ist in Deutschland die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU) zuständig. Die BSU wurde 2002 im Zuge des SUG, als durchführende Gewalt gegründet. Dabei liegt das alleinige Ziel darin, Seeunfälle zu untersuchen und aus ihnen Lehren zu ziehen, um die Sicherheit auf See zu erhöhen [Bsu00a]. Die BSU hat hierfür weitreichende Rechte, um die Untersuchungen schnellstmöglich zu einem Ende zu führen. Die Unfälle werden entsprechend analysiert und in einem Unfallbericht dargestellt [Bsu00b].

Damit es aber gar nicht erst zu Unfällen kommt, bestehen seit 1972 die KVRs. Eine Begegnungssituation wird in der Literatur als eine Situation zwischen zwei Schiffen verstanden, in der sich die Akteure in einer Distanz von weniger als zwei Seemeilen begegnen [DaDS82, Wang12]. Einige Quellen sprechen sogar von drei Seemeilen [Cold83, Iper15, S.52]. Bei der Untersuchung einer Begegnung sind vor allem die 20 Minuten vor-, sowie nach dem Punkt der minimalen Distanz interessant [Iper15, S.52].

Die KVRs sind in fünf Teile und insgesamt 37 Regeln untergliedert. Für den Verlauf der Arbeit sei auf Teil B (Ausweich- und Fahrregeln) hingewiesen, da dieser explizit das korrekte Verhalten der Verkehrsteilnehmenden adressiert [Inte77]. Das Verhalten der Schiffe spielt bei der Untersuchung von Kollisionen und dementsprechend Beinahekollisionen eine wesentliche Rolle. Mit dem korrekten Fahrverhalten bei Begegnungssituationen beschäftigen sich insbesondere die Regeln 6-10, sowie die Regeln 13-19 [Inte77]. Basierend auf den KVRs ergeben sich aus Sicht des Eigenschiffes vier verschiedene Begegnungssituationen mit der das nautische Personal umgehen muss [Inte77]:

- Entgegengesetzte Kurse (Regel 15)
- Überholvorgänge (Regel 13)
- Kreuzungssituation als ausweichpflichtiges Schiff (Regel 15+16)
- Kreuzungssituation als kurshaltendes Schiff (Regel 15+17)

Neben den gängigen Ausweichregeln im Seeverkehr existieren zwischen beschränkten/engen Fahrwassern und allgemeinen Gewässern besondere Regelungen (Regel 9+10) [Inte77].

Ein sogenanntes „Manöver des letzten Augenblicks“ (engl. Last Minute Maneuver; LMM) kann im weiteren ein Indikator für Situationen mit Kollisionspotential sein (Regel 8, Regel

17 b), weshalb auch diese Regel für die spätere Anforderungserhebung notwendig ist [Inte77].

In Deutschland existiert neben den KVRs zusätzlich noch die nationale Seeschifffahrtsstraßen-Ordnung (SeeSchStrO), welche spezielle Anwendungen und Ausnahmen in deutschen Gewässern spezifiziert [Bund98]. Die Regeln 9 b) bis d), Regel 15 und 18, a) bis c) in §25 (SeeSchStrO) unterscheiden sich zu den KVRs im Hinblick auf die Vorfahrt von Schiffen auf bestimmten Fahrwegen [Bund98].

Größter Kritikpunkt an den KVRs in Diskussionen zum Thema hochautomatisiertes Fahren ist die Tatsache, dass diese Regeln zur Kollisionsverhütung Raum für Interpretationen lassen und keine konkreten und messbaren Vorgaben zu Distanzen oder Zeitpunkten liefern, die sich in ein regelbasiertes System überführen ließen [BeCu04, KYCR21, WYLL18, ZHWW20, S.5 ff.]. Um diesen subjektiven Interpretationsspielraum zu objektivieren ist unter anderem das Konzept der Ship Domain entstanden, um das Verhalten von NautikerInnen quantifizierbar zu machen.

2.2.2. Ship Domain als Forschungsansatz zur Unfallvermeidung

Das Konzept der Ship Domain wurde zur Einschätzung der Navigationslage auf dem Wasser erstmals von Fujii im Jahre 1971 publiziert [FuSh71]. Seitdem wurden mehrere verschiedene Ansätze für eine Ship Domain entwickelt. Als gängigste Definition der Ship Domain gilt jedoch die Beschreibung von Goodwin [Good75, S.328]:

“ the sea around his ship effective waters which the navigator would like to keep free, with respect to other ships and fixed objects. “

Damit ist der Bereich, über, unter und um das Schiff herum gemeint, der von beweglichen Objekten (wie z.B. Schiffe) oder stationären Objekten (fixe Offshorebauwerke, Tonnen, etc.), freigehalten werden muss, um ein Kollisionspotenzial für das eigene Schiff auszuschließen. Die erste historische Form einer Ship Domain war kreisförmig, wobei der Radius den kleinsten akzeptablen Abstand zwischen zwei Schiffen dargestellt hat und der Mittelpunkt der kreisförmigen Ship Domain das eigene Schiff war [DiIm16].

Daraufhin folgte das erste Konzept der Ship Domain von Fujii, welches die Form einer Ellipse besitzt, bei der der geometrische Mittelpunkt der Ellipse den zentralen Punkt des Schiffes darstellt. Fujii's Ship Domain und deren Parameter, für die Definition der Ellipsenmaße, wurden auf Basis einer maritimen Verkehrsuntersuchung in Japan definiert. Es entstanden verschiedenartige Ship Domains bezogen auf den Kontext, wie offene und begrenzte Gewässer (Hafen oder enge Schifffahrtsstraßen), sowie bei Head-On Situationen, da

hier das Heck geringeren Gefahren ausgesetzt ist als in anderen Verkehrssituationen (vgl. Abbildung 8).

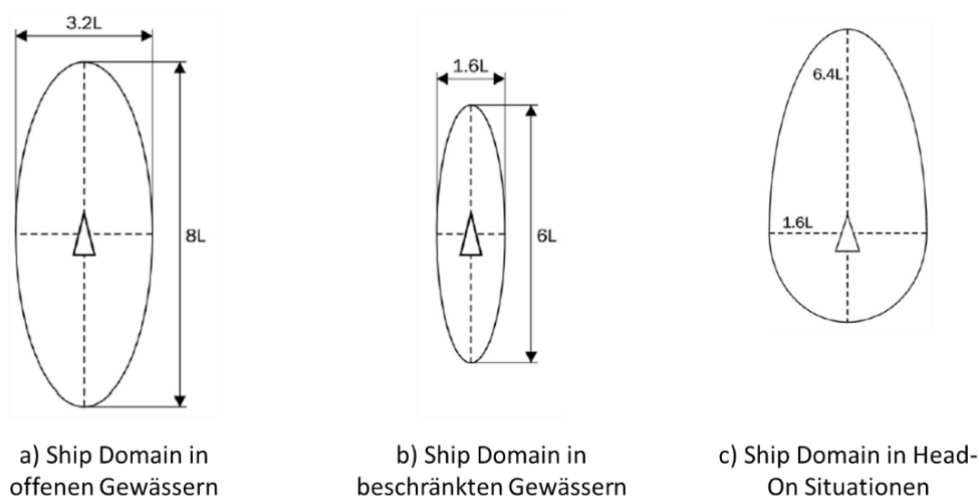


Abbildung 8: Fujiis Ship Domain Modelle nach [XuWa14, S.476 f.]

Diese Idee entstand aus der Annahme heraus, das NautikerInnen einen bestimmten Bereich um ein anderes Schiff meiden und dadurch das Kollisionspotenzial gering zu halten und das Wohlbefinden aller Verkehrsteilnehmer zu wahren [XuWa14, S.476].

Im Jahr 1975 wurde die kreisförmige Ship Domain von Goodwin vorgestellt. Die Besonderheit liegt in ihrem aus drei Segmenten, mit unterschiedlichen Radien bestehendem Aufbau. Goodwins Modell wurde mit statistischen Methoden erzeugt, welche mit großen Mengen an gesammelter Navigations- und Simulationsdaten gefüttert wurden. Die Segmente richten sich nach Navigationslichtzeichen der Schiffe und den COLREGs. Das Gewicht der Segmente ist auf die Ausweichpflicht laut den COLREGs ausgerichtet, sodass die Schiffe, die aus Richtung Steuerbord das eigene Schiff kreuzen, das Vorfahrtrecht besitzen. Demzufolge ist das Gewicht des rechten Segmentes (Steuerbord) in Fahrtrichtung größer als das linke Segment (Backbord), da von der rechten Seite ein größeres Kollisionspotenzial ausgeht. Für die Heckseite ist das Kollisionspotenzial am niedrigsten und somit hat auch das Gewicht des hinteren Segmentes den kleinsten Anteil der Ship Domain nach Goodwin (vgl. Abbildung 9).

Aus der Definition für die Ship Domain von Goodwin geht hervor, dass das Goodwin-Konzept eine subjektive Richtung einschlägt, im Gegensatz zum objektiven Fujii-Konzept. Eine subjektive Ship Domain stellt die Umgebung des Schiffes dar, die die navigierende Person aus eigenem Interesse sicher halten möchte, wohingegen die Umgebung einer objektiven Ship Domain schlichtweg zu akzeptieren ist. Im Rahmen der Forschung eignen sich subjektive Ship Domains eher zur Beurteilung des Kollisionspotenzials und objektive Varianten eher zur Durchführung von Verkehrssimulationen oder zum Design der

Routengenerierung. Aufgrund der mangelnden Beständigkeit von Goodwins Ship Domain eignet sich diese nicht für computerbasierte Verkehrssimulationen [XuWa14, S.477].

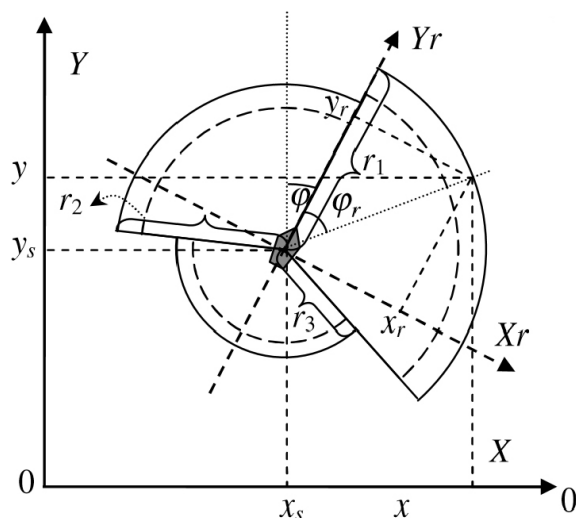


Abbildung 9: Ship Domain nach [Good75]

Um dem entgegen zu wirken, haben Davis et al. (1982) ein Konzept veröffentlicht, welches zwar auf Goodwins Modell beruht, aber die Form der Goodwin Ship Domain glättet, sodass eine kreisförmige Ship Domain entsteht, die die gleiche Fläche besitzt, wie die drei Segmente der Goodwin Ship Domain [DaDS82].

Die Position des Schiffes liegt nicht in der Mitte der kreisförmigen Ship Domain, sondern wurde lediglich verschoben, um die COLREGs bzw. die Eigenschaften von Goodwins Ship Domain zu berücksichtigen. Später wurde von Davis das Konzept einer Ship Arena vorgestellt, damit die Navigierenden präventiv Manöver einleiten können um Kollisionen im Vorfeld entgegenzuwirken [DaDS82]. Die Ship Arena umgibt grundsätzlich die zugehörige Ship Domain und ist somit größer gestaltet (vgl. Abbildung 10). Sobald ein Objekt in die Ship Arena eintritt, können vorbeugende Maßnahmen ergriffen werden, damit das Objekt nicht die kritische Zone, also die Ship Domain, verletzt [XuWa14, S.478].

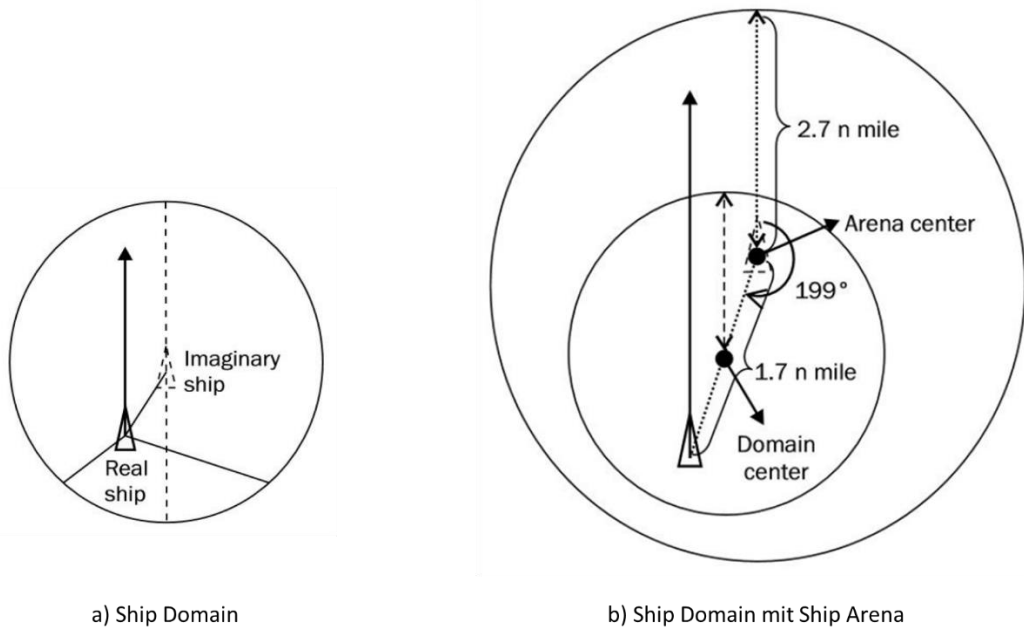


Abbildung 10: Davis et al. Ship Domain und Ship Arena Modell [XuWa14, S.478]

Aufbauend auf der Shipdomain von Fujii lieferte Coldwell (1983) einen weiteren Vorschlag einer Ship Domain, jedoch mit Fokus ausschließlich auf beschränkte Gewässer. Hierfür dienten Radartrajektorien von Schiffen in einem Zeitraum von 64 Stunden. Coldwell unterschied die Begegnungssituationen in sogenannte „meeting encounters“ und „overtaking encounters“. Diese sind laut Coldwell unterschiedlich geprägt und sollten daher auch separat betrachtet werden. Für die Entwicklung der Ship Domain entschied sich Coldwell ebenfalls für eine elliptische Darstellung und kumulierte die erfassten Distanzen auf, woraus sich die Grenzen für die Ship Domain ergaben (vgl. Abbildung 11).

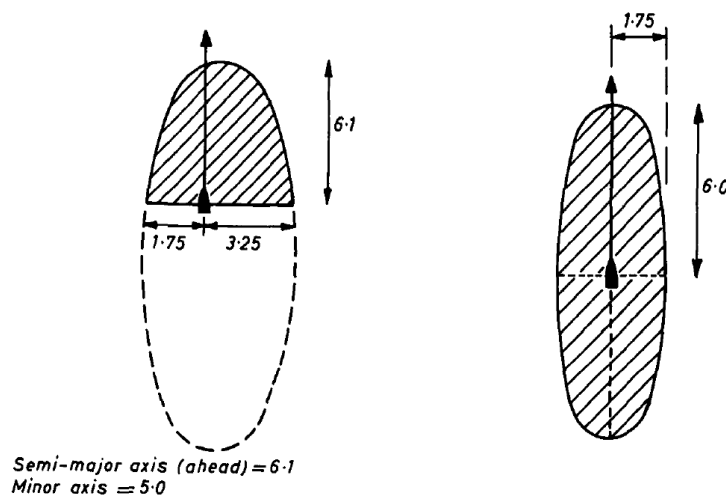


Abbildung 11: Ship Domain nach Coldwell (links für „meeting encounters“; rechts für „overtaking encounters“) [Cold83]

Seitdem wurden die Konzepte der Ship Domain weiter in den Bereichen der Kollisionsverhütung, der maritimen Verkehrssimulation, der Ermittlung des Vorkommens von Schiffsbegegnungen, der Bewertung des Kollisionsrisikos und zur Unterstützung der Vessel Traffic Services (VTS) eingesetzt. Das neuentfachte Engagement im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) hat sich auch in der Forschung der Ship Domain niedergeschlagen [MDJS20, S.582]. Mit den KI-Ansätzen sollen Wissen und Verhalten der Navigierenden besser abgebildet und somit der menschliche Faktor stärker berücksichtigt werden. Hieraus hat sich ein Fuzzy-Ansatz etabliert. Jingsong et al. haben ein Modell der Ship Domain mit unscharfen Grenzen vorgestellt [JiZF93]. Somit soll der/die Navigierende nur Maßnahmen ergreifen, wenn ein Objekt in den unscharfen Grenzbereich der Ship Domain eindringt. Der Unterschied zu der klassischen Ship Domain ist, dass die navigatorische Situation nicht nur zweiwertig (sichere Situation oder gefährliche Situation) beurteilt, sondern differenzierter betrachtet, um die navigatorische Situation präziser bewerten zu können [Piet08, S.502].

Die Theory für die „Fuzzy-Grenzen“ wurde wiederum von Pietrzykowski aufgegriffen und weiterentwickelt. Dabei wurden Sicherheitslevel (γ) eingeführt (vgl. Abbildung 12) [JiZF93, Piet08].

Die Bestimmung der Grenzen des Schiffsbereichs erfolgt durch die durchschnittlichen Sicherheitsabstände vom Zielschiff bei verschiedenen Kurswinkeln und unterschiedlichen Schiffsgrößen, sowie die Geschwindigkeit der Schiffe und der Verkehrsdichte. Der Wert für das Sicherheitslevel kann wie folgt definiert werden:

$$\gamma \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \gamma \leq 1$$

Ein Sicherheitslevel von 1 steht in diesem Kontext für eine sehr gefährliche Situation (Kollision). Ein Sicherheitslevel von 0 ist demnach eine sehr sichere Situation [Piet08, S.503].

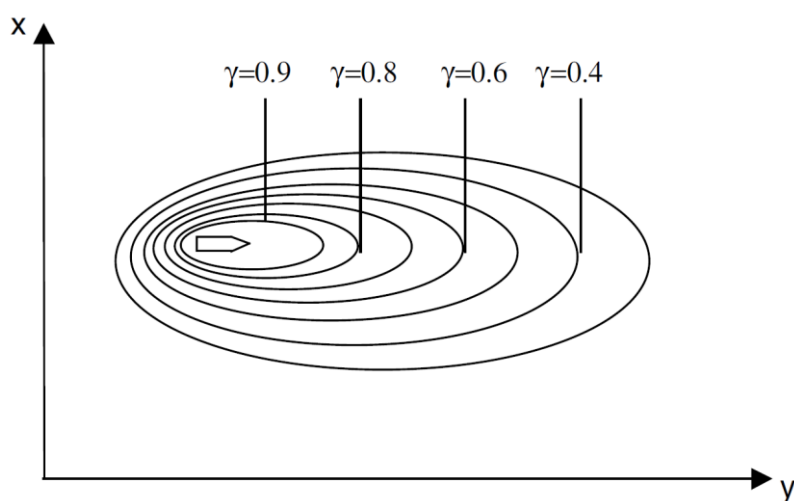


Abbildung 12: Ship fuzzy Domain nach [Piet08]

Pietrzykowski hat seinen Ansatz der Sicherheitslevel anschließend in polygonale Modelle überführt. Somit ist der Fuzzy-Ansatz nicht auf eine bestimmte geometrische Form beschränkt, sondern kann für unterschiedlichste Arten der Ship Domains verwendet werden.

Im Jahr 2000 wurde von Smierzchalski eine Ship Domain in Form eines Hexagons präsentiert, dessen Dimensionen experimentell gewählt werden können [XuWa14, S.479]. Um die Navigation des eigenen Schiffes mit Hilfe der Ship Domain vorschriftsgemäß nach den COLREGs durchzuführen, wurden zur Ermittlung der Ship Domain folgende Annahmen getroffen:

1. Das Sicherheitsgebiet um die Ziele unterscheidet sich bei guter und bei eingeschränkter Sicht
2. Bei guter Sicht sollte die Sechseckabmessung auf der Backbordseite des Ziels am größten sein.
3. Die Distanz muss groß genug sein, um ein sicheres Manövrieren gewährleisten zu können.

Smierzchalski hat den Ansatz entwickelt, um eine optimale Trajektorie um bewegliche, sowie feste Hindernisse herum zu definieren [Smie00]. Demnach verwendete er einen numerischen Algorithmus, um den Wert der Schiffsdomäne zu bestimmen (vgl. Abbildung 13).

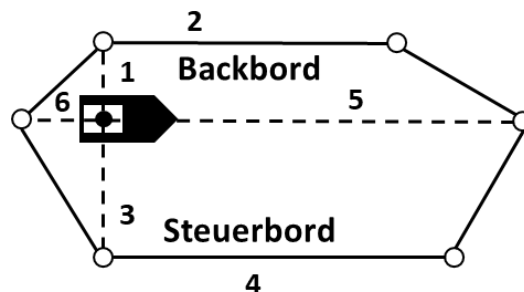


Abbildung 13: Hexagonal geformte Ship Domain nach [Smie00]

Der letzte Ansatz der im Rahmen der Ship Domains vorgestellt werden soll stammt von Wang und Chin. Auch bei diesem Ansatz wurde ähnlich wie bei Coldwell der Fokus auf beschränkte Gewässer gelegt [WaCh16]. Bei diesem Ansatz verändert sich die Ship Domain dynamisch, abhängig zur Geschwindigkeit. Dadurch hat ein Schiff ohne Geschwindigkeit eine kreisförmige Form. Wang und Chin haben die Nachteile vieler der vorgestellten Ship Domains aufgedeckt und auf folgende Kriterien zusammengefasst:

- Notwendigkeit für eine ausreichende Datenmenge
- Schwierigkeiten bei der Trennung der Faktoren, die die Form und Größe der Domäne beeinflussen und

- eine unklare Beschreibung des wahrgenommenen freien Bereichs um das Schiff herum.

Laut den Verfassenden ist in offenen Gewässern, aufgrund der größeren Menge an Freiheitsgraden, eine größere Ship Domain notwendig als in beschränkten Gewässern. In der vorgestellten Arbeit wurde für 360° jeweils die Distanz in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit ermittelt (vgl. Abbildung 14).

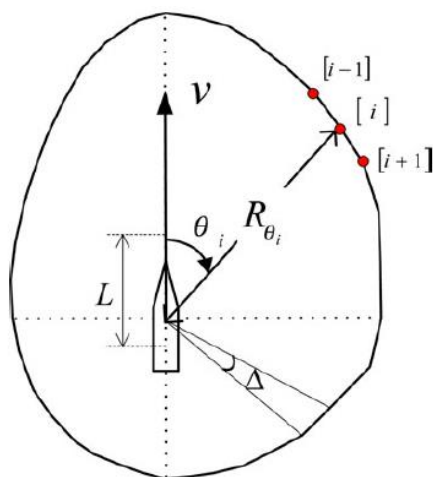


Abbildung 14: Ship Domain nach [WaCh16]

Folglich sollen einmal die Erkenntnisse aus der Betrachtung der unterschiedlichen Ansätze der Ship Domains gesammelt werden. Aus dem Überblick lässt sich zusammenfassen, dass die Ship Domains ganz unterschiedliche Einsatzzwecke bedienen können und daher auch basierend auf diesen in der Form und Herleitung stark variieren. Die regelmäßige Veröffentlichung von adaptierten oder neuen Ship Domains zeigen, dass ein Bedarf eines objektiven Modells zur Beschreibung des subjektiven Sicherheitsbereichs von Schiffen existiert, der nicht vollends erfüllt werden konnte. Auch wird deutlich, dass die berücksichtigten Faktoren, wie etwa Geschwindigkeit oder der Gewässertyp einen wesentlichen Einfluss auf das generierte Modell und auch die Aussagekraft haben. Allein die Form der Ship Domain und die Tatsache ob es sich, wie zuvor erwähnt, um eine subjektive Ship Domain, welche eher zur Beurteilung des Kollisionspotenzials dient, oder um eine objektive Variante zur Durchführung von Verkehrssimulationen oder zum Design der Routengenerierung, spielt bei der Auswahl der Ship Domain eine wesentliche Rolle.

Der Aspekt Wetter, welcher in der Literatur immer wieder als maßgeblicher Einflussfaktor für die Situationsbewertung genannt wird, wird in keinem der vorgestellten Ansätze zufriedenstellend betrachtet [BuBC88, StHM08]. Lediglich Smierzchalski mit seinem generischen Ship Domain Ansatz, erwähnt das auch die Betrachtung von Wetter in seinem Ansatz genutzt werden kann, zeigt dies jedoch nicht.

Für die Übersichtlichkeit sollen die vorgestellten Ship Domain Ansätze einmal systematisch basierend ihrer wesentlichen Aspekte gegenübergestellt werden (vgl. Tabelle 2). Die Herleitung und Einflussfaktoren die in den Arbeiten rund um die Ship Domains vorgestellt wurden, fließen in die Anforderungserhebung und Risikobewertung von Begegnungssituationen unmittelbar ein.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der existierenden Ship Domain Ansätze

Ansatz	Form	Herleitung (Erfassungsgebiet)	Einflussfaktoren
Fujii	Ellipse	Datengetrieben (Tokyo Bay, Uraga Strait)	<ul style="list-style-type: none"> - Gewässertyp (eher beschränkte Gewässer) - Begegnungsart - Geschwindigkeit
Goodwin	Kreisförmig	Datengetrieben (südliche Nordsee)	<ul style="list-style-type: none"> - Verkehrsdichte, - Geschwindigkeit der begegnenden Schiffe - Schiffstyp - Gewässertyp (eher offene See) - Erfahrung der nautischen Person
Davis et al.	Kreisförmig mit Sicherheitsleveln	Expertenwissen	<ul style="list-style-type: none"> - Begegnungsart - Kollisionsregularien (Ship Arena) - Kurs der begegnenden Schiffe
Coldwell	Halb-Elliptisch	Datengetrieben (Humber)	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkte Gewässer (in 3 Zonen) - Begegnungsarten - Verkehrsaufkommen - Schiffslänge - Navigationsstatus - (zum Teil auch) Kollisionsregularien
Smierzchalski	Polygon	Expertenwissen	<ul style="list-style-type: none"> - Erfahrungen der nautischen Person - Schiffscharakteristiken (Dimension und Typ) - Geschwindigkeit - Verkehrsaufkommen - hydrometeorologische Bedingungen - Begegnungsarten
Pietrzykowski	Unspezifiziert mit Sicherheitsleveln	Datengetrieben, Simulativ	<ul style="list-style-type: none"> - Manövrierfähigkeit des Schiffes - Rate of Turn - alle anderen Einflussfaktoren (Theoretisch; da es um die Einführung von Sicherheitsleveln geht, wurde dies in der Arbeit aber nicht gezeigt)
Wang und Chin	Asymmetrisches, dynamisches Polygon	Datengetrieben (Singapur Strait and Port)	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkte Gewässer - Geschwindigkeit - Kurs - Peilung

Größter Kritikpunkt an der alleinigen Verwendung der Ship Domain für die potenzielle Kollisionserkennung ist die Tatsache, dass lediglich die Distanz und nicht das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden berücksichtigt wird. Von den vier aus den FESTA Ergebnissen abgeleiteten Faktoren wird durch die Ship Domain lediglich der historische Indikator abgebildet, sofern die Ship Domain datengetrieben hergeleitet wurde. Für den Fall, dass auch Verkehrsregeln mit in die Herleitung eingeschlossen wurden, greift auch der kontextbasierte Indikator. Die fahrerreaktionsbasierte Indikation und die funktionsbasierte Indikation greifen hier nicht.

Es lässt sich abschließend festhalten, dass Einsatz und Nutzung eines Sicherheitsbereichs bei der Kollisionsbewertung vielfältig sind und eine binäre Betrachtung für die Erkennung von Beinahekollisionen basierend auf der Distanz nicht ausreichend ist.

2.3. Maritime Infrastruktur

Nachdem bereits in den vorangegangenen Abschnitten ein Überblick über die Unfallforschung im Verkehrswesen gegeben wurde und Grundlagen zum Thema maritimer Kollisionserkennung anhand der Ship Domain vorgestellt wurden, soll nun verschärft auf die existierenden, maritimen Technologien zur Verkehrsüberwachung und Unfallvermeidung eingegangen werden. Hieraus sollen im Konzept in Kapitel 4 Möglichkeiten zur Nutzung dieser Technologien abgeleitet werden, um eine Datenbasis zur automatisierten Untersuchung von Begegnungssituationen mithilfe der existierenden Infrastruktur aufzubauen. Anhand dieser soll auch bewertet werden, welche Informationen für eine ausreichende Repräsentation der Begegnungen vorhanden sind und welche Informationen vom derzeitigen Stand nicht abgedeckt werden.

Von großer Bedeutung ist nicht nur die Schaffung eines Lagebildes, sondern auch die Kommunikation und Bereitstellung dieser Informationen. Die weltweit angedachte Erfassung aller Schiffsbewegungen mittels Transponder (maritime surveillance), sowie die Lokalisierung und Darstellung auf einem maritimen Lagebild (situational awareness), stellt dafür einen ersten Ansatz zur Verbesserung der Sicherheit auf See dar [Jopp14, S.16].

Zur Unterstützung der Seeraumüberwachung und Lagebilderstellung, sind bereits einige Sensoren im Einsatz, welche im Folgenden näher erläutert. Diese sollen der Übersichtlichkeit halber im Folgenden in die Bereiche Brückensysteme (Egoperspektive der Schiffsführung), Kommunikationssysteme (zum Austausch zwischen Verkehrsteilnehmenden) und Verkehrsraumüberwachungssysteme (Makroperspektive der Begegnungssituation) aufgliedert werden. Da im Kapitel 2.2.2 zu der Ship Domain bereits Wetterinformationen als

eine der relevanten Kontextinformationen identifiziert wurde, ist hierfür ein zusätzlicher Absatz zur Vorstellung nutzbarer Systeme vorgesehen.

Brückensysteme. Das älteste System zur Kollisionsverhütung auf der Brücke ist das Radar. In seiner üblichen Form wandelt der Radar-Empfänger ein Echosignal um und verarbeitet das hochfrequente Signal zu einem Videosignal. Diese Videoimpulse werden anschließend maßstabsgetreu dargestellt [BoWN14]. Das Radar wird heutzutage standardmäßig mit einer Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) eingesetzt [BeHu16, S.200]. Die ARPA-Anlage extrahiert aus dem Radarvideo notwendige Informationen, welche die Schiffsführung bei der Entscheidungsfindung unterstützt. Neben manueller und automatischer Zielerfassung und -verfolgung bestimmt die ARPA auch Kurs und Geschwindigkeit (Zielbewegung) der anderen Verkehrsteilnehmenden [BeHu16, S.200 ff.]. Auf dieser Basis wird der Ort der dichtesten Annäherung (engl. Closest Point of Approach; CPA), die Zeitdauer bis zur dichtesten Annäherung (engl. Time to Closest Point of Approach; TCPA), sowie die Distanz am und zum Zeitpunkt der dichtesten Annäherung (engl. Distance at/to Closest Point of Approach; DCPA), bestimmt und gibt gegebenenfalls Warnungen aus [Gold08, LiHu06].

Bekanntete Nachteile, die sich aus der Nutzung von Radar bzw. ARPA ergeben, sind unter anderem, dass der Radius, in welchem Objekte erkannt werden können, abhängig von der Höhe der Antenne und der Erdkrümmung sind. Die Genauigkeit des Radars hängt von der horizontalen Strahlbreite der Pulse ab. Des Weiteren hängt die Erkennung von Objekten, mithilfe des Radars, in erster Linie von der Größe, sowie der Beschaffenheit des Ziels ab. Auch Hindernisse zwischen dem Radarantenne und dem Ziel führen zu fehlender Detektion aufgrund des Radar-Schattens [LiHu06, S.184]. Zwar ist es in der Praxis sinnvoll, zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Information über alle sich im Umkreis befindlichen Ziele zu haben, jedoch müssen Informationen, über die sich bewegende Objekte, zusätzlich ausgewertet werden. Vor allem der Kurs und die Fahrtgeschwindigkeit sind relevant und müssen beim Radar anhand der Positionsdaten ermittelt werden [Gold08]. Als Standard für den Radarvideoaustausch kann ASTERIX (CAT-240) genannt werden. Viele Radarhersteller entwickeln jedoch eigene proprietäre Schnittstellen, was eine Standardisierung von Verarbeitungsprozessen deutlich erschwert.

Seit 2000 ist das Automatic Identification System (AIS) als zusätzliches System zum Schutz vor Kollisionen dazugekommen [Inte98a, S.1]. Durch AIS lässt sich ein wesentlich größeres und genaueres Lagebild erstellen, vorausgesetzt die anderen Verkehrsteilnehmenden sind ebenfalls mit AIS ausgerüstet. Bei AIS handelt es sich um ein schiffseitiges Funksystem, mit dessen Hilfe sich Schiffe untereinander (ship-to-ship), ausführliche Informationen über ihren Zustand senden. Auch eine Kommunikation zu den VTS (ship-to-shore) ist möglich

[LiHu06]. Durch AIS lassen sich auf elektronischem Wege, wesentlich mehr Informationen von anderen Teilnehmenden empfangen als beim Radar. Neben der Position, können ebenfalls Informationen wie die Maritime Mobile Service Identity (MMSI), der Navigation Status (vor Anker oder in Fahrt), Geschwindigkeit (engl. speed over ground; SOG), Kurs (engl. course over ground; COG), die Ausrichtung des Schiffes (engl. true heading), sowie ein Zeitstempel in Coordinated Universal Time (UTC) empfangen werden [PCBK09]. Diese Informationen werden, je nach Geschwindigkeit des Schiffes, alle zwei bis zehn Sekunden (Klasse-A-AIS) gesendet. Befindet sich das Schiff vor Anker, reduziert sich das Intervall auf drei Minuten [PCBK09]. Über AIS werden neben den dynamischen Informationen (engl. dynamic information) in einem Intervall von sechs Minuten, unabhängig vom Status, unter anderem fahrtrelevante Informationen (engl. voyage related information) wie der Schiffstyp, der Tiefgang des Schiffes, der Zielort, sowie die voraussichtliche Ankunftszeit (engl. estimated time of arrival; ETA) gesendet. Aber auch statische Informationen (engl. static information) wie die IMO Nummer, das Rufzeichen des Schiffes (Callsign), der Name des Schiffes, die Bemaßung bzw. die genaue Position der Antenne des Positionierungssystems (Beschrieben über die Distanz zur Steuerbord-, Backbord-, Bug- und Heckseite), wird übertragen [PCBK09]. Nachteile bei der Nutzung von AIS im Vergleich zu ARPA sind etwa, dass andere Schiffe ebenfalls mit dem AIS gerüstet sein müssen, um Daten empfangen und senden zu können. Dies ist problematisch, da kleine Schiffe unter bestimmten Bedingungen, von der AIS-Rüstpflicht befreit sind. Auch die Frequenz der gesendeten AIS Nachrichten ist bei diesen Schiffsklassen und AIS Geräten (Klasse-B-AIS) geringer (alle 30 Sekunden). Aus diesem Grund, darf in der Berufsschiffahrt AIS nur in Kombination mit einem Radar genutzt werden [KaSt15]. Weiter ist man auf die korrekte Übertragung der Informationen durch die anderen Verkehrsteilnehmenden angewiesen (self-reporting Prinzip).

Um sich sicher in unbekanntem Seegebieten fortzubewegen, sind Seekarten unerlässlich. Wichtige Informationen, wie Wassertiefe, Küstenverläufe oder Betonung, die das nautische Personal zur Planung der Route benötigt, sind in der Seekarte verzeichnet und werden stetig aktualisiert. Die permanente Aktualisierung und Überarbeitung der Seekarten übernimmt die Internationale Hydrographische Organisation (engl. International Hydrographic Organization; IHO). Die Nutzung einer Seekarte ist fest vorgeschrieben [Hech99, Wein09]. Das übergeordnete Ziel der IHO ist es, alle nautischen Seekarten und andere Dokumente in ein einheitliches Format zu bringen und einen Standard für hydrografische Daten zu etablieren [Inte00b]. In der Berufsschiffahrt haben sich mittlerweile auch elektronische Seekarten etabliert. Diese Electronic Navigational Charts (ENC), stehen in dem S-57 Standard zur Verfügung und lassen sich mithilfe eines Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) darstellen. Die Funktionen einer ECDIS reichen vom allgemeinen

Kartenmanagement, über diverse Planungsfunktionen bis hin zur Reiseüberwachung [Ihou17]. Der S-57 wurde im Jahr 1992 als „Transfer Standard für digitale hydrografische Daten“ veröffentlicht und 2000 in der Version 3.1 ruhen gelassen. Zum Austausch und der Vereinheitlichung von hydrografischen Daten wurde 2010 der S-100 Standard in der Version 1.0 veröffentlicht [Iho10]. Aus dieser Produktfamilie wird beispielsweise der Standard S-101 den S-57 langfristig ablösen. S-100 ist ein Rahmendokument, das für die Entwicklung digitaler Produkte und Dienstleistungen für hydrografische, maritime und Geoinformationssystem (GIS)-Gemeinschaften gedacht ist. Es besteht aus mehreren Teilen, die auf den von der Internationalen Organisation für Normung, Technisches Komitee 211 (ISO/TC211), entwickelten Geo-Standards basieren. Alle auf der Schiffsbrücke anfallenden Informationen müssen gebündelt und ergänzend zur ENC angezeigt werden [BeHu16, S.138 ff.]. Durch die Kombination der verschiedenen Eingabegeräte, wie beispielsweise AIS, Seekarten, Radar, Echolot und Log kann das System die zur Verfügung stehenden Informationen im Vorfeld verarbeiten und gegebenenfalls akustische und visuelle Alarme an das Brückenpersonal kommunizieren (automatische Reiseüberwachung) [BeHu16, S.242 ff.].

Zur sicheren Navigation auf dem Wasser ist eine genaue und regelmäßige Positionierung in Lage und Ort notwendig. Die beiden Werkzeuge, die zur Bestimmung der Nordrichtung in den SOLAS zugelassen sind, sind der Magnet- und der Kreiselkompass [BeHu16, S.117 ff.]. Während der Magnetkompass die magnetische Nordrichtung (missweisend Nord; engl. magnetic north) anhand des Erdmagnetfelds bestimmt, orientiert sich der Kreiselkompass an der Erdrotation und zeigt die wahre Nordrichtung (rechtweisen Nord; engl. true north) an [BeHu16, S.117 ff.]. Mittels Kompasses und Log (Geschwindigkeitsmessung) kann die Schiffsführung die Position auch ohne direkte Messung abschätzen („koppeln“). Auch in der maritimen Navigation hält das Globales Navigationssatellitensystem (engl. global navigation satellite system – GNSS) Einzug [BeHu16, S.104 ff.]. GNSS ist ein Sammelbegriff für existierende oder zukünftige satellitenbasierte Navigationsunterstützung. Die geläufigste Umsetzung dieser Services ist das Projekt Global Positioning System (GPS) der United States (US) [Xu03]. Je nach Umsetzung wird hier das Signal von mindestens drei bis vier Satelliten benötigt (Trigonometrie). Dabei teilen die Satelliten über Funkcodes ihre Position und Uhrzeit mit. Durch die Bestimmung der Pseudoentfernungen (Distanz zwischen einem Sender und einem Empfänger aus der Laufzeit des Funksignals) zu mehreren Satelliten kann so die aktuelle Position auf der Erdkugel bestimmt werden. Aufgrund des Uhrenfehlers kann die ermittelte Position mehrere Meter von der exakten Eigenposition abweichen. Diese Ungenauigkeit sinkt jedoch mit der Anzahl der verfügbaren Satelliten. Um die Genauigkeit der Positionierung zu steigern, kann weiter das differentielle globale Positionierungssystem (engl. Differential Global Positioning System; DGPS) Verfahren helfen [DoNR09]. Eine

Referenzstation (ortsfeste GNSS-Antenne), deren Position zuvor exakt bestimmt wurde, berechnen den Fehler des Bahn- und Zeitsystems und senden Korrekturdaten an die verfügbaren Empfänger (engl. Real-Time Kinematik – RTK) [BaWa03]. Die Orts- und Zeitbestimmung (Position Navigation and Timing – PNT) muss zur Sicherheit des Schiffes resilient gegen Störungen ausgelegt werden. Dazu werden die Positionsdaten aus verschiedenen Quellen überprüft und zu einer abgesicherten Information zusammengeführt. Dafür werden z.B. neben den Satelliten auch Bewegungsdaten wie etwa von Inertial Measurement Units (IMU) mit den Satellitensignalen abgeglichen, um Verbindungsabbrüche oder Störungen auszugleichen [FiRa11, NEEH12].

Auf modernen Schiffsbrücken halten verstärkt integrierte Navigationssysteme (engl. Integrated Navigation System – INS) Einzug [Imo07]. Diese integrieren die oben genannten (Sensor-)Informationen, um bei Aufgaben wie Routenüberwachung, Kollisionsverhütung, Ortsbestimmung oder Reiseplanung zu assistieren. Auch Objektidentifizierung durch Radar- und AIS-Zieldaten, sowie ECDIS und ENC Referenzobjekte sind Aufgaben eines INS. Die INS erhöhen durch den verbesserten Gesamtüberblick und einer Qualitäts- und Prozesskontrolle die Sicherheit der Navigation [BeHu16, S.238 ff.]. Auch ein intelligentes Alarmmanagement sorgt für eine Reduzierung von Fehlalarmen und dadurch zu einer Verminderung der Arbeitsbelastung von WachoffizierInnen. Das Ziel sind nicht mehr Daten an einem Ort zu bündeln, sondern bessere Daten bereitzustellen. Die bereitgestellten Daten durchlaufen vor ihrer Darstellung im System einer Integritätskontrolle. Daten wie beispielsweise Geschwindigkeit, werden an mehreren Stellen gemessen und auf Korrektheit überprüft [BeHu16, S.238 ff.]. Da es sich bei INS um einen Sammelbegriff handelt, unterscheiden sich die verschiedenen Ausführungen in Art und Umfang. Für die diversen Aufgabenbereiche können demnach unterschiedliche (multifunktionale) Arbeitsplätze bereitstehen [BeHu16, S.238 ff.].

Kommunikationssysteme. Zur Kommunikation der Verkehrsteilnehmenden, sowie der Kommunikation mit der Landseite wurde schon früh auf Seefunk (Radiokommunikation) gesetzt [Inte04]. Durch fest definierte Seefunkfrequenzbänder kann jede Seefunkstelle mit anderen Schiffen oder Landstationen kommunizieren. Neben dem Austausch zwischen den Verkehrsteilnehmenden und der Anmeldung an Schleusen ist der Seefunk nach wie vor das wichtigste Werkzeug zur Koordination von SAR-Operationen [BeHu16, S.377 ff. NUWW18, S.485]. Dabei wird von der Meldung der Vorfälle bis hin zur Koordination der Rettungsfahrzeuge (Zu Wasser und zur Luft) über den Sprechfunk koordiniert. Durch die Einführung des Digital Selective Calling (DSC) wurde dieser Prozess noch weiter vereinfacht und standardisiert [BeHu16, S.377 ff.]. Auch der Austausch von AIS Nachrichten erfolgt über den

Seefunk [PCBK09]. Die International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA) erarbeitet einen International Telecommunication Union (ITU) Standard Namens VHF Data Exchange System (VDES) der auf dieser Funkschnittstelle aufsetzt und kommuniziert [LRWC19]. Mit VDES sollen verschiedenen Services die eine Schiff-zu-Schiff oder Schiff-zu-Land-Kommunikation benötigen realisiert werden können. Denkbar sind z.B. die Abwicklung von SAR Operationen, Verteilung von maritimen Sicherheitsinformationen (engl. Maritime Safety Information; MSI) oder auch die Unterstützung von VTS. Hierfür soll unter anderem das dritte Teilsystem von VDES genannt VHF Data Exchange (VDE) zum Einsatz kommen, welches eine höhere Datenrate erreicht und sehr flexibel in der Nutzung ist. VDE sieht zudem auch eine Komponente speziell für Satellitenkommunikation vor [LRWC19]. Das zweite substantielle Kommunikationsmedium auf See ist demnach die Satellitenkommunikation. Die Satellitenkommunikation ist wichtig, um ortsunabhängig die zahlreichen Dienste auf der Brücke nutzen zu können und auch den Informationsaustausch (mit Reedereien oder SAR-Koordinationsstellen) in Regionen gewährleisten zu können, die nicht von Ultrakurzwelle (UKW) oder Mittelwelle (MW) erreicht werden können [BeHu16, S.379 ff.]. Überwiegend kommen hier die Satelliten des Unternehmens inmarsat zum Einsatz, die neben den herkömmlichen Diensten zur satellitengestützten Telefonie auch Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) Dienste anbietet. Unter dem GMDSS, versteht man alle technischen Einrichtungen, Dienststellen und Regeln zur weltweiten Hilfe bei Notfällen und zur Sicherung der Schifffahrt [BeHu16, S.395 ff.]. Dazugehört der im Folgenden vorgestellt Seefunk und Navtex wie aber auch Notfalltransponder, Satellitensysteme mit Bodenstationen sowie Einsatzzentralen für Notfälle (engl. Maritime Rescue Coordination Centers, MRCC).

Die Schwierigkeit beim Austausch von Informationen besteht darin, dass die Daten auf dem Meer über Funk übertragen werden müssen. Daher ist eine Kommunikation ausschließlich über Satelliten oder UKW möglich.

Verkehrsraumüberwachungssysteme. Verkehrszentralen betreiben einen VTS, der sowohl in Verkehrstrennungsgebieten, Küstengewässern und für Schleusen- und Hafenansteuerungen eingerichtet wurde. Die Verkehrszentralen überwachen und lenken den maritimen Verkehr in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsbereich (Revier) und sind verantwortlich für die dortige Verkehrssicherung [Iala16]. Zu den weiteren Aufgaben einer Verkehrszentrale zählen die Verhinderung von Kollisionen, Grundberührungen und Umweltgefahren. Schiffspersonal wird von den Verkehrszentralen regelmäßig über die Verkehrs- und Wetterlage informiert (Lagemeldungen per UKW) und erhält bei Bedarf landseitige Navigationsunterstützung [NUWW18]. Auch hier kommen Technologien wie AIS und Radar zum

Einsatz. Zur Gewährleistung der Sicherheit auf See, ist es notwendig ein spezielles Wissen über die maritimen Räume (engl. Maritime Domain Awareness) aufzubauen [Jopp14, S.16]. Die SAR Einsätze werden ebenfalls über die Verkehrszentralen geleitet und koordiniert.

Seit dem 31. Dezember 2008 müssen alle Passagierschiffe, Frachter ab 300 BRZ (Bruttoreaumzahl; engl. Gross Tonnage) und Bohrinseln mit Long-Range Identification and Tracking (LRIT) ausgestattet sein (MSC.1/Circ.1259/Rev.8) [Imo06]. Damit ist es technisch möglich weltweit auf Daten wie Position, Zeitpunkt und Schiffsidentifikation von Schiffen zuzugreifen (der Zugriff ist allerdings beschränkt). Der Dienst wird über die Satellitensysteme (Inmarsat-C oder Iridium) oder Kurzwellen- oder Grenzwellennutzung abgewickelt [BeHu16, S.221]. Sie decken mithilfe ihres „FleetBroadband“ nahezu den gesamten Globus ab und gewährleisten dadurch einen weltweiten Zugriff auf die Daten [Inma15].

Weiter erfolgt von Landseite auch die Kontrolle der Fischerei. Die Fischerei unterliegt strengen Regularien und Fischereifahrzeuge erhalten fest zugewiesene Fanggebiete, in welchen Sie sich aufhalten und fischen dürfen. Hierbei kommt das satellitenbasierte Vessel Monitoring System (VMS) zum Einsatz [LeS]10]. Mittels einer sogenannten Blue Box werden automatisch Position, Kurs und Geschwindigkeit des Schiffes an eine entsprechende Fischereibehörde übertragen, um so illegalem Fischfang vorzubeugen.

Alle oben genannten Sensoren tragen zur Erhöhung des Lagebewusstseins und -verständnisses bei. Unter beiden Begriffen versteht man die „gezielte Sammlung, Aufbereitung, Auswertung und Weitergabe von Informationen zur Entscheidungsunterstützung der Akteure, die den maritimen Raum nutzen“ [Borc14, S.66].

Wetterdienste. Meteorologische Informationen zur Route werden von den nationalen Wetterdiensten über das Global Telecommunication System (GTS) ausgetauscht. Diese leiten aus Wetterbeobachtungen Wettervorhersagen oder Monatskarten (engl. Pilot Charts) ab. Während der Reise nutzt die Schiffsführung synoptische Karten (Wetterkarten), die während der Reise über Faksimile (Wetterfax) oder über das Internet bereitgestellt werden [BeHu16, S.297]. Diese beinhalten Isobaren und Fronten, welche vom Computer analysiert und interpretiert werden können. Aus diesen lassen sich entsprechend Wind und Seegang ermitteln [BeHu16, S.297 ff.].

Sicherheitsinformationen und unmittelbare Wetterwarnung (über Starkwind, Sturm oder Wirbelstürme) werden über NAVTEX an alle Schiffe im Radius von etwa 400 Seemeilen kommuniziert. Über dieses Informationssystem werden neben den Wetterwarnungen auch Navigationswarnungen und SAR Informationen übermittelt [BeHu16, S.299 ff.]. NAVTEX-Meldungen werden weltweit auf 518 kHz/4209.5 kHz in englischer Sprache ausgestrahlt.

Die Frequenz 490 kHz ist meist für die vorherrschende Landessprache. Einige NAVTEX-Sender strahlen neben den Wetterwarnungen auch Seewetterberichte aus. Seewetterberichte sind international nicht standardisiert und weisen daher keine maschineninterpretierbare Form auf [BeHu16, S.299 ff.]. Die ITU hat ITU-R M.2010 (Mittelwellensystem) bzw. ITU-R M.2058 (Kurzwellensystem) mit NAVDAT eine technische Ergänzung von NAVTEX standardisiert, die bisher aber nicht ausrüstungspflichtig ist [Inte12].

Die maritime technische Infrastruktur ist bereits zu großen Teilen darauf ausgelegt, die Verkehrslage, sowie potenziell gefährliche Begegnungen von erfahrener Personal in nahen Küstengewässern zu beobachten und einzuschätzen. Hierfür existiert eine etablierte Schiff-zu-Land-Kommunikation, die unter anderem im Zuge der Einführung von VTS Stationen aufgebaut wurde. Diese Tatsache bietet bereits eine gute Grundlage für die Bewertung und Erkennung von Beinahekollisionen in Seegewässern.

2.4. Moving Objects in Databases

Nachdem in Abschnitt 1.2 bereits festgestellt wurde, dass die Unterscheidung zwischen Kollision und Beinahekollision, erst ex post durchgeführt werden kann, soll das daran anschließende Kapitel dazu dienen, die etablierten Möglichkeiten zur Speicherung von Begegnungen und Schiffstrajektorien in Kombination mit den relevanten Kontextinformationen auszuloten. Demnach werden nun die Herausforderungen und Technologien bei der Speicherung und Verarbeitung von spatiotemporalen Daten aufgezeigt.

Bei Datenbanken, welche nicht nur geografische, sondern auch temporale Daten speichern und verarbeiten können, spricht man von spatiotemporalen Datenbanken. Diese spatiotemporalen Datenbanken, bilden die Grundlage für den Umgang mit beweglichen Objekten (engl. Moving Objects). Es gibt verschiedene Arten von Moving Objects, welche zunächst einmal voneinander abgegrenzt werden müssen. Hauptsächlich lassen sich Moving Objects, in bewegliche Punkte (Moving Points) und bewegliche Flächen (Moving Regions) unterteilen. Zwar gibt es auch weitere Arten, die von spatialen Datenbanken unterstützt werden, wie beispielsweise sich bewegende Linien (Moving Lines), Netzwerke (Moving Networks) oder Partitionen (Moving Partitions). Konkrete Beispiele dieser Objekte sind jedoch eher seltener anzutreffen [GüSc05, S.23].

Das Anwendungsgebiet von Moving Objects, lässt sich grob in zwei Themengebiete aufteilen. Zum einen kommen Moving Objects im Location Management zum Einsatz, wenn es darum geht, die Daten dauerhaft aktuell zu halten. Beim Location Management müssten die Positionen in der Datenbank regelmäßig aktualisiert werden, wodurch die Update-Rate ansteigt. Dies hat eine permanente Auslastung des Speichergeräts zur Folge, wodurch der

Zugriff auf die Datenbank verlangsamt und erschwert wird. Bei einer Reduzierung der Update-Rate könnte die Aktualität der Daten nicht mehr gewährleistet werden (vgl. Abbildung 15).

Aus diesem Grund ist es wichtig einen Kompromiss zu finden, um die Position der Objekte möglichst aktuell zu halten, ohne eine fortwährende Update-Rate zu verwenden. Eine mögliche Lösung ist es, die Update-Rate zu verringern, jedoch nicht die aktuelle Position des Objekts zu speichern, sondern vielmehr einen Bewegungsvektor (motion vector) zu hinterlegen, um die exakte Position eines Moving Objects zum benötigten Zeitpunkt, selbst bestimmen zu können [GüSc05, S.21 f.].

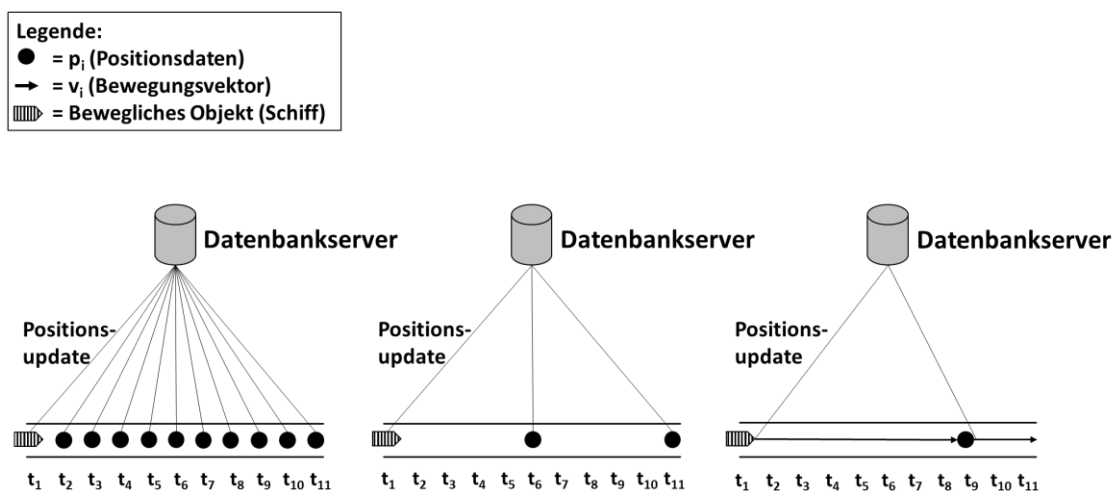


Abbildung 15: Location Management Problematik [MeDX14, S.16]

Zum anderen gibt es die spatiotemporale Datensicht auf Moving Objects. Hierbei geht es, neben der Aktualität der Daten, vor allem um die gesamte Historie. Es soll möglich sein, die Veränderungen der Daten nachzuvollziehen und gegebenenfalls die Zukunft der Daten vorhersagen zu können. Hierfür ist es nötig, die Zustände der Moving Objects, zu jedem Zeitpunkt zu speichern, sowie die damit einhergehenden Veränderungen der Eigenschaften der Objekte [GüSc05, S.21 f., MeDX14, S.2].

Die besondere Herausforderung dabei ist, dass sich bei beweglichen Objekten Position, Form, Größe und Ausrichtung im Zeitverlauf kontinuierlich ändern können, allerdings nicht zwingend gleichförmig. Ein Ansatz bei spatiotemporalen Datenbanken ist es, ausgehend von räumlichen Datenbanken die Zeit als weitere Dimension einzufügen [EGSV99]. Es kann jedoch vorkommen, dass die Zeit andere Eigenschaften als der Raum aufweist [Brin13, S.456]. Die Anreicherung zeitlicher Datenbanken um räumliche Objekte ist eine weitere Möglichkeit, bereitet allerdings bei nicht-diskreten Änderungen, wie sie bei Bewegungen üblich sind, Schwierigkeiten [EGSV99, S.279]. Anschaulich bedeutet dies, dass sich zum

Beispiel Stadtgrenzen oder Ortsteile nicht kontinuierlich über die Zeit ausdehnen, sondern bedingt durch Faktoren wie Hausbau oder Freigaben von Bauflächen unterschiedlich verändern. Dies hat einen direkten Einfluss auf die formale Beschreibung der Daten. Die Modellierung und Repräsentation wird in Kapitel 4 noch etwas ausführlicher beschrieben, soll hier aber schon einmal erwähnt werden.

In der Geoinformatik wird zur Darstellung der Geodaten innerhalb einer Datenbank auf GIS zurückgegriffen. Unter einem Informationssystem wird im Allgemeinen ein System verstanden, welches für die Aufnahme, Speicherung, Aktualisierung, Verarbeitung und Auswertung von Daten bzw. Informationen und deren Wiedergabe zuständig ist. Dieses System umfasst grundsätzlich die vier Komponenten Hardware, Software, Daten und die anwendende Person [Lang13, S.319 f.].

Bei Geoinformationssystemen handelt es sich um eine spezielle Art von Informationssystem, welches Geoobjekte der realen Welt modellieren und in einem Informationssystem abbilden können. Diese GIS enthalten für die Verarbeitung von raumbezogenen Informationen, spezielle Werkzeuge und Funktionen, welche von anderen Informationssystemen nicht bereitgestellt werden [Lang13, S.319].

Zwar unterstützen GIS, Methoden zur Auswertung und Analyse der Daten, das Hauptaugenmerk liegt hierbei jedoch auf einer geeigneten Repräsentation von Informationen. Das Ziel dieser Auswertung ist nicht, wie bei Analysetools (Anwendungssystemen), neues Wissen aus den vorhandenen Informationen zu extrahieren, sondern die Informationen in eine interpretierbare Form zu bringen. Diese Art von Analyse schließt komplexe Methoden zur Wissensgenerierung aus.

Räumliche Analysefunktionen von GIS lassen sich grob in die drei Gruppen Generierung von Zonen (sog. Buffer-Funktionen), räumliche Überlagerungen (sog. Overlay-Funktionen), sowie die Verarbeitung von Grenzen (sog. Boundary-Funktionen) unterteilen [Lang13, S.341].

2.4.1. Geodatenschemata

Nachdem der technologische Rahmen zur Speicherung von Bewegungsdaten beschrieben wurde, soll nun vorgestellt werden, welcher Stand der Technik zur Frage wie und in welcher Form die Daten gespeichert werden können, existiert. Die für die formale Beschreibung von Geodaten etabliertesten Standards wurden von der ISO und dem Open Geospatial Consortium (OGC) definiert. Insbesondere zu nennen sind hier die Feature Geometry und das Simple Feature Modell [Brin13, S.66]. Ein weiterer relevanter Standard ist SQL/MM Spatial [Sto103].

Die Feature Geometry entspricht der ISO-Norm 19107 Geographic Information – Spatial Schema und besteht aus den beiden Paketen Geometrien und Topologien. Der Standard stützt sich zudem auf die ISO-Norm 19111, zu räumlicher Referenzierung durch Koordinaten und auf die in ISO-Norm 19103 beschriebenen Basisobjekte. Feature Geometry unterstützt räumliche Gebilde mit bis zu drei Dimensionen. Linien in der Feature Geometry können sowohl gerade als auch kurvig geschwungen sein. Ebenso flächige oder räumliche Objekte [Brin13, S.67 ff.].

Gegenüber der Feature Geometry ist der Umfang der Simple Feature Modell reduziert. Es handelt sich um Reduzierungen, die die computergestützte Verarbeitung von Geometrien erleichtern. Beschrieben wird das Simple Feature Modell in der ISO-Norm 19125. Das Simple Feature Modell beschreibt Objekte mit bis zu zwei Dimensionen. Eine Linie wird als Kante zwischen zwei Punkten beschrieben. Polylinien lassen sich durch mehrere Wegpunkte beschreiben, Polyeder durch die Eckpunkte des Randes [Brin13, S.77 ff.].

Der ISO/IEC 13249-3:2016 [Inte16] Standard SQL/MM Spatial ist ein internationaler Standard, der beschreibt, wie SQL-Datenbanken räumliche Daten speichern und verarbeiten [Stol03]. Der Standard beruht auf dem Simple Feature Model. Anders als das Simple Feature Model unterstützt SQL/MM Spatial auch elliptische und Freiformkurven [Brin13, S.93].

Im Kontext von Moving Objects in Databases (MOD) werden die Vektoren, die die Position beweglicher Objekte über die Zeit angeben, als Trajektorien bezeichnet [EGSV99, S.275]. Bei der Verwaltung von Trajektorien ist die Anzahl der explizit gespeicherten Wegpunkte für den Speicherplatzbedarf und die Anfragezeit ein entscheidender Faktor [AbNI18, S.493, DYGL15, S.1919, Huan14]. Für die anfallenden Wegpunkte gibt es zum einen die Menge der Wegpunkte, die bei der Datenerhebung anfallen und zum anderen die Menge der Wegpunkte, die für die Erstellung von Trajektorien verwendet werden. Bei der zweiten Menge handelt es sich um eine Teilmenge der ersten. Eine sich daraus ergebende Fragestellung ist, wie sich die Menge der erfassten Wegpunkte möglich weit reduzieren lässt, ohne dass die Qualität der Trajektorien darunter leidet [AbNI18]. Verlustfrei ist dies dann möglich, wenn zwischen drei aufeinanderfolgenden Wegpunkten Richtung und Geschwindigkeit unverändert sind. In dem Fall ist es möglich, den mittleren Punkt zu verwerfen. Die Güte der Berechnung von Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung aus Trajektorien hängt von der Anzahl der Wegpunkte ab. Da beide Größen intervallbezogen sind, lässt sich nur die durchschnittliche Richtung und Geschwindigkeit zwischen den Wegpunkten berechnen [Pfos02, S.4]. Je geringer der Zeitraum zwischen zwei Wegpunkten, desto näher sind die Durchschnittswerte an der tatsächlichen Geschwindigkeit und Richtung eines Objektes zu jedem Zeitpunkt.

2.4.2. Spatial Data Warehouse

Es wurden die wesentlichen Grundlagen zur Speicherung und Modellierung von spatiotemporalen Daten vorgestellt. Um aus den reinen Daten Informationen zu machen, müssen diese zunächst aufbereitet und anschließend analysiert und in eine aufbereitete Form gebracht werden. Darüber hinaus ist es erforderlich die aufgezeichneten Daten in Relation zu den relevanten Kontextinformationen zu bringen. Die abgeleiteten Informationen müssen so verfügbar gemacht werden, dass sich aus Ihnen Handlungsempfehlungen und Erkenntnisse ableiten lassen. Für diese Aufgaben hat sich in der Wirtschaftsinformatik das Data Warehouse System etabliert.

Aufgrund fortschreitender Digitalisierung fallen vermehrt Daten aus heterogenen und räumlich getrennten Quellen an. Um diese Daten, wie zuvor erwähnt, für einen Analyseprozess und eine Entscheidungsunterstützung nutzbar zu machen, kommen sogenannte Data Warehouses (DW) zum Einsatz. Diese Data Warehouses zeichnen sich durch folgende Charakteristiken aus [Fark11, S.5]:

“a data warehouse is a subject-oriented, integrated, non-volatile, and time variant collection of data in support of managements decisions.”

Data Warehouses vereinigen (integrated) externe heterogene Datenquellen und Datenbanken, welche auf den operativen Einsatz ausgelegt sind. Die Quellen werden bereinigt und in eine analysierbare und themenbezogene (subject-oriented) Form gebracht. Demnach liegt der Fokus von Data Warehouses auf der Integration und Analyse von erhobenen Daten. Die große Anzahl von Messungen, im Kontext von FOT und NDS die üblicherweise über Sensoren aufgenommen wird, generieren kontinuierlich Daten die persistent gespeichert werden (non-volatile) [DaSp06, S.3]. Vor allem die Zeit spielt für die Reproduzierbarkeit der Ereignisse eine wesentliche Rolle (time-variant). DW verfolgen eine strikte Trennung zwischen den operativen und den analytischen Systemen. Dies resultiert aufgrund der schlechten Performance von Analysen auf operativen Datenbanken in einer Entkopplung dieser beiden Systeme. Hierbei ist die Staging Area eher auf Transaktionen ausgelegt, wobei das Warehouse für Analysen optimiert wurde (vgl. Abbildung 16). Dabei lassen sich die operativen Daten in ein einheitliches Datenformat überführen und auch die Datenqualität durch das Preprocessing erhöhen [Holt01, Jung00]. Die Datenqualität ist ein nicht zu vernachlässigender Faktor für die Aussagekraft von Analyseergebnissen. Die Überführung der Daten erfolgt durch den sogenannten Extraktion-Transformation-Laden-Prozess (ETL-Prozess). Das finale DW stellt das Bindeglied zwischen den Quelldatensystemen und den Anwendungen dar. Da es für eine Vielzahl von Anwendungen vorgesehen ist spielt auch die Generizität des zugrundeliegenden Datenmodells (vgl. Kapitel 4) eine wesentliche Rolle. Die grundlegende

Struktur eines DW System ist definiert durch die Bereiche Operational Source Systems (Data sources), Data Staging Area, Data Presentation Area (Warehouse/Data Marts/Meta Data), sowie den Data Access Tools (Users) [KiRo02, S.7].

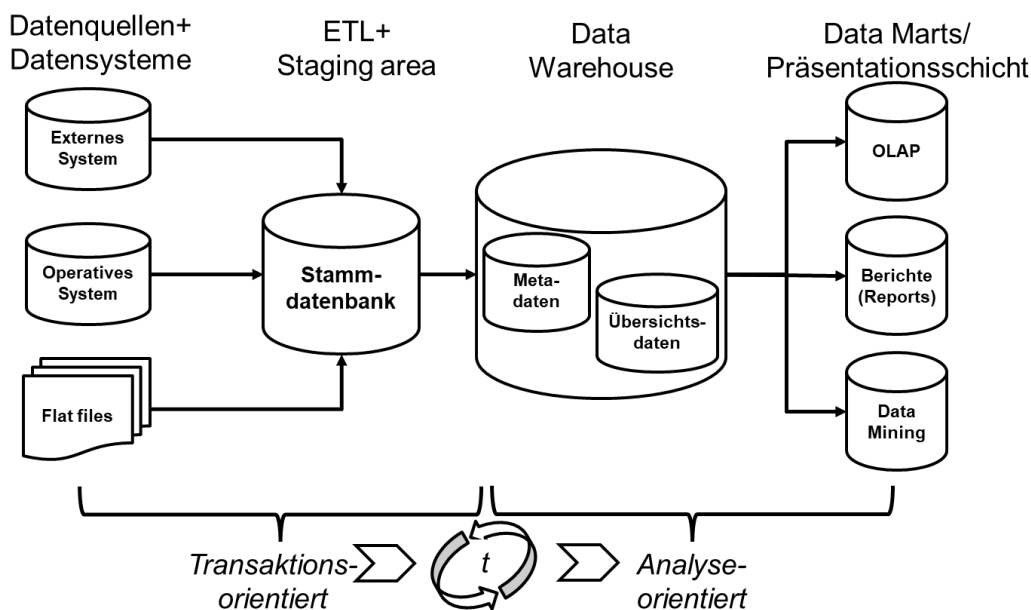


Abbildung 16: Data Warehouse Architektur nach [Fark11, S.67]

Vor allem aggregierte Daten wie Metadaten (engl. Meta Data) oder Übersichtsdaten (engl. Summary Data) sind für die Entscheidungsfindung hilfreich, da sie unter anderem die zeitliche Veränderung der vergangenen und gegenwärtigen Daten repräsentieren. Auch Prognosen oder Vorhersagen über zukünftige Veränderungen lassen sich mithilfe dieser treffen [BéHa09, S.54]. Aufgrund der starken räumlichen und zeitlichen Verbindung der Daten im Kontext von Verkehrsdaten oder anderen beweglichen Elementen, vor allem durch die Existenz einer Position (in einem Koordinatenreferenzsystem) innerhalb des Datenbanksystems (vgl. Kapitel 2.4) spricht man bei DWs, welche Geodaten beinhalten, zumeist von Spatial Data Warehouses (SDW) [DaSp06, S.5]. Die im Feld der Geodaten etablierten GIS sind im Gegensatz zu SDW stärker auf Transaktionen, wie Eingaben oder Änderungen der Daten ausgelegt und optimiert, weshalb Sie für die Entscheidungsunterstützung im Vergleich zu SDW eher ungeeignet sind [BéHa09, S.65]. Da die Daten in einem multidimensionalen Array gespeichert werden, spricht man häufig auch von multidimensionaler Datenanalyse [DaSp06, S.2 f.]. Vor allem die Themen Indizierung und Dimension Table Design spielen bei dem Aufbau eines Data Warehouses eine wesentliche Rolle. Eine durchdachte Gliederung nach relevanten Themen, kann dazu dienen, die Anfragezeiten zu reduzieren und Muster schneller aufzudecken (vgl. Abbildung 17).

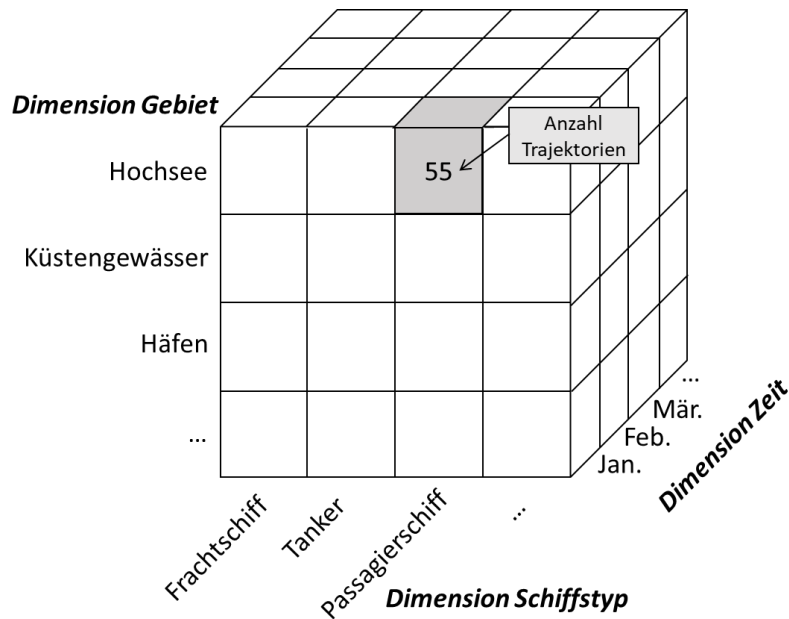


Abbildung 17: Multidimensionaler Datacube für die Speicherung von Schiffstrajektorien [Tsou16]

Der vorgestellte Stand der Technik zeigt, dass die impliziten Anforderungen die bereits durch die vorgestellten Funktionen von DW erfüllt werden, ein gutes Fundament bilden, um auf diesem ein Verfahren zur Detektion von Beinahekollisionen aufzubauen. Um nun gemäß der vorgestellten Grundlagen zu einem Ergebnis zu kommen, was die eingangs geschilderte Forschungsfragestellung beantwortet, sollen die Anforderungen die sich aus den Grundlagen ergeben, sowie die aus den Grundlagen noch nicht erfüllten oder berücksichtigten Anforderungen gesammelt und aufgelistet werden. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass das Lösungskonzept die Problemstellung adressiert und dabei den aktuellen Stand der Technik berücksichtigt.

3. Stand der Forschung und Technik

Im Folgenden soll nun der Stand der Forschung vorgestellt werden. Hierfür wird zunächst systematisch der Stand zur Beinahekollisionserkennung in der Schifffahrt durchsucht und vorgestellt und anschließend ein Blick in die anderen Verkehrsdomänen Automobil und Luftfahrt gewagt. Bevor jedoch die Forschungslücke aufgetan werden kann, werden zunächst die Anforderungen die sich aus der Problem- und Fragestellung sowie den Grundlagen ergeben gesammelt. Diese dienen als Entscheidungsgrundlage für die objektive Beurteilung der existierenden Ansätze, sowie der Prüfung der eigenen Beiträge zur Erfüllung der Forschungsziele. Auf die erhobenen Anforderungen wird im Abschluss der Kapitel 4, 5 und 6 jeweils Bezug genommen um die Anforderungserfüllung nach jedem Entwicklungsschritt zu prüfen.

3.1. Anforderungserhebung

In den vorangegangenen Grundlagenkapiteln (Kapitel 1 und Kapitel 2) wurden die unterschiedlichen Sichten (vgl. Abbildung 18), welche zur Anforderungserhebung notwendig sind, beleuchtet [KoSo98]. Zur systematischen Herleitung der zugrundeliegenden Anforderungen werden die Anforderungen folglich nach den in Kapitel 1.3 definierten Zielen kategorisiert und aus den vorgestellten Grundlagen abgeleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Grundlagen und der Problemstellung werden in den Anforderungen zusammengefasst. Zur Veranschaulichung der involvierten StakeholderInnen und besseren Nachvollziehbarkeit der Anforderungen, soll anhand eines Use-Case-Diagramms der Einsatz einer Beinahekollisionsdatenbank erläutert werden (vgl. Abbildung 19). Der Schwerpunkt der Forschung liegt jedoch wie bereits aus den Grundlagen erkennbar, weniger an der Erforschung einer Datenbank, sondern an der Herleitung eines Detektionsprozesses von Beinahekollisionen und der weiteren Nutzung dieser Begegnungssituationen. Die Datenbanken bilden hierbei lediglich den Rahmen als zentrales Bindeglied für die Arbeiten an den Beinahekollisionen.

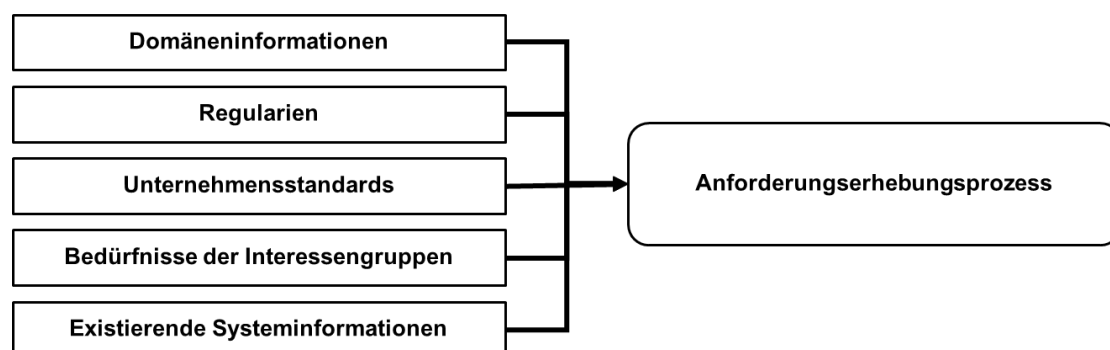


Abbildung 18: Kernbereiche zur strukturierten Anforderungserhebung nach [KoSo98]

In Kapitel 2.1 wurde bereits herausgestellt, dass Unfalldatenbanken zur Verbesserung der Sicherheit im Verkehr eingesetzt werden. Der Einsatz einer Beinahekollisionsdatenbank soll demnach auf Basis der in Abbildung 19 dargestellten Anwendungsfälle erläutert und die Anforderungen daran angelehnt werden. Unfallforschende, GutachterInnen und sachverständigende Personen arbeiten daran, den genauen Unfallhergang zu rekonstruieren und daraus Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen abzuleiten, um derartige Vorfälle künftig zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. Dabei greifen Unfallforschende auf gängige Verfahren aus der Risikoanalyse zurück, um auch Aussagen über die Häufigkeit und die Auftrittswahrscheinlichkeit der Unfälle treffen zu können [BuMo09, HuBe07]. Die Ergebnisse werden zumeist statistisch aufbereitet. SystemingenieurInnen haben ein ähnliches Vorgehen, bei der Entwicklung neuer Assistenzsysteme und Fahrfunktionen. Den zentralen Teil bildet hierbei ein aufwändiger Datenbeschaffungsprozess, der durch die Nutzung diverser Sensorik Aufschluss über das Verhalten der Probanden gibt und mithilfe von Auswertungen Erkenntnisse über Verbesserungspotenziale liefert. Aus diesen Studien (FOT oder NDS) lassen sich somit Anforderungen an ein künftiges Assistenzsystem stellen, welche im Laufe des Entwicklungsprozesses verifiziert und validiert werden müssen [DKNP06, Fotn16a, NKKD02]. Die Aufbereitung und Speicherung der Daten übernehmen Datenanalytische, welche die Daten zuvor bereinigen und in ein gefordertes Format überführen. EntwicklerInnen greifen bei der Funktionsentwicklung von Assistenzsystemen immer mehr auf KI-basierte Verfahren zurück, um sicherzustellen, dass diese Systeme auch in Situationen, die unter Umständen noch nicht erprobt oder zum Zeitpunkt der Entwicklung unbekannt sind, korrekte Entscheidungen treffen [KHDW22]. Diese KI-Komponenten werden üblicherweise mit einem Trainingsdatensatz angelernt und anschließend mit einem Testdatensatz evaluiert. Da die korrekte Funktionalität hochautomatisierter Fahrfunktionen aufgrund der damit verbundenen steigenden Komplexität nicht mehr exakt bestimmt, sondern lediglich geschätzt werden kann, werden diese Systeme anhand ausgewählter Testfälle erprobt (szenariobasiertes Testen) [WiW]17]. Diese Erprobung erfolgt in der Regel simulativ, indem ein initialer Szenarienkatalog mithilfe von Parametervariation und geführter Simulation mögliche Fehlverhalten des zu testenden Systems (SuT) systematisch provoziert. Basierend auf den Erkenntnissen kann wiederum eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Systems getroffen werden.

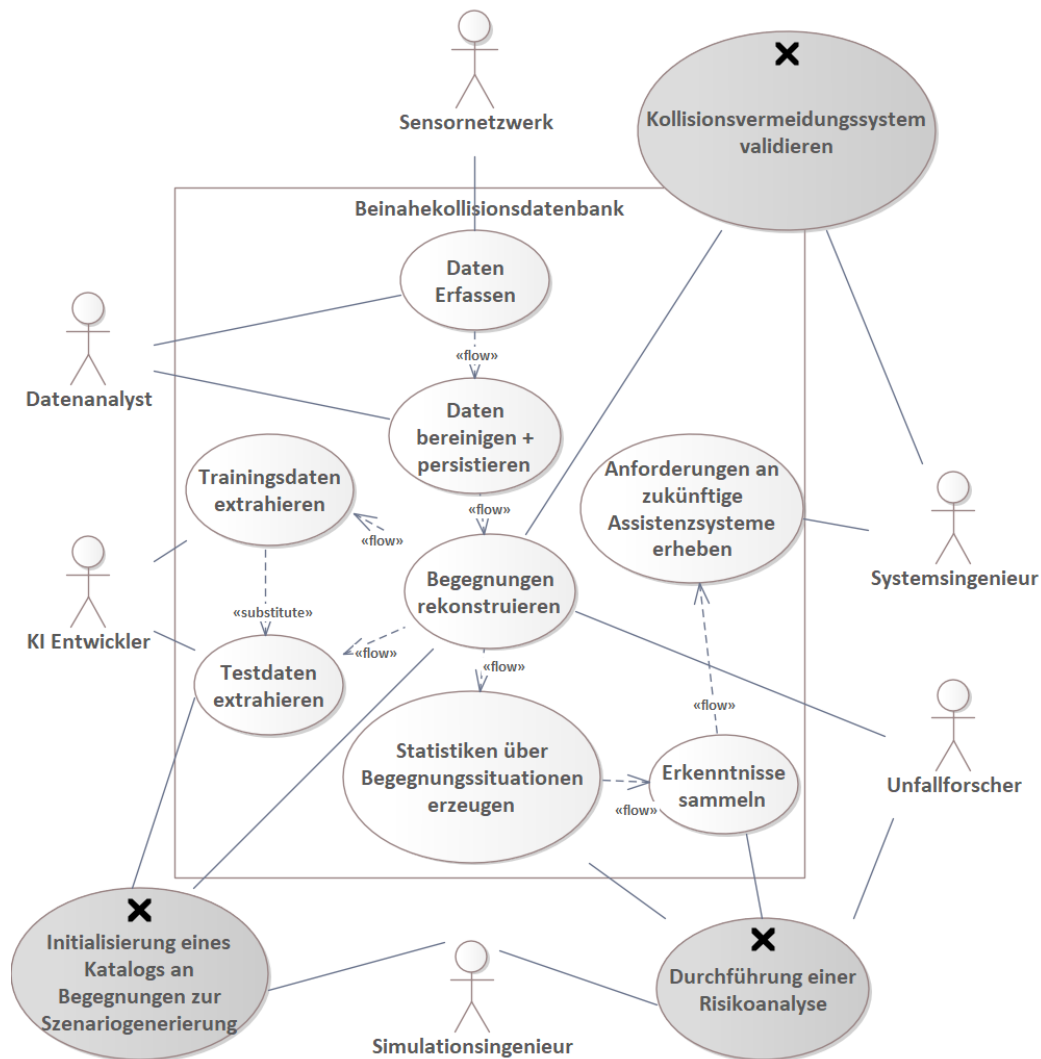


Abbildung 19: UseCase-Diagramm für eine Beinahekollisionsdatenbank

3.1.1. Anforderungen and das Datenmanagement

Zentraler Aspekt bei der Verarbeitung von Daten zum Erkenntnisgewinn ist die Datenbeschaffung und die Datenhaltung. Die Anforderungen an die Modellbildung (Z1) beziehen sich auf die Interaktion zwischen der Datenerfassung durch eine Sensorinfrastruktur und der Vorverarbeitung und Bereinigung der erfassten Daten durch Datenanalysierende. Dabei soll zum einen die Erweiterbarkeit der zugrundeliegenden Sensorik gewährleistet werden und zum anderen sollen die erfassten Daten einer Vielzahl von Anwendungszwecken gerecht werden. Um den Erkenntnisgewinn reproduzierbar zu machen und auch weiteren und aufbauenden Analysen die gleiche Ausgangslage zu bieten, muss ein Datenmanagementsystem (Z2) existieren, welches für die oben vorgestellten Anwendungsfälle als auch für künftige Anwendungsfälle eingesetzt und genutzt werden können. Bei der Datenanalyse beträgt die Aufbereitung der Daten einen Großteil des Aufwandes [DaJo03]. Demnach sollen die Daten schon in aufbereiteter Form den StakeholderInnen zugänglich gemacht werden.

Entscheidend ist hierbei jedoch, dass die Daten weiterhin in ihrer ursprünglichen Form vorliegen und die Aufbereitung von der nutzenden Person nachvollzogen werden kann.

- 1. Abbildung entscheidungsrelevanter Informationen.** Um das Kollisionspotenzial einer vorliegenden Situation ex post bewerten zu können, müssen alle für eine qualitative Bewertung notwendigen Informationen abgebildet werden [Jopp14]. Neben den Informationen, die auf der Schiffsbrücke oder dem VTS für die Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen spielt auch die aktuelle Wetterlage wie Wellengang, Windstärke und Windrichtung eine wesentliche Rolle [BuBC88, StHM08]. Diese Parameter geben einen Aufschluss über die Bedingungen auf See und können die Manövrierbarkeit des Schiffes maßgeblich beeinflussen [DeCh10, Smie00, Vani12]. Auch Handlungsbeschränkungen durch Küstenverläufe oder Tiefenbeschränkungen und Verkehrsaufkommen in der Umgebung sind hierbei zu berücksichtigen [Cold83, DaDS82, FuSh71].
- 2. Entkopplung des Verarbeitungsprozesses von der Datenerhebung.** Um den nachfolgenden Prozess der Datenkommunikation, -speicherung und -analyse von den eingesetzten Sensoren zu trennen, und dadurch auf Datenerfassungsebene eine Erweiterbarkeit des Sensornetzwerks zu ermöglichen, sollte das eingesetzte Datenmodell zur Beschreibung der erfassten Daten produktunabhängig sein [Fark11, Holt01, Jung00]. Ein weiterer Vorteil besteht in der Tatsache, dass zu validierende System unter Test (engl. System under Test; SuT) unterschiedliche Datentypen und Parameterspezifikationen nutzen. Daher gilt es auf semantischer/syntaktischer Interoperabilitätsebene für die Integration eines SuT Anpassungen für den spezifischen Test zu machen. Dies setzt ein Zwischenformat voraus [Brin18].
- 3. Vertrauenswürdigkeit von Basisinformationen.** Um eine gewisse Aussagekraft mit der Analyse der erfassten Sensordaten zu erreichen, muss die Qualität einer jeden Nachricht bekannt sein. Faktoren wie die Korrektheit, Vollständigkeit oder Konsistenz der Daten müssen basierend auf dem Sensor(-fehler) und Voranalysen untersucht werden, um die Aussagekraft der zugrundeliegenden Daten im Erkenntnisgewinn zu berücksichtigen [Jopp14].
- 4. Nachvollziehbarkeit der Sensorquellen.** Die erfassten Daten müssen auch nach der Transformation dem Sensor zuordenbar sein. Gerade bei sich überlappenden Beobachtungsgebieten spielt für eine später Rekonstruktion die Nachvollziehbarkeit der Datenerhebung eine wesentliche Rolle, diese kann auch bei der Fehleranalyse hilfreich sein, um Defekte an einem spezifischen Sensor frühzeitig zu erkennen und Daten aus diesem Sensor punktuell aus dem Analyseprozess zu entfernen [DaJo03].

5. **Reproduzierbarkeit der ursprünglichen Sensornachricht.** Um aus einem sensor-unabhängigen Datenmodell die ursprüngliche Nachricht auslesen zu können, müssen alle Daten aus der Quelle vollständig abgebildet sein. Es empfiehlt sich, auch zur Überprüfung des Transformationsprozesses, die Rohnachricht an die neu transformierte Nachricht zu hängen, um die Verlustfreiheit der Informationen durch den gesamten Verarbeitungsprozess sicherzustellen [DKNP06, Fotn16a, NKKD02].
6. **Erweiterbarkeit der Situationsbeschreibung.** Da das entstehende Datenmodell nicht auf einen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten werden soll, sondern für unterschiedliche Einsätze und Auswertungen genutzt wird, ist die Erweiterbarkeit aber auch Abstrahierbarkeit des Datenmodells notwendig. Aus verwandten Domänen existieren beispielsweise bereits Schichtenmodelle, die dafür geeignet sind, die Informationen unterschiedlichen Ebenen (oder Dimensionen) zuzuordnen, um je nach Anwendungsfall die notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen und damit, je nach Komplexität, die Realität strukturiert abzubilden [BMRM17]. Darüber hinaus können über die Dimensionen auch Informationen unberücksichtigt oder im Nachgang ergänzt werden.
7. **Unterstützung und Bereitstellung von geometrischen Datentypen und Funktionen für Geobjekte.** Da es sich bei den zugrundeliegenden Daten um bewegliche Geobjekte handelt, muss das Datenmanagementsystem für die Anfrage und Speicherung dieser Geodaten Funktionen bereitstellen und auch die Möglichkeit bieten, Geobjekte in geeigneter Form repräsentieren zu können. Des Weiteren muss das Datenmanagementsystem die Möglichkeit bieten, Methoden für die geometrischen Daten bereitzustellen, um gezielte Anfragen basierend auf den Geoinformationen zu stellen. Hierunter fallen beispielsweise Anfragen auf Daten innerhalb eines bestimmten Gebietes oder die Erfassung von Schnittpunkten zwischen zwei Trajektorien [Brin13, EGSV99, Pfos02].
8. **Pseudonymisierung der Daten.** Da es sich bei den zu nutzenden Daten um Verkehrsdaten realer Situationen handelt und die Analysen und Prozesse auch Auskunft über vermeintliches Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmenden geben kann, muss die Möglichkeit bestehen, exemplarische Situationen pseudonymisiert, also ohne Rückschluss auf die involvierten Parteien geben zu können, zur Verfügung zu stellen. Das Ziel des Erkenntnisgewinnes besteht weniger in der Tatsache, eine verantwortliche Person zu identifizieren, sondern aus den Ergebnissen mögliche Lösungen abzuleiten, die zukünftig zur Vorbeugung führen sollen [BuMo09, HuBe07].
9. **Datenvorverarbeitung und Bereinigung.** Da die aufgezeichneten Sensordaten zum einen fehlerbehaftet sein können und zum anderen die heterogenen Sensordaten in

einen gemeinsamen Zusammenhang gebracht werden müssen (Homogenisierung), ist eine Datenvorverarbeitung unabdingbar [BoWN14, LiHu06]. Hierfür muss ein Zielformat definiert werden um die Daten anschließend in eine logische Beziehung zueinander stellen zu können. Hierdurch lässt sich eine langfristige Wartung und Entwicklung für spätere Analysen gewährleisten. Da die Gewichtung beziehungsweise Relevanz von Datenfehlern abhängig vom Anwendungsfall zu sehen ist, müssen die Daten ihren ursprünglichen Wert beibehalten. Es muss jedoch kenntlich gemacht werden, welche Datenqualität der Datensatz aufweist und welche spezifischen Fehler erfasst wurden [Bosc19].

- 10. Generierung von Metainformationen über den Datensatz.** Um Aussagen über normales oder anomales Verhalten treffen zu können, müssen statistische Werte über den zugrundeliegenden Datensatz ermittelt werden, um eine Abschätzung und Aussage über statistisches Normalverhalten zu treffen. Auch weiterführende Metainformationen, wie die Datenqualität der Datenbasis, die, während der Analyseprozesse entstehen, sollen für aufbauende Prozesse persistiert werden können [MaNK14, PaVB13, Vani12].

3.1.2. Anforderungen an die Detektion von Beinahekollisionen

Wie in Abbildung 19 zu sehen bilden die Begegnungssituationen den zentralen Bestandteil der Beinahekollisionsdatenbank. Um aus diesen, aussagekräftige Erkenntnisse und auch Anforderungen an Fahrfunktionen während der Designphase ableiten zu können, müssen diese Begegnungen im Vorfeld objektive Untersuchungen durchlaufen (Z3). Die Grundlagen haben gezeigt, welche Faktoren bei der Bewertung des Kollisionspotenzials einer Begegnung berücksichtigt werden müssen und sollten demnach in die Analyse einfließen. Diese Informationen werden sowohl für den Erkenntnisgewinn durch die Unfalluntersuchung als auch von dem/der SystemingenieurIn benötigt, um daraus neue Systeme zu entwickeln. Ein entscheidender Faktor der gerade in Begegnungssituationen zu berücksichtigen ist, ist das Verhalten des Schiffes. Um Konfliktpotenzial messbar machen zu können und die subjektive Wahrnehmung der entscheidungstragenden Person aufzudecken ist es wichtig, das Verhalten, die unmittelbaren Reaktionen und auch eine mögliche Unsicherheit bei der Nachvollziehbarkeit des Handelns der an dieser Begegnung beteiligten Instanz zu erfassen (Z4).

- 11. Berücksichtigung der Eigenschaften des Zielschiffes.** Um eine objektive Gefahreneinschätzung durchführen zu können, hängt die Bestimmung der Grenzwerte stark von den vorliegenden Manövriereigenschaften und Dimensionen (Länge, Breite, Tiefgang) der involvierten Schiffe ab. Diese ergeben sich unter anderem aus Faktoren wie der Bruttoreaumzahl und dem Schiffstyp [Cold83, Smie00].

12. **Berücksichtigung der regulatorischen Gefahrenstufen.** Die KVRs differenzieren unterschiedliche Gefahrenstufen, in welchen vordefinierte Handlungen vorgeschrieben sind. Da diese in den KVRs nicht eindeutig definiert sind, muss ein objektives Verfahren eingesetzt werden, welches definiert, ob es sich bei den vorliegenden Handlungen der Teilnehmenden um regelkonformes Verhalten handelt [Cold83, DaDS82, Inte77, Piet08].
13. **Betrachtung der Ausweich- und Fahrregeln (Teil B).** Um eine Situation zuverlässig bewerten zu können, muss das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmenden klar nachvollziehbar sein. Um Unsicherheiten aufdecken zu können, muss das regelkonforme Verhalten und Ausweichen bestimmbar sein. Demnach sind vor allem die Regeln für Ausweich- und allgemeine Fahrregeln der KVRs von Bedeutung [DaDS82, FuSh71, Inte77, Smie00].
14. **Betrachtung von Kontextinformationen (Regel 6).** Da die KVRs zur Vorbeugung von Kollisionen, etwa durch zu schnelles Fahren, verschiedene Kontextinformationen benennen, müssen mindestens diese ebenfalls in der Untersuchung von Begegnungen berücksichtigt werden. Die Wahl einer geeigneten Geschwindigkeit ermöglicht das frühzeitige Reagieren in bestimmten Situationen durch Vergrößerung der Abstände zwischen den Schiffen oder zur Durchführung von Gegenmaßnahmen in potenziellen Kollisionssituationen. Faktoren, die bei dieser Abschätzung eine Rolle spielen, sind Wetterverhältnisse, die Verkehrsdichte um das Schiff herum, aber auch Tiefgangs- und Manövrierinformationen der Verkehrsteilnehmenden [Fotn16b, Inte77, Piet08, Smie00].
15. **Betrachtung von Forward Collision Warnings (Regel 7).** Erfasst die lineare Vorausberechnung (Peilung) zwei sich nähernder Schiffe über einen längeren Zeitraum einen konstanten Wert, so ist davon auszugehen, dass die Schiffe auf Kollisionskurs sind. Zur Kollisionsvermeidung bei Schiffen hat sich mit ARPA und ECDIS die CPA, DCPA und TCPA Bestimmung etabliert. Bei nicht merklicher Änderung der Kompasspeilung zweier Schiffe besteht die Notwendigkeit eines Manövers des ausweichpflichtigen Schiffes [Fotn16b, Inte77, WaCh16].
16. **Betrachtung des Fahrwassers und anderer Gegebenheiten (Regel 9+10).** Zur Gefährdungsbeurteilung ist es notwendig den Handlungsspielraum der Schiffe zu berücksichtigen. In hochfrequentierten oder beschränkten Gewässern ist das Potenzial einer Kollision anders zu ermitteln als bei offenen Gewässern. Auch der Gewässertyp muss somit in die Bewertung mit einbezogen werden, um eine objektive Einschätzung der Situation vornehmen zu können. Da Schiffe sich in beschränkten Gewässern an der Betonung orientieren, hat dies einen deutlichen Einfluss auf das Fahrverhalten

der Verkehrsteilnehmenden. Daher spielt insbesondere der Kontext in welchem sich eine Beinahekollision ereignet eine wesentliche Rolle und muss entsprechend berücksichtigt werden. Sollten Schiffe sichere Gewässer verlassen, so liegt die Vermutung nahe, dass es sich um eine Handlung handelt, die auf Vermeidung einer potenziellen Kollision zurückzuführen ist. Dies ist nur relevant, wenn sich das anomal zu verhaltene Schiff nach einiger Zeit wieder im Fahrwasser befindet [Bund98, Cold83, Fotn16b, FuSh71, Good75, WaCh16].

17. **Separate Betrachtung regulatorischer Begegnungsarten (Regel 13-15).** Da für die unterschiedlichen Begegnungssituationen (Kreuzende Kurse, Überholen und entgegengesetzte Kurse) unterschiedliche Ausweichregeln existieren, muss jede Situation zunächst einer dieser Kategorie zugeordnet werden, um entsprechendes regelkonformes Verhalten nachweisen zu können [DaDS82, Inte77].
18. **Aufdecken vom „Manöver des letzten Augenblicks“ (Regel 16+17).** Da der/die Kurshaltende dazu angehalten ist Maßnahmen zu ergreifen, um eine Kollision zu vermeiden kann auch der/die Kurshaltende, bei der Missachtung der Ausweichpflicht des ausweichpflichtigen Verkehrsteilnehmenden, ein „Manöver des letzten Augenblicks“ einleiten [Fotn16b, Inte77].
19. **Betrachtung der Sichtverhältnisse (Regel 19).** Da eine verminderte Sicht ein Risiko für den Schiffverkehr darstellt müssen auch die Sichtverhältnisse in der Kritikalitätsbetrachtung berücksichtigt werden. Bei verminderter Sicht verlassen sich die nautischen Personen verstärkt auf die elektronischen Hilfsmittel [Inte77, Smie00].
20. **Bewertung von Schiff-zu-Schiff-Begegnung.** Zur Detektion von Beinahekollisionen müssen die Kollisionspotenziale von Begegnungssituationen ermittelt werden. Da in der Literatur eine Begegnungssituation als Schiff-zu-Schiff Begegnung definiert ist, werden demnach nur 2-Schiffssituationen bewertet [DaDS82, WaCh16].
21. **Berücksichtigung von harten Geschwindigkeitsänderungen.** Wenn Schiffe in bestimmten Situationen ihre Geschwindigkeit drastisch reduzieren oder beschleunigen (im Vergleich zum Normalverhalten), kann diese Information ein Indiz dafür sein, dass es sich um eine besondere Situation gehandelt haben könnte [Fotn16b, Inte77].
22. **Berücksichtigung von harten Kursänderungen.** Neben der Geschwindigkeitsreduktion kann auch die Ausführung einer starken Kursänderung ein Indikator dafür sein, dass es sich in diesem Moment um ein besonderes Ereignis handelt. In der Schifffahrt werden in aller Regel nur wenige Kursänderungen gefahren. Daher sind die Navigierenden angehalten, ihre Vorhaben stets durch deutliche Kursänderungen kenntlich zu machen. Dadurch ist die Handlung des Schiffes auch auf einem ARPA oder ECDIS besser sichtbar [Fotn16b, Inte77].

23. Berücksichtigung von historischem Fahrverhalten. Um Unsicherheiten aufzudecken und sichtbar machen zu können muss zunächst identifiziert werden, wie sich Schiffe generell in bestimmten Gebieten oder Situationen verhalten. Bei anomalem Verhalten eines/einer Verkehrsteilnehmenden, kann dies ein Indiz dafür sein, dass die wachhabende Person auf der Kommandobrücke die Intention des Gegenübers nicht mehr abschätzen kann und somit erhöhte Aufmerksamkeit und defensives Fahrverhalten erforderlich ist. Diese Unsicherheit kann dazu führen, dass durch Fehlverhalten auf beiden Seiten eine potenzielle Kollision provoziert wird [Fotn16b, Roth00, Roth02].

3.1.3. Anforderungen an die Bereitstellung von Beinahekollisionen in einem Testfeld
Die erfassten Begegnungen dienen als Ground Truth für die Evaluation als auch Entwicklung (in Form eines Trainingsdatensatzes) von Assistenzsystemen. Zu diesem Zweck müssen die Begegnungen strukturiert, mit Zusatzinformationen angereichert und rekonstruiert werden. Dies dient der weiteren Verarbeitung und Nutzung der Beinahekollisionen aufbauend an den Vorverarbeitungen und Analysen. Darüber hinaus müssen die Begegnungen für den Validierungsprozess zur Verfügung gestellt werden, um die vorherigen (zumeist simulativen) Untersuchungen zu bestätigen. Dafür müssen die Begegnungen auch dem Testfeld zur Verfügung gestellt werden (Z5). Das FESTA Handbook bietet hierzu Informationen über die relevanten Daten, die zur Erhebung von Testszenarien und insbesondere Unfallszenarien relevant sind [Fotn16b, Fotn16a].

24. Bedarfsorientierte Bereitstellung von Katalogen an Begegnungssituationen.
Ziel ist es die für weitere Systementwicklungen relevanten Beinahekollisionen und anderer aufgezeichneter Begegnungssituationen systematisch auszuwählen. Da unterschiedliche Anforderungen an eine Situationsdatenbank bestehen, müssen die an die Situationen angehängten Labels für eine Auswahl eines spezifischen Situationskatalogs genutzt werden können [BeRa18].

25. Zeitliche Synchronisierung der Beobachtungsdaten. Um die Begegnungen für weiterführende Analysen bereitzustellen, sollen die zeitlichen Abfolgen (Zeitpunkte und -abstände) aneinander angeglichen werden. Das bedeutet, dass zu bestimmten Zeitpunkten Daten für die Begegnungen aus den Beobachtungen zur Verfügung stehen müssen. Hierdurch lassen sich die Beobachtungen auch in eine Simulation einspeisen, um die Begegnungen zu rekonstruieren [MaSc16, WiWJ17].

Um eine spätere Erfüllung der Ziele und Fragestellungen darlegen zu können, lassen sich die erhobenen Anforderungen direkt den Zielen zuordnen und konkretisieren diese. In Abbildung 20 sind die Rückverfolgbarkeit und Beziehung der Anforderungen und Ziele

dargestellt. Die Anforderungen haben einen direkten Bezug zu den Zielen. Demnach wird im Abschluss der Beitragsentwicklung die entstandenen Artefakte den Anforderungen gegenübergestellt. Durch die Erfüllung der Anforderungen wird so die Zielerfüllung und Erfüllung der Forschungsfragen sichergestellt. Gemäß dieser Anforderungsliste werden nun die erfassten verwandten Arbeiten auf die Erfüllung der in dieser Arbeit definierten Ziele und Forschungsfragen hin untersucht. Schwerpunkt bei der Gegenüberstellung und Sicherung der verwandten Arbeiten soll auf die Detektion von Beinahekollisionen gelegt werden, da die TF1 und TF3 wie bereits in Abschnitt 1.3 erwähnt den ingenieurwissenschaftlichen Rahmen zur Wertschöpfung bilden und der wissenschaftliche Beitrag entsprechend in der TF2 aufgegangen ist.

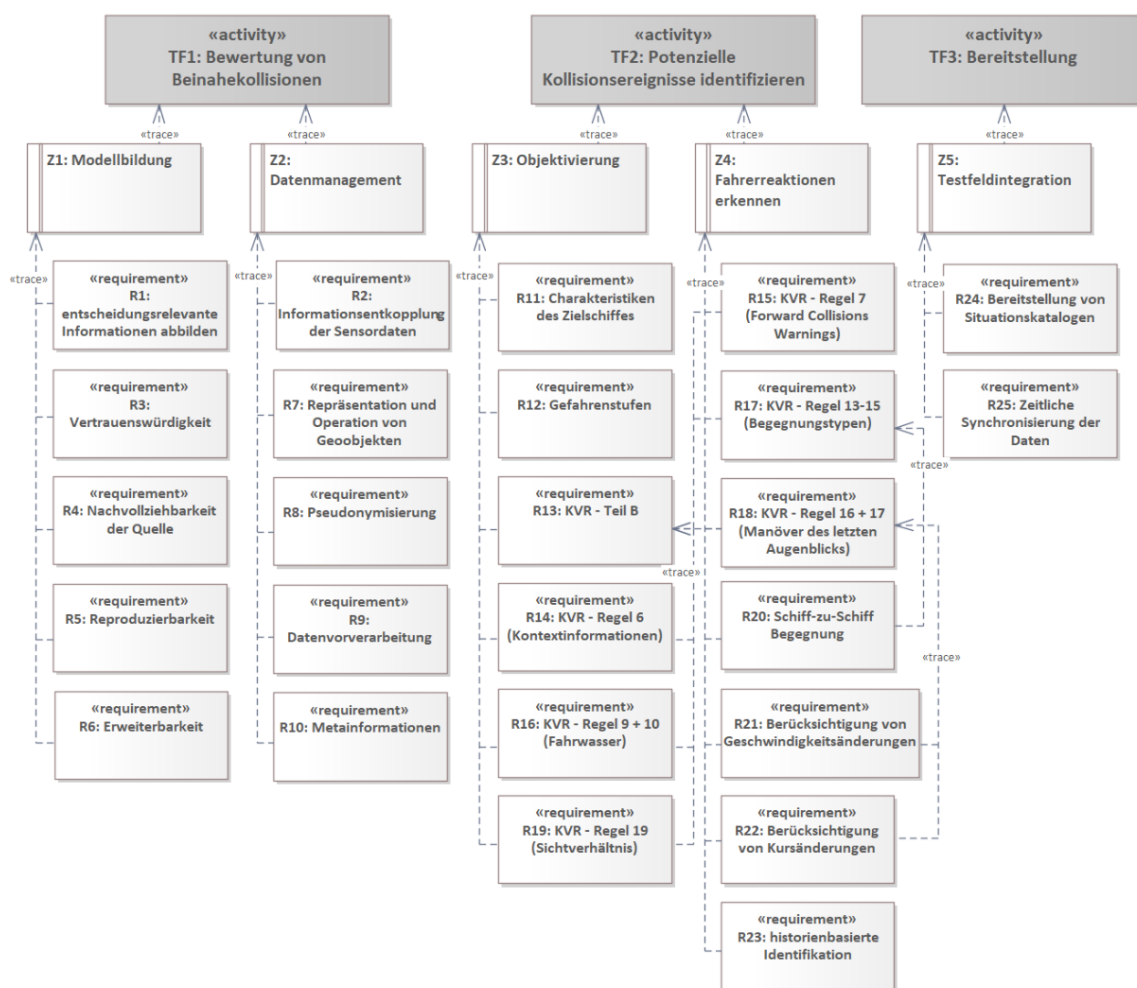


Abbildung 20: Anforderungsdiagramm mit Relationen zu den Teilforschungsfragen und Zielen

3.2. Verwandte Arbeiten zur Detektion von Beinahekollisionen

Die Identifikation von Beinahekollisionen und der daraus entstehende Situationskatalog, kann als Basis für die Validierung hochautomatisierter Systeme gesehen werden. Eine objektive und zudem automatisierte Detektion dieser seltenen Situationen steht demnach im

Vordergrund. Im Folgenden werden die Arbeiten, die mit der vorgestellten Problemstellung als verwandt erachtet werden, näher beschrieben. Für die Literaturrecherche wurden zunächst Arbeiten aus den Bereichen Anomalieerkennung und Kollisionsvermeidung gesichtet, die sich mit maritimen Begegnungssituationen beschäftigen. Durch Vor- und Rückwärtspropagierung der identifizierten Arbeiten (Sichtung von Referenzen und Zitationen) wurde die Vollständigkeit der zu betrachtenden Arbeiten sichergestellt. Insgesamt wurden durch dieses Verfahren 25 Arbeiten mit Bezug zu der vorliegenden Forschungsarbeit identifiziert (vgl. Anlage 1).

Für den weiteren Vergleich wurden von diesen jedoch nur Verfahren ausgewählt, welche einen mikroskopischen Betrachtungsansatz des Kollisionspotenzials der vorliegenden Situation verfolgen. Unter Untersuchungen auf der Mikroebene werden Verfahren verstanden, welche eine einzelne, konkreten Verkehrsszene also beispielsweise eine verkehrsteilnehmende Person und ihr Handeln mit einer oder mehreren verkehrsteilnehmenden Personen berücksichtigt [Epp17, S.6, Juni19, S.VII]. Makroskopische Ansätze die sich nicht auf spezifische Kontexte konzentrieren, sondern übergeordnete Muster oder Strukturen untersuchen, wie beispielsweise das durchschnittliche Risiko eines Systems oder die Häufigkeit tödlicher Unfälle, sind für die Konzeption einer Beinahekollisionsdetektion nicht von Relevanz [Epp17, S.6, Juni19, S.VII]. Auch Ansätze, welche keine quantifizierbare Aussage über die vorliegende Situation treffen können, wurden nicht näher betrachtet. Insgesamt erfüllen sieben Arbeiten diese Kriterien, die im weiteren Verlauf näher beschrieben werden und abschließend gegenübergestellt werden. Um einen Blick über den Tellerrand zu wagen und mögliche adaptierbare Ansätze aus den anderen Verkehrsdomänen zu erhalten, werden separat domänenferne Arbeiten und Forschungsprojekte aufgelistet. Die Arbeiten werden anschließend mit den hergeleiteten Anforderungen zur Detektion von Beinahekollisionen (Konkret den Anforderungen 11-23) abgeglichen und die Forschungslücke aufgedeckt.

3.2.1. Domänenspezifische verwandte Arbeiten

ACCeSS Ansatz. Die Verfasserinnen stellen in ihrer Arbeit einen Ansatz zur Risikobewertung in Nahbereichsbegegnungen vor. Sie kritisieren in ihrer Arbeit die Tatsache das Ship Domains vornehmlich auf Schiffe ausgerichtet sind, die in einer Begegnungssituation ausweichpflichtig sind. Für Schiffe die laut COLREGs kurshaltepflichtig sind funktioniert die Ship Domain hingegen nicht, da die Risikobewertung für diese Schiffe eine andere ist. Demnach müsse die Berechnung für das Risiko einer Begegnungssituation von beiden Schiffen aus erfolgen, um das Risiko wirklich korrekt zu ermitteln. Bleibt bei der Berechnung des Risikos das gesamte Lagebild unberücksichtigt, kann es dazu führen, dass das Schiff durch

den Entscheidungsprozess in eine noch gefährlichere Situation hereinmanövriert wird [TaBu10].

Demnach schlagen Tam und Bucknall ein Verfahren vor, welches die Art der Begegnung (Kreuzungssituation, Überholsituation, Frontalsituation), sowie den Sicherheitsbereich abhängig von der Geschwindigkeit und Kurs der Schiffe berücksichtigt. Die Form der vorgeschlagenen Ship Domain ist demnach abhängig von der Begegnungssituation. Hierfür wurde diese entsprechend in sechs Bereiche eingeteilt (vgl. Abbildung 21).

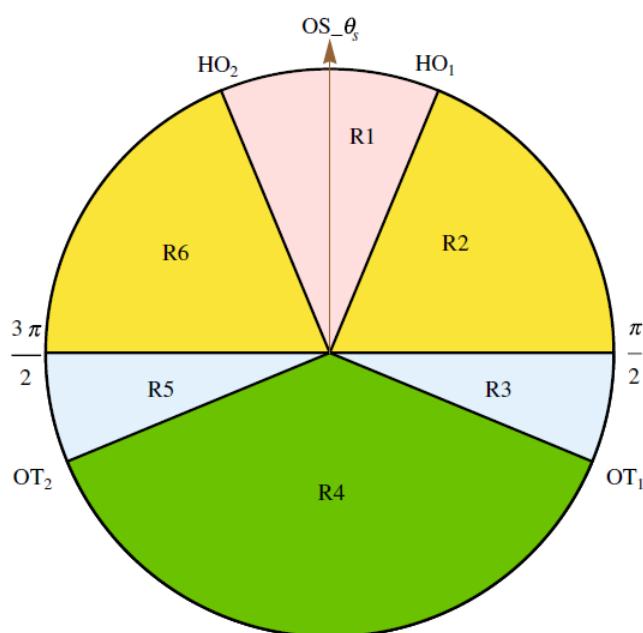


Abbildung 21: Bereichseinteilung zur Kategorisierung der Hindernisse [TaBu10]

Abhängig vom Winkel und Bereich, in dem die begegnenden Schiffe zueinander stehen wird auf Basis dieser Ship Domain das Risiko der Situation ermittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung soll bei der Entscheidung helfen, bis zu welchem Zeitpunkt bzw. zu welcher Distanz zwischen den Schiffen das sichere Manöver durchgeführt werden muss. Schiffe mit einer geringeren Geschwindigkeit haben laut Tam und Bucknall noch eine bessere Manövrierfähigkeit als schnellere Schiffe. Daher ändert sich auch ihre Ship Domain in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit (vgl. Abbildung 22).

Dieser Ansatz wurde simulativ durchgeführt, um zu zeigen, dass das Auftreten von kritischen Situationen mithilfe dieser Unterstützung reduziert werden kann.

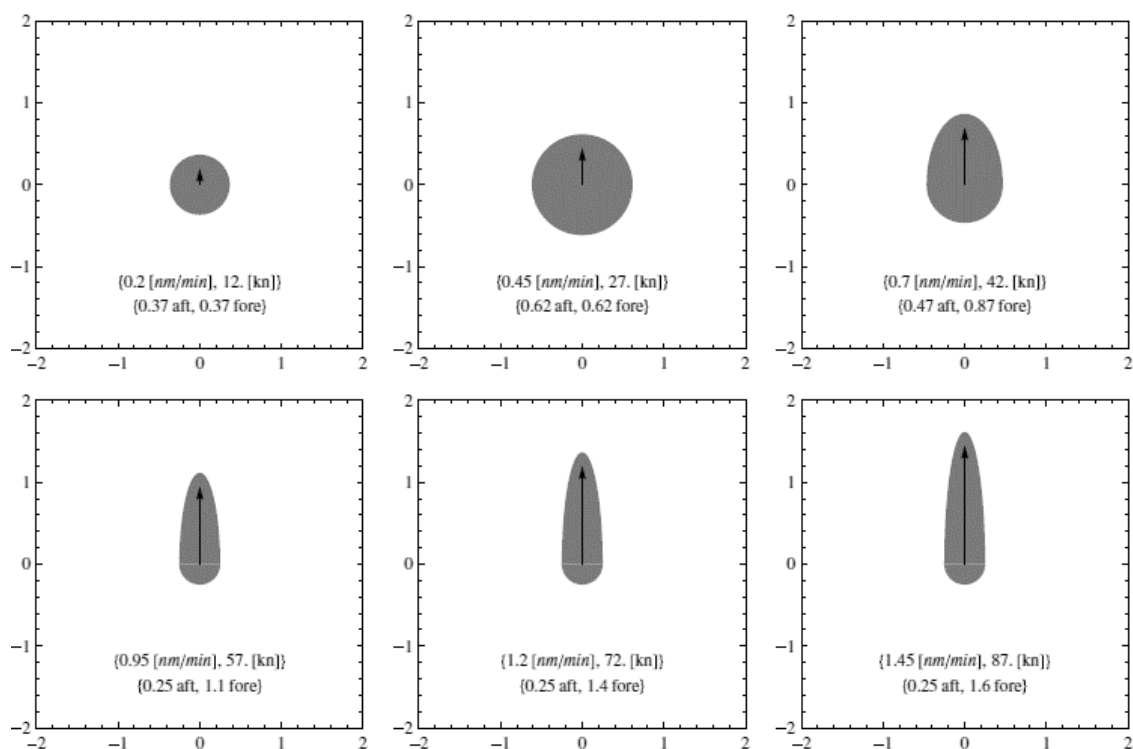


Abbildung 22: Ship Domain abhängig von der Geschwindigkeit [TaBu10]

MARIN Ansatz. Der Autor stellt in seiner Arbeit einen Ansatz zur Detektion von gefährlichen Begegnungssituationen auf der Nordsee auf Basis von AIS-Daten vor. Er kritisiert zunächst, dass die Anzahl an Unfällen als Indikator für das Sicherheitslevel in bestimmten Gewässern dient. Doch Unfälle allein bieten kein ausreichendes Bild über die Situation auf See. Er schlägt zwei Möglichkeiten vor die Sicherheit in einem bestimmten Bereich zu ermitteln. Zum einen eignen sich Risikomodelle basierend auf statistischen Wahrscheinlichkeiten von Unfällen in ähnlichen Bereichen, um das Sicherheitsrisiko abhängig von der Beschaffenheit an zu bewertender Stelle ermitteln zu können [Vani12]. Zum anderen sind solche Schiffsbegegnungen interessant, bei denen es „beinahe“ zu einem Unfall gekommen wäre. Diese sogenannten „Near-Misses“ werden, wie schon zuvor erwähnt, selten gemeldet. In früheren Arbeiten wurden zwei Ansätze untersucht, um automatisch Beinahekollisionen detektieren zu können. Der erste Ansatz schlägt die Erfassung des Fortschrittes der prognostizierten DCPA bei Begegnungssituationen vor. Der andere Ansatz schlägt hierfür die Nutzung von Ship Domains vor.

In der vorgestellten Arbeit wurden beide Ansätze zu einem Ranking zusammengefasst. Bevor es an die Entwicklung des Ansatzes ging, wurde zunächst zusammen mit Experten über die Definition einer „Near-Miss“ gesprochen. Es stellte sich heraus, dass es keine allgemeingültige Definition geben kann, da immer Ausnahmen existieren die berücksichtigt werden müssten. Demnach wurden gemeinsam Begegnungssituationen ermittelt die für alle

Beteiligten als kritisch angesehen wurden. Anhand dieser zehn Situationen wurden Kriterien formuliert, die eine Beinahekollision ausmachen. Hierunter fallen die zuvor erwähnten DCPA, TCPA Werte. Dabei werden Begegnungen erst berücksichtigt, wenn der TCPA kleiner als neun Minuten ist. Unterhalb dieser Zeitspanne wird die kritische Distanz von 0.5, 0.2 oder gar 0.1 nm nicht erreicht.

Es stellte sich heraus, dass unter den Situationen mit einer Distanz kleiner als 0.1 nm auch Situationen sind, welche als sichere oder gar normale Manöver bezeichnet werden. Viele Kreuzungs- oder Überholsituationen weisen einen geringen DCPA auf obwohl zu keiner Zeit ein Risiko besteht.

Die Ergebnisse wurden weiter mit ExpertInnenen diskutiert. Das Resultat besteht in der Notwendigkeit der Berücksichtigung der Schiffsgröße der Teilnehmenden. Viele Situationen mit kleinen Schiffen sind wenig interessant und können nicht als kritisch angesehen werden. Auch Faktoren wie Wetter, Geschwindigkeit aber auch der Schiffstyp müssten zur Bewertung herangezogen werden. Um die Art einer Begegnungssituation verlässlich bestimmen zu können, empfiehlt es sich den Kurs vor und nach der Situation zu berücksichtigen, um eine korrekte Aussage treffen zu können.

Für die Bestimmung der Ship Domain abhängig von der Art der Begegnung wurden AIS-Daten genutzt, um die Distanz zwischen allen Schiffen innerhalb der Daten eines Monats zu bestimmen. Das 0.5% Perzentil wurde anschließend als Ship Domain auserwählt (vgl. Abbildung 23).

Bei näherer Betrachtung der erfassten kritischen Situation stellte sich heraus, dass auch Schlepperzüge mit dieser Methode als kritisch angesehen wurden. Diese Situationen können jedoch dadurch aufgedeckt werden das zwei Schiffe über eine längere Strecke mit gleicher Distanz und gleicher Geschwindigkeit (zumeist sehr gering) hintereinander herfahren. Die zu Beginn der Arbeit erwähnte Berücksichtigung des Wetters wurde nicht umgesetzt. Bei seinem Ansatz erfasste van Iperen das zwischen 1% und fast 2% der Situationen auf See kritische Situationen zu sein scheinen, abhängig von dem zu untersuchenden Gebiet. Vor allem die Berücksichtigung, ob ein ausweichpflichtiges Schiff den/die Kurshaltende über Bug oder Heck kreuzen sei entscheidend für die Kritikalität der Situation und sollte jeweils gesondert betrachtet werden. Abschließend schlägt van Iperen die Berücksichtigung von dynamischen Risikomodellen sowie weiteren Faktoren zu Bewertung der Situation vor.

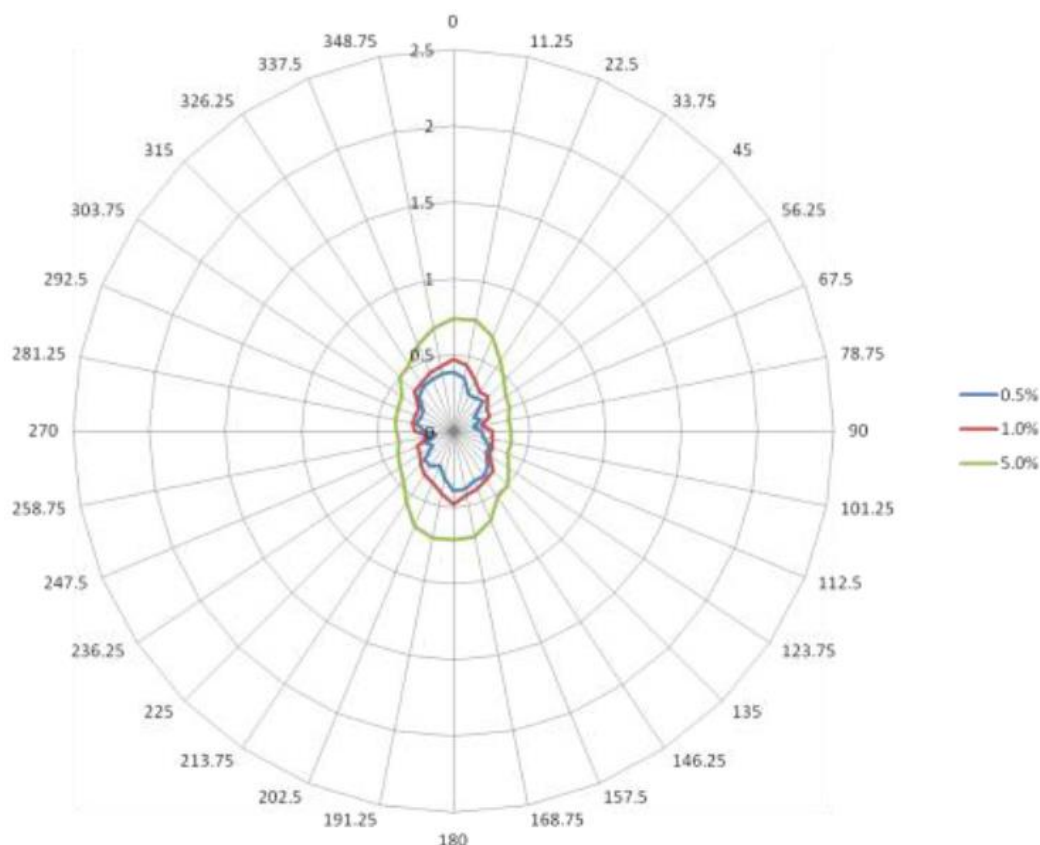


Abbildung 23: Die Ermittlung der Ship Domain in einer Überholsituation durch die Perzentile [Vani12]

CENTEC Ansatz. Die AutorInnen kritisieren in ihrer Arbeit die vereinfachte Annahme, dass sich Schiffe linear fortbewegen. Gerade in direkten Begegnungssituationen ist es für die Kollisionsvermeidung wichtig, dass die Trajektorie, die die Schiffe vermutlich fahren werden, bestimmt werden kann. Vor allem in Kollisionssituationen fahren Schiffe Manöver, um der heiklen Situation noch entkommen zu können. Sie stellen demnach eine Alternative zu den üblichen Ship Domain und CPA Ansätzen zur Kollisionsvermeidung und Detektion vor [PeSo11].

Der vorgeschlagene Ansatz leitet die Funktion der Trajektorie und des Kurs-Geschwindigkeitsvektors zwischen zwei Schiffen ab. Hieraus soll sich ein Maß für das Kollisionsrisiko ergeben. Um die Trajektorie beider Schiffe so exakt wie möglich bestimmen zu können, haben die Autoren einen dreistufigen Prozess entwickelt. Zunächst wird ein Systemmodell abgeleitet. Darauf folgt die Herleitung eines Messmodells. Die beiden hergeleiteten Modelle werden im dritten Schritt für den angewandten erweiterten Kalman Filter (engl. Extended Kalman Filter; EKF) benutzt. Zur Bestimmung der Manövriermöglichkeit nutzen sie ein kontinuierliches krummliniges Bewegungsmodell (vgl. Abbildung 24).

Aus dem kontinuierlichen krummlinigen Bewegungsmodell beider Schiffe, sowie einer Jacobi-Matrix wird das Systemmodell bestimmt. Um die aktuelle Position des Eigen- und des

Zielschiffs zu bestimmen wird ein Messmodell abgeleitet. Die beiden Modelle sind notwendig, um die Präzision des EKF zu verbessern. Der vorgestellte Ansatz wird abschließend simulativ evaluiert und der Nutzen der prädizierten Trajektorie bestätigt.

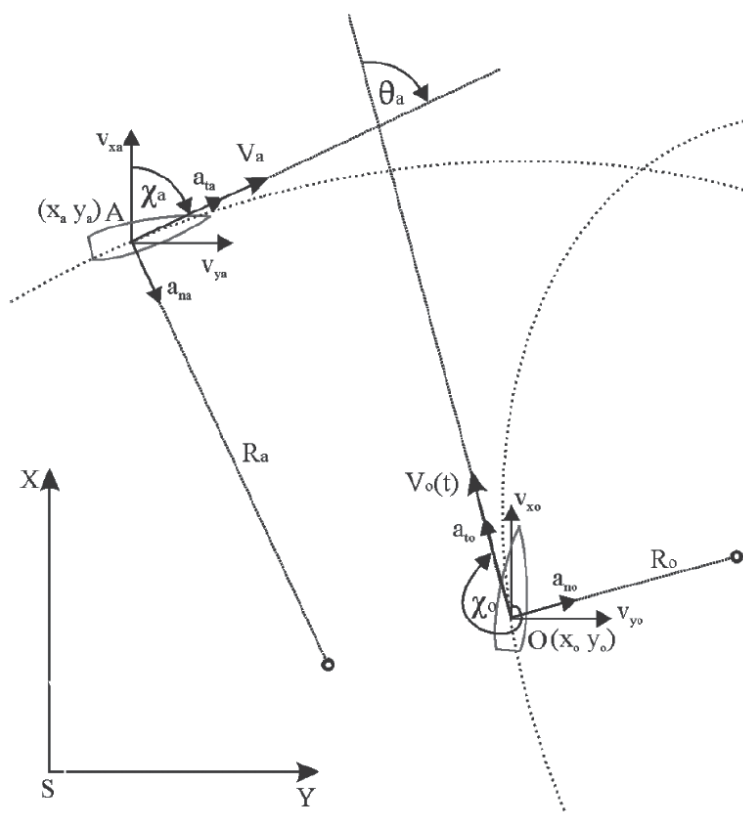


Abbildung 24: Zwei Schiffs-Kollisions-Situation [PeSo11]

DNV Ansatz. Das Ziel der vorgestellten Arbeit ist ein Ansatz zur Erkennung kritischer Situationen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass der präsentierte Ansatz wesentlich performanter funktioniert als die Berechnung der minimalen Distanz von Schiffen, was gerade für Big Data Anwendungen nicht zu vernachlässigen ist. Die Autoren konzentrieren sich, im Gegensatz zu anderen Arbeiten, auf die rate of turn (ROT). Die Autoren folgen der Annahme, dass Schiffe vor einer Kollision starke Manöver fahren, um dieser Situation noch entkommen zu können. Diese Hypothese stützt sich auf zwei vorgestellte Argumente. Zum einen beschreibt die IMO in ihren Regularien eine Kollision als eine Kette von Ereignissen. Bei einer Beinahekollision wurde diese Kette durch ein „zufälliges“ Event unterbrochen [MeTC16].

Zum anderen wurde auf Basis eines Unfallberichtes zwischen dem Kreuzfahrtschiff "STATENDAM" und dem Schlepper "BELLEISLE SOUND"/"RADIUM 622" festgestellt, dass durch extreme Manöver vor der eigentlichen Kollision das Schadensausmaß drastisch reduziert werden konnte. Hierdurch kann die Annahme getroffen werden, dass nautisches Personal gewillt ist eine Kollision bzw. deren folgen durch aktives Manövrieren zu vermeiden oder

zumindest drastisch zu reduzieren, wie in den COLREGs als Manöver des letzten Augenblicks gefordert.

Für die Evaluation ihres Ansatzes verwenden die AutorInnen anonymisierte Daten einer Beinahekollision zwischen einem Fischerboot und einer Fähre. Untersuchungen des ROT Wertes der Fähre, über die Zeitspanne von einem halben Jahr, zeigen das die hohen ROT während der Beinahekollision die höchsten Werte dieses Zeitraumes sind. Demnach kann ein erhöhter ROT Wert als Indikator für eine untypische Situationen gesehen werden, jedoch nicht zwangsläufig für ausweichende Manöver. Aus diesem Grund haben die AutorInnen den centripetal acceleration (CA) Wert hergeleitet. Dieser Wert soll die Änderungsrate um die vertikale Achse darstellen. Der CA setzt sich zusammen, aus der Formel zur Berechnung der Zeit, die das Schiff benötigt, um einen Kreis mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu fahren:

$$T = 2\pi \frac{R}{SOG}$$

Und der Zeit, die das Schiff benötigt, um mit einem bestimmten ROT Wert einen Kreis zu fahren:

$$T = \frac{2\pi}{ROT}$$

Demnach ergibt sich folgende Formel:

$$CA = \frac{SOG^2}{R} = SOG \times ROT$$

Resümierend merken die AutorInnen an, dass eine differenziertere Betrachtung und Berücksichtigung weiterer Faktoren, wie offene und beschränkte Gewässer (Inselgruppen, Flüsse, etc.), unterschiedliche Manöveraufkommen erforderlich sind. Auch die Wetterbedingungen, wie Sturm und raue See, spielen diesbezüglich eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Weiter sind die Schiffscharakteristiken (Tiefgang, Schiffstyp, Schiffsgröße, etc.) bei der Manövrierbarkeit bzw. der grundsätzlichen Bereitschaft für Manöver entscheidend. Der Nachteil die kritischen Situationen allein mit dem ROT-Wert zu detektieren, besteht darin, dass lediglich 6,5% der Schiffe, die mit AIS ausgestattet sind, ihr ROT-Messgerät mit dem AIS Transponder verbunden haben.

Navigational Traffic Conflict Technique (NTCT). Die Verfassenden schlagen im Gegensatz zu anderen Arbeiten aus dem Bereich der Risikobewertung einen alternativen Ansatz vor. Zunächst wird kritisiert, dass bei herkömmlichen Ansätzen das Sicherheitsrisiko bzw. Sicherheitsanalysen in Seegebieten auf Basis von Kollisionen bestimmt wird. Kritikpunkt ist

die Tatsache, dass die Anzahl an Kollisionen immer weiter sinkt und dadurch die statistische Aussagekraft, aufgrund der geringen Stichprobe auch die Signifikanz fällt. Weiter handelt es sich, wie schon des Öfteren erwähnt, bei Kollisionen um den Ausgang eines komplexen Prozesses, welcher nur die Spitze der Sicherheitsbewertung abbildet [DeCh10].

Aus diesem Grund haben sich die Verfassenden von der Traffic Conflict Technique aus dem Straßenverkehr inspirieren lassen [AmHy77, Hydé87, HyLi84]. Im Gegensatz zu der kollisionsbasierten Sicherheitsanalyse, beurteilt die zugrundeliegende Technik das Sicherheitsrisiko auf Basis von kritischen Schiffsinteraktionen und Konflikten. Derartige Konfliktsituationen treten im Verkehr häufiger auf als Kollisionen. Die sogenannte Navigational Traffic Conflict Technique (NTCT) basiert auf der Bewertung der räumlich-zeitlichen Annäherung zwischen Schiffen. Anstelle des, im Automobilbereichs üblichen Näherungsmaßes Time to Collision (TTC), greift der vorgestellte Ansatz auf die Maße DCPA und TCPA zurück. Die Basis für Ihren Ansatz basiert auf der Annahme, dass es einen Zusammenhang zwischen den Annäherungsindikatoren TCPA und DCPA ($f(S(t))$), sowie des Risikos einer Kollision ($C(t)$) besteht.

Um die Kritikalität der Interaktion zu bestimmen, ist eine Definitionsgrenze zur Bestimmung eines Risikos unumgänglich. Die Risikobewertung startet bei dem vorgestellten Ansatz mit der Eindringung eines Schiffes in die Ship Domain nach Goodwin. Das maximale $C(t)$ des Konfliktprozesses C_{max} gibt die Schwere der Interaktion an. Demnach beginnt eine Interaktion erst mit eindringen in die verwendete Ship Domain. Das finale Maß zur Bestimmung der Schwere des Konfliktes, wird durch die Einsetzung von C_{max} in eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl. probability density function; PDF) erreicht. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird die Verkehrssicherheitspyramide von [Hydé87] zum Vorbild genommen (vgl. Abbildung 25).

Ein Wert von 0 beschreibt eine sichere Situation (an oder außerhalb der Ship Domain-Grenze), wohingegen 1 für ein extremes Kollisionsrisiko steht.

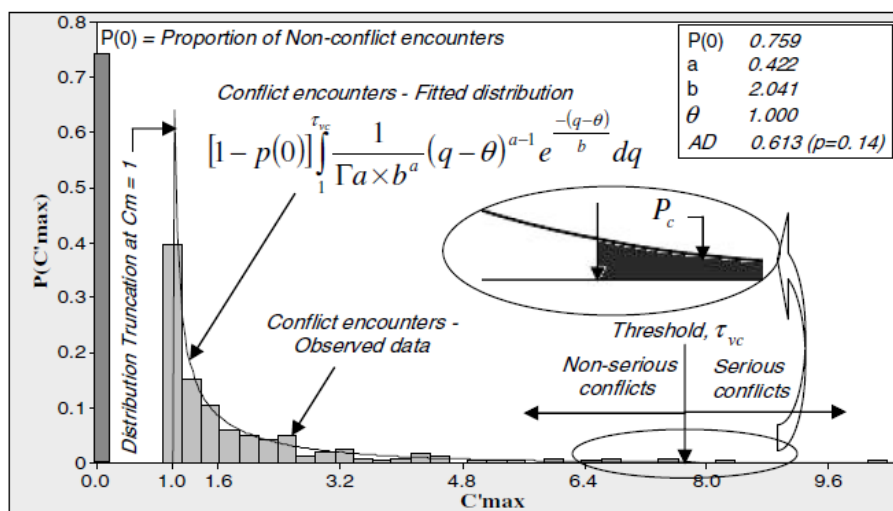


Abbildung 25: Darstellung der PDF von C'_{max} [DeCh10]

Der threshold (τ) hängt, aufgrund von Erkenntnissen vorangegangener Arbeiten, vornehmlich von der Schiffsgröße sowie der Tageszeit ab. Die Manövrierbarkeit der Schiffe verschlechtert sich bei steigender Schiffsgröße. Weiter halten Schiffe in der Nacht, aufgrund schlechter Sicht, mehr Abstand voneinander.

Die Vorgehensweise wurde auf Basis von Daten aus Singapur in Hafennähe validiert. Zunächst wurden die Schiffspaare bestimmt und anschließend C_{max} ermittelt. Darauf aufbauend konnten die AutorInnen zeigen, dass ihre vorgestellte Methode durchaus eine alternative Möglichkeit bietet, die Sicherheit auf See bewerten zu können.

TU-Delft Ansatz. In der vorliegenden Arbeit wird die Relevanz der Verkehrskomplexität bei der Bewertung der Kritikalität von Situationen fokussiert. Da Schiffe in kritischen Situationen Manöver fahren müssen, um einer Kollision zu vermeiden spielt der Handlungsspielraum der Schiffe eine wesentliche Rolle. In ihrer Arbeit untersuchen die VerfasserInnen die Auswirkungen der Verkehrssituation auf die Entstehung von Beinahekollisionen. Für die Erkennung von Begegnungen und Verkehrsaufkommen wird die Ship Domain nach Fujii angewendet. Eine Begegnung gilt dann als Konflikt, wenn der Beschleunigungsvektor des einen Schiffes auf die Schiffsdomäne des anderen Schiffes weist. Hieraus ergibt sich ein Konfliktbereich. Aus den Bereichen mit allen, sich in der Nähe befindlichen Schiffen wird demnach eine Risikoeinschätzung durchgeführt (vgl. Abbildung 26).

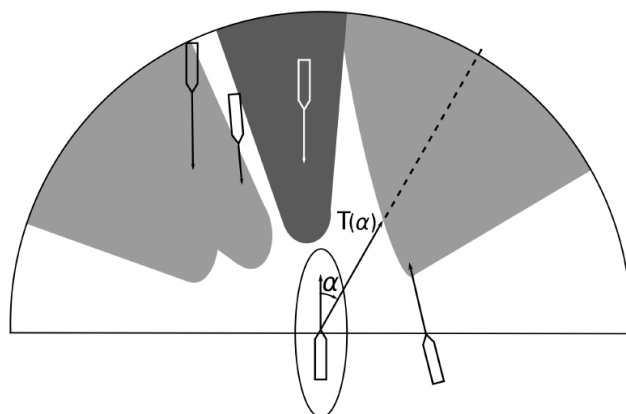


Abbildung 26: Grafische Darstellung der Konfliktgröße [WeE117]

Für die Risikobewertung muss jedes Schiff einzeln betrachtet werden, da das Risiko für jedes Schiff unterschiedlich sein kann. Da die Ship Domain abhängig von der Schiffsgröße ist, ist es möglich, dass sich ein kleines Schiff in der Ship Domain eines großen Schiffes befindet ohne dieses in der eigenen Ship Domain zu haben [WeE117].

Die AutorInnen filtern im Vorfeld einige Schiffe wie Fischerboote, Schlepper etc. heraus, da diese aufgrund ihrer eingeschränkten Manövrierbarkeit die Ergebnisse verfälschen können. Um Beinahekollisionen als solche zu definieren wurde festgelegt, dass die Eindringung in die Ship Domain (engl. domain intrusion; DI) eines anderen Schiffes mehr als 50% betragen muss um als Beinahekollision zu gelten. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass viele Konflikte effektiv gelöst werden können, dass jedoch die Anzahl an Konflikten mit wachsendem Verkehrsaufkommen steigt und auch das Auftreten von Beinahekollisionen zunimmt. Aus diesem Grund muss auch das Verkehrsaufkommen und der daraus resultierende eingeschränkte Manövrierbereich bei der Bewertung von Situationen berücksichtigt werden.

Vessel Conflict Ranking Operator (VCRO). vereint die Erkenntnisse mehrjähriger Forschung im Bereich der Detektion von Beinahekollisionen. Die zugrundeliegenden Arbeiten [GoKu11, MoGK12, GMLK12, ZGMK15] lassen sich in das minimum distance to collision (MDTC) model, den Vessel conflict ranking operator (VCRO), sowie der Nutzung eines Ship Domain Ansatzes zur ersten Feststellung der sicheren Distanz zwischen Schiffen zusammenfassen [ZGKW16].

Das in der Arbeit vorgestellte Framework zur Erkennung von Beinahekollisionen basiert grundlegend auf drei Faktoren: Der Distanz zwischen zwei Schiffen, der relativen Geschwindigkeit dieser, sowie der Peilungswinkel beider Schiffe. Um ihr Framework weiter zu verbessern, schlagen die Verfassenden vor die Schiffsgröße, als Parameter für die Ship Domain,

sowie das MDTC Konzept zu ergänzen. Sie versprechen sich durch diese Erweiterung eine schärfere Einteilung der Risikostufen in Bezug auf die Begegnungswinkel der Schiffe.

Für den VCRO wurden zunächst leitende nautische OffizierInnen befragt, um den Inhalt und die Struktur des mathematischen Modells zu definieren. Da CPA und TCPA nicht immer die gewünschten Ergebnisse bei der Bewertung von Begegnungssituationen liefern wurde auf einen weiteren Faktor, der bow cross range (BCR) zurückgegriffen. Bei diesem Faktor wird die Distanz zum Schiff auf Bugseite berechnet. Weiter wird für den VCRO nicht die Distanz zur Schiffsposition bestimmt, sondern vom Rand der einen Ship Domain zur anderen. Auch der Änderungsfaktor dieser Distanz spielt bei der Bewertung eine wesentliche Rolle. Die Manövrierbarkeit der Schiffe lässt sich mit MDTC aus AIS Daten ableiten. Dieser und die Schiffsgröße sind die identifizierten Faktoren zur Bestimmung des Kollisionsrisikos.

Der MDTC kann als Schwellenwert zur letzten Möglichkeit eines Ausweichmanövers angesehen werden. Der zugrundeliegende Faktor ist die Orientierung der Kurse zueinander. Ein großer MDTC-Wert sagt aus, dass das Manöver des letzten Augenblicks wesentlich eher eingeleitet werden muss als bei einem kleinen Wert. Dem MDTC liegt eine Fourier Reihe zugrunde (vgl. Abbildung 27).

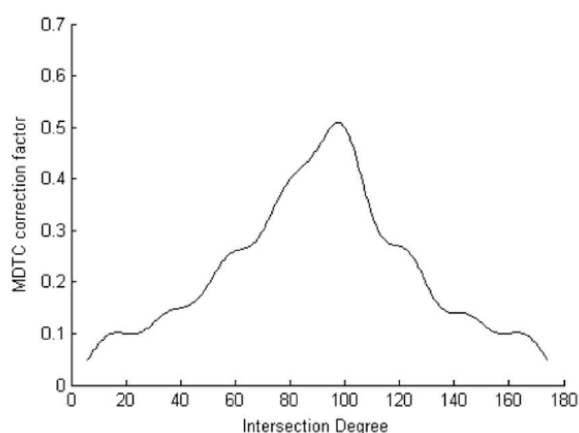


Abbildung 27: Kurvenverlauf des MDTC [ZGKW16]

Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem Kreuzungssituationen den größten MDTC Wert haben. Frontal- und Überholsituationen werden jedoch nicht so kritisch betrachtet, was vor allem an dem Aufkommen auf See beruht. Frontalbegegnungen sind, vor allem in Verkehrstrennungsgebieten sehr selten anzutreffen [MHKM10].

Die vorgestellte Formel für den VCRO benötigt die Attribute: Distanz zur Sicherheitsdomain (x), die Position der Sicherheitsdomain (l), die relative Geschwindigkeit (y) und die relative Orientierung der Schiffe zueinander (z) auch ‚phase‘ genannt.

$$VCRO(x, y, z, l) = (k \times (x - l_a)^{-1} \times y) \sum_{i=1}^n m_i \sin(i \times z)$$

Das Ergebnis der Publikation wurde abschließend evaluiert und die Ergebnisse mit der Karte der Risikogebiete des finnischen Golfs verglichen. Die Ergebnisse konnten jedoch nicht bestätigen, dass es einen Zusammenhang zwischen Gebieten mit hohem Kollisionsaufkommen gibt, in welchem auch viele Beinahekollisionen auftreten. Vor allem Hafengebiete zeigen eine hohe Anzahl an Beinahekollisionen. Dies liegt vermehrt daran, dass Schiffe im Hafengebiet einen geringen Passierabstand halten. Daran lässt sich erkennen, dass dieses Modell vornehmlich für offene Gewässer geeignet ist als für beschränkte Gewässer wie etwa Flüsse und Häfen.

3.2.2. Domänenübergreifende verwandte Arbeiten

Der Vollständigkeit halber sollen nun noch Ansätze aus anderen Domänen vorgestellt werden. Da Schiffe aufgrund ihrer Größe und der Fortbewegung auf dem Wasser eine enorme Trägheit aufweisen, ist der Schiffverkehr, verglichen mit dem Automobilbereich und der Luftfahrt, deutlich proaktiver. Demnach sind die Ansätze nur bedingt gut auf die Schifffahrt übertragbar, sollen aber für mögliche Denkanstöße hier einmal erwähnt werden.

Time-to-X Metriken. Um die Nähe zu einer Kollision a priori zu bestimmen wird in der Automobilbranche beispielsweise verstärkt auf die Time-to-X Metriken gesetzt. Hierbei handelt es sich um deterministische Metriken, welche die Zeit bis zu einem bestimmten Ereignis messen, um daraus die Kritikalität einer Situation zu bestimmen. Der gängigste Vertreter ist hierbei die Time-to-Collision (TTC) Metrik [JuSW17, S.150 f.]. Bei dem TTC Verfahren wird die Zeit bis zur Kollision berechnet, indem die Trajektorie der Fahrzeuge bestimmt wird und unter der Annahme, dass die Verkehrsteilnehmer ihr Verhalten nicht mehr verändern, durch Interpolation die Zeit bis zum potenziellen Unfall ermittelt. Weitere Metriken sind etwa die Time-to-Break (TTB), Time-to-Steer (TTS) oder die Time-to-React (TTR) [JuSW17, S.150]. Diese Metriken können a posteriori auf die fahrdynamischen Messdaten angewendet und mithilfe einer entsprechenden Trajektorienprädiktion kombiniert werden [Benm15].

Time-Measured-to-Collision (TMTTC) Metrik. Hayward (1972) hat in seiner Arbeit festgestellt, dass in einer Kollision involvierte Verkehrsteilnehmende ein Manöver durchführen, welches einen Unfall verhindert [Hayw72]. Dies ist unabhängig von der Art der Situation. Da es laut Hayward zu viele Bedingungen gibt, die Aktion und Reaktion Fahrender steuern, ist eine Klassifizierung von Situationen die Beinahe zu einer Kollision geführt hätten, nicht zielführend [Hayw72, S.26]. Aus diesem Grund wird das Time-Measured-to-

Collision (TMTC) Maßes für die Identifikation betrachtet. Laut dem Autor spiegelt die TMTC das subjektive Empfinden, welches zu einer Handlung Fahrender und zur Vermeidung des Unfalles führt, am besten wider. Die TMTC ist die Zeit die zwei Fahrzeuge benötigen, um zusammenzustoßen, wenn sie mit ihrer derzeitigen Geschwindigkeit und auf dem gleichen Weg fahren [Hayw72, S.27]. Die Annahme ist demnach, dass die Kurve der TMTC-Messung, während einer Beinahekollision, aufgetragen gegen die Zeit, nach oben gewölbt sein sollte, was die zunehmende und dann wieder abnehmende Gefahr bei einem Beinahe-Fehler widerspiegelt. Die theoretische Form einer einfachen Kurve der TMTC-Werte bei einem Beinahe-Fehltritt in Abhängigkeit von der Zeit erinnert demnach an ein U. Der maximale und damit normale und sicherste TMTC-Wert von zwei beliebigen Fahrzeugen für ein bestimmtes Verkehrsereignis wäre somit unendlich, da Fahrer normalerweise nicht auf Kollisionskurs mit anderen Fahrzeugen fahren. Der Mindestwert einer TMTC-Maßnahme für eine Beinahekollision wäre hingegen die Wahrnehmung Fahrender plus Reaktionszeit. Andererseits würde dies zu einer Kollision und somit nicht zu einem U-Turn führen [Hayw72, S.27 f.].

PEGASUS Ansatz. Einen Ausblick, wofür Szenarien und Situationen in der Freigabe und dem Testen von automatisierten Fahrzeugen genutzt werden können und was möglich ist, zeigt das in Kapitel 1 erwähnte Verbundprojekt PEGASUS. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt erarbeitete eine Gesamtmethode, welche Werkzeuge, Kriterien und Maßnahmen zur Funktionsbewertung, sowie Testkataloge zur Absicherung und Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen vorschlägt [MaSc16]. Im Zentrum dieser Methode steht eine Testfalldatenbank, welche Szenarien unterschiedlicher Granularität für die Feldabsicherung, Feldgeländetest oder auch Labortests/Simulationen bereitstellt und aus diesen auch neue Szenarien sammelt [PZBE17]. Durch diese „Database of relevant traffic situations“ soll der gesamte Produktentwicklungsprozess, der im Grunde auf dem V-Modell basiert, unterstützt werden. In dieser Datenbank sollen verschiedene Arten von Szenarien gesammelt werden, die basierend auf den funktionalen Anforderungen des zu untersuchenden Systems angefragt werden können. Veröffentlichungen über die konkrete Beurteilung von realen Verkehrssituationen gab es hingegen nicht. Das Projekt ist Mitte des Jahres 2019 ausgelaufen.

Collision Risk Estimator (CRE). Die vorgestellte Arbeit aus dem Bereich der Luftfahrt, adressiert die Themen autonome Kollisionserkennung und -vermeidung. Vor allem der erste Teil dieser Arbeit ist für die Erkennung kritischer Situationen relevant. Der hier vorgestellte collision risk estimator (CRE) nutzt den Kurs zweier Flugzeuge, sowie die Distanz zueinander, um kritische Situationen zu identifizieren [ABXP08].

Der vorgeschlagene Ansatz basiert auf der von der Federal Aviation Administration (FAA) ausgesprochenen See and Avoid (SAA) Vorschrift. Hierbei geht es darum aktiv nach Verkehrskonflikten zu suchen und diese schnellstmöglich zu vermeiden [Thom94]. Ein Risiko besteht laut dieser Vorgabe dann, wenn der Peilwinkel zwischen den TeilnehmerInnen über die Zeit konstant bleibt, während sich die Distanz zwischen den Verkehrsteilnehmern reduziert. Geht man folglich davon aus, dass das Risiko einer Kollision einer Gauß-Verteilung in Taylor-Reihen folgt (Cauchy Funktion), so lässt sich das Risiko unter Hinzunahme des Peilwinkels (β) wie folgt berechnen:

$$\text{Risk}(k) = \frac{1}{1 + \frac{1}{k-1} \sum_{i=k-N}^{k-1} (\beta(k) - \beta(i))^2}$$

Der Faktor N gibt hierbei die Historie der zu betrachtenden Peilwinkel, die zur Betrachtung herangezogen werden sollen, an. Bei der Distanz wird, ähnlich wie in der maritimen Domäne, von einer safety bubble ausgegangen, welche die minimale Distanz für mögliche Manöver definiert. Die Distanzen zur Beschreibung der safety bubble sind in der Luftfahrt regulatorisch festgelegt. Demnach ist nicht nur die Distanz für die Erkennung von Vorfällen ein wesentlicher Faktor, sondern auch der Peilungswinkel der VerkehrsteilnehmerInnen zueinander ausschlaggebend für die Entstehung einer Kollision und sollte daher zusätzlich betrachtet werden.

3.2.3. Reflexion der verwandten Arbeiten und Handlungsbedarf

Die vorgestellten Verwandten Arbeiten aus der Schifffahrt zeigen eine Vielzahl von Ansätzen zur Bewertung des Kollisionspotenzials auf und unterscheiden sich stark im Hinblick auf ihre Grundannahmen und dem Ziel die Nähe zu einer Kollision zu bestimmen. Dennoch sollen die Grundannahmen zunächst einmal kritisch beleuchtet werden. Wie bereits geschildert, konzentrieren sich die meisten Arbeiten auf den Faktor der Distanz zwischen zwei Schiffen und versuchen anhand diesem Maß eine Nähe zu einer Kollision zu bestimmen [DeCh10, PeSo11, TaBu10, Vani12, ZGKW16]. Welche Kontextinformationen für die Risikobewertung noch entscheidend sind und Informationen wie Wetter oder die Gewässerart mit in die Bewertung einzubeziehen wird von keinen der Arbeiten tiefgreifender untersucht (Anforderungen 9+16). Nur eine Arbeit betrachtet zusätzlich das Verkehrsaufkommen und somit den Handlungsspielraum der Schiffe als Kontextinformation (Anforderung 14), um das Kollisionspotenzial zu bewerten [WeEl17]. Drei weitere Arbeiten diskutieren das Thema zumindest an. Darüber hinaus ist es gerade bei einer Risikobewertung schwer eine eindeutige binäre Zuteilung durchzuführen, da augenscheinlich die Ansätze davon ausgehen, dass die Schiffe auf eine imaginäre Grenze zufahren, an welcher Sie ihre Handlungen orientieren. Die Untersuchung von historischen Begegnungsdistanzen zeigt jedoch

anschaulich, dass häufig eine Verteilung erkennbar ist und sich Schiffe ähnlich, wie in der verwandten Arbeit aus der Luftfahrt nach dem Prinzip See and Avoid verhalten und somit eher ein proaktives als ein reaktives Verhalten an den Tag legen und somit Konfliktsituationen frühzeitig vermeiden, indem Sie diese weitestmöglich umschiffen.

Nur eine der Arbeiten konzentriert sich darauf das Manöververhalten der Schiffe als Maß heranzuziehen (Anforderungen 18, 21 und 22) und daraus abzuleiten ob es sich um eine potenzielle Kollisionssituation handelt oder nicht [MeTC16]. Dabei wird der Fokus aber vor allem auf Kursänderungen gelegt (Kurs, Heading, ROT) und es findet keine Betrachtung der Geschwindigkeit (Anforderung 21) statt. Es muss jedoch konkretisiert werden, dass Manöver nicht nur als eine Kursänderung basierend auf dem ROT oder COG, wie in der Arbeit von Mestl et al. vorgestellt, definiert ist, sondern auch durch eine Geschwindigkeitserhöhung oder -reduktion.

Keiner der Ansätze berücksichtigt dabei die subjektive Wahrnehmung des schiffführenden Personals indem die Unsicherheit durch eine erschwerte Vorhersage des Verhaltens des Gegenübers bewertet und quantifiziert wird (Anforderung 23). Vier Arbeiten bauen ihr Wissen auf historischen AIS Daten auf. Wie bereits in den Grundlagen geschildert, entstehen Kollisionen aus menschlichem Fehlverhalten heraus, wodurch die Annahme getroffen werden kann, dass vor einem Unfall die Abweichung vom Normalverhalten festgestellt werden müsste, gefolgt von einer Einleitung eines Manövers von einem oder beiden der Verkehrsteilnehmenden. Eine systematische Herleitung der relevanten Kontextinformationen, wie sie auch im Rahmen der Ship Domain Ansätze diskutiert wurde fehlt bei den verwandten Arbeiten zum Kollisionspotenzial. Was weiter bei den existierenden Arbeiten nicht berücksichtigt oder zumindest nicht angesprochen wird, ist die Tatsache das die Menge an Begegnungssituationen zwar in der Theorie vollständig in Kreuzungs-, Überhol- oder Frontalsituationen eingeteilt werden können, in der Praxis die Zuteilung zu diesen Begegnungstypen nicht immer eindeutig möglich ist, was die Durchführung und auch Bestimmung von regelkonformen Fahrverhalten weiter erschwert. Auch diese Herausforderung bei der Beurteilung von Begegnungstypen führt weiter zu Unsicherheit bei der Entscheidungsfindung des schiffführenden Personals und muss mitbetrachtet werden.

Demnach lässt sich abschließend festhalten, dass keiner der Ansätze alle aus den Grundlagen hergeleiteten Anforderungen (Anforderungen 11-23) an eine Beinahekollisionserkennung erfüllt und somit ein Konzept erarbeitet werden muss, dass neben der Berücksichtigung der Distanz zwischen Schiffen zur Beschreibung des Kollisionspotenzials zum einen die für eine Beurteilung erforderlichen Kontextinformationen berücksichtigen und zum anderen ein Ansatz für die Bestimmung der Unsicherheit während einer Begegnung erarbeitet

werden muss. Eine Übersicht der Erfüllung und Nicht-Erfüllung der Anforderungen durch die verwandten Arbeiten kann der Tabelle in Anlage 2 entnommen werden.

4. Konzept zum Aufbau einer Beinahekollisionsdatenbank

Die vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass die existierenden Lösungen zur Erkennung von potenziellen Kollisionssituationen, die formulierten Ziele und die daraus resultierenden Anforderungen nicht vollends abdecken. Insbesondere die Punkte zur Berücksichtigung der Unsicherheit und der Fahrerreaktionen, sowie einer unvollständigen Betrachtung aller Kontext- und Einflussfaktoren zeigen die Forschungslücke auf die durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden soll. Das im Folgenden vorgestellte Konzept beschreibt einen Lösungsansatz zur Beantwortung der in Abschnitt 1.3 vorgestellten Forschungsfragen. Der Aufbau der Gesamtarchitektur und die Beschreibung der Kernkomponenten orientiert sich entsprechend am datenwissenschaftlichen Prozess und dem chronologischen Datenfluss (vgl. Abbildung 28). Dieser deckt sich auch mit den drei Teilforschungsfragen, unter der Voraussetzung, dass die Datenhaltung auch die Bereitstellung als Teilaufgabe vorsieht. Damit lassen sich die in Abschnitt 3.1 erhobenen Anforderungen den Schritten des datenwissenschaftlichen Prozesses zuordnen. Im Folgenden wird demnach der Aufbau und die Anreicherung einer Beinahekollisionsdatenbank beschrieben, welche als Ground Truth für die Validierung künftiger hochautomatisierter Fahrfunktionen eingesetzt werden kann. Das Gesamtsystem wird in drei Teilbereiche untergliedert und mit fortlaufenden Detaillierungsgrad beschrieben.

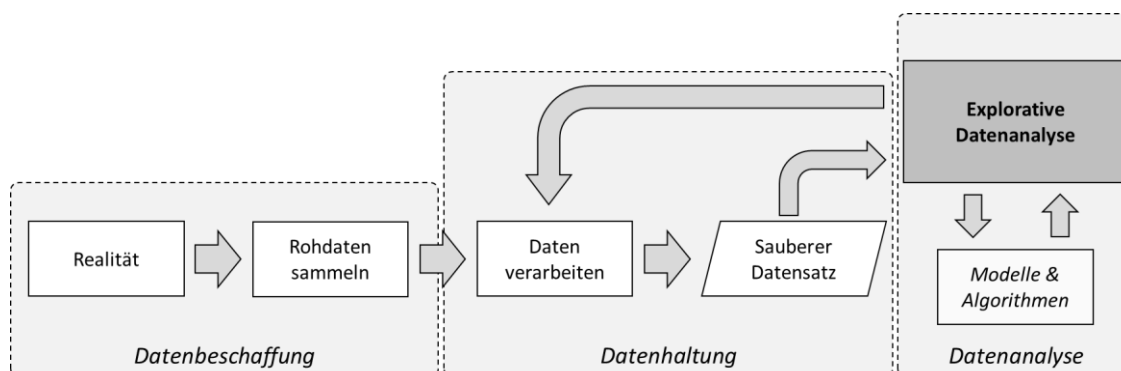


Abbildung 28: Der datenwissenschaftliche Prozess angelehnt an [ScOn13, S.41]

Die Schritte des vorgestellten Konzeptes lassen sich in die Phasen Datenbeschaffung, Datenhaltung und Datenanalyse unterteilen. In Abschnitt 4.1 wird zunächst ein Überblick der Komponenten des Gesamtsystems gegeben, welche anschließend im Detail beschrieben werden. Die Herleitung des vorgestellten Lösungskonzeptes erfolgt zielgerichtet auf Basis der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Anforderungen.

Datenbeschaffung. Das im nächsten Kapitel folgende Konzept zur Datenbeschaffung konzentriert sich auf die Adressierung und Erfüllung der Anforderungen 1-10, um aufbauend auf der existierenden maritimen Infrastruktur alle relevanten (Sensor-) Daten

aufzuzeichnen und die für die Bewertung der Begegnungssituationen wesentlichen Faktoren zu sammeln. Hierbei werden nicht alle Anforderungen direkt erfüllt, sondern zum Teil nur die Grundlage zur späteren Erfüllung der Anforderungen geschaffen. Hierfür werden die Daten transformiert und für die spätere Vorverarbeitung und Analyse persistiert. Die erforderlichen Daten werden direkt über ausgewählte (Sensor-)Quellen erfasst (Verkehrsbeobachtung) und in die Datenbank eingespeist. Dabei wird auf Erweiterbarkeit des zugrundeliegenden Sensorbestands geachtet und auf eine Infrastruktur die eine permanente Datensammlung ermöglicht. Dies ist erforderlich, um auch den Punkt der potenziellen Änderung des Status Quos zu adressieren, was bedeutet, dass durch die Etablierung neuer Assistenzsysteme oder auch Änderungen entlang der Wasserstraße (beispielsweise Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Änderung der Betonung) eine Neubewertung des Kollisionspotenzials vorgenommen werden kann.

Datenhaltung. Bei dem Konzept für die Datenhaltung werden die Vorarbeiten aus der Datenbeschaffung aufgegriffen und die Anforderungen 1-10, sowie die Anforderungen 24+25 adressiert. Das hier vorgeschlagene Datenmanagementsystem hat den Anspruch die Daten nicht nur rein für die Detektion von Beinahekollisionen vorzuhalten, sondern die Ergebnisse wieder in den Datenbestand einzuspielen und darüber hinaus auch andere Anwendungsfälle, wie die bereits mehrfach angesprochene Szenariengenerierung oder Systemevaluation. Dabei wird vor allem darauf geachtet, die nutzenden Personen durch ein Vorprozessierung zu unterstützen, wodurch zum einen die nutzende Person bei der Bereinigung der Daten entlastet wird und zum anderen alle aufbauenden Arbeiten dieselbe Vorprozessierung als Basis haben. Durch die Themenblöcke Datenbeschaffung und Datenhaltung wird die ingenieurwissenschaftliche Klammer um die Forschungsfrage geschlossen und die TF1 und TF3 beantwortet.

Datenanalyse. Dem Konzeptvorschlag zur Beantwortung der Fragestellung rund um TF2 und der Detektion von Beinahekollisionen wird sich im Kapitel der Datenanalyse gewidmet. Hier liegt der Fokus auf der Erfüllung der Anforderungen 11-23. Neben der reinen Untersuchung entsteht auch ein Lösungsvorschlag für ein Modell zur Erkennung von anomalen Verhalten und Fahrerreaktionen, welches als Grundlage für die Bewertung der Unsicherheit in Begegnungen dienen soll. Die Beobachtungsdaten werden darüber hinaus geclustert und mit den Einflussfaktoren angereichert, um Aussagen über das Kollisionspotenzial treffen zu können.

4.1. Gesamtarchitektur

Im Folgenden wird die Systemarchitektur zur Sammlung von Verkehrsbegegnungen, Detektion und Bereitstellung von Beinahekollisionen basierend auf der Struktur des

datenwissenschaftlichen Prozesses aus Kapitel 4 konkretisiert und auf die Systemarchitektur eines nachhaltigen Testfelds ausgerichtet [Brin18], um die Anforderungen 24+25 zu erfüllen. Die Ausrichtung an einer Testfeldarchitektur verfolgt das Ziel die Daten als Ground Truth während der Entwicklungsphase und insbesondere für die Validierungsphase von hochautomatisierten Schiffsführungssystemen zu verwenden und einen nahtlosen Übergang zwischen Erkenntnisgewinn und Betriebsphase zu schaffen. Die Architektur wird in den folgenden Kapiteln mit steigendem Detaillierungsgrad beschrieben (vgl. Abbildung 29).

Datenakquisitor. Einer der wesentlichen Aspekte ist zunächst die Erfassung der für die Erkenntnisgewinnung und Untersuchung von Begegnungssituationen notwendigen Informationen aus den vorherrschenden Gegebenheiten auf See. Demnach lässt sich die Herleitung notwendiger Informationen zur vollständigen Repräsentation der Realität auf digitaler Ebene als wesentlicher Beitrag bei der Datenbeschaffung identifizieren. Um die Daten- und Informationsbeschaffung auch für zukünftige und sich verändernde Anforderungen, bezogen auf die Abbildung des Realverkehrs, für den Erkenntnisgewinn zu gestalten, werden in Kapitel 4.2 erweiterbare Sensorknoten vorgestellt.

Nachrichtenorientierte Middleware. Die Bereitstellung der Daten erfolgt über eine nachrichtenorientierte Middleware, um die Integration und anwendungsfallbedingte Skalierbarkeit der Messstationen über den Beobachtungs- bzw. Untersuchungsraum zu gewährleisten. Hierbei wurde sich bereits auf die Architektur von Testfeldern konzentriert um die spätere Bereitstellung und Anbindung zu garantieren [Brin18].

Staging Area. Die Staging Area ist durch eine transaktionsorientierte Datenhaltung gekennzeichnet. Da die Daten bereits unmittelbar nach der Erfassung am Sensor in ein Zielformat überführt werden, werden die Daten in der Staging Area in eine Stammdatenbank geschrieben. Anders als bei der Staging Area üblich, werden die Daten daher hier nicht temporär, sondern permanent gespeichert. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass bei der kontinuierlichen Überführung der Stammdaten mittels ETL die jeweils neusten Daten in ein anfrageorientiertes Datenmodell überführt werden, um dadurch eine Entkopplung der Speicherungs- und der Analyseprozesse zu erreichen.

Data Warehouse. Das Data Warehouse besitzt keinen Anspruch an eine garantierte Aktualität. Dies bedeutet, dass die Daten nicht direkt aufbereitet und in das Data Warehouse geschrieben werden, sondern dass die gesammelten Daten aus der Stammdatenbank in einem regelmäßigen Zyklus in das Data Warehouse überführt werden. Da der Analyseprozess mit historischen Begegnungen arbeitet, besteht keine Notwendigkeit an minutenaktuelle Daten. Durch die Übersichts- und Metadaten die während und nach der Analyse anfallen, lassen sie

sich für die bedarfsorientierte Anfrage nach bestimmten Begegnungen und für weitere Anwendungsfälle nutzen.

Data Mining und Data Marts. Durch das Data Warehouse lässt sich eine Entkopplung der transaktionsorientierten Stammdatenbank von dem Analyseprozess erreichen. Die Verkehrssituationsdatenbank kann anschließend für unterschiedliche Anwendungsgebiete und Einsatzzwecke genutzt werden. Da für die unterschiedlichen Analyseprozesse nicht die gesamten aufgezeichneten Begegnungen notwendig sind, sondern nur ein Ausschnitt des Datenbestandes, lassen sich Data Marts aus dem Warehouse über die Sichten (engl. Views) bereitstellen. Hierdurch ist eine zielgerichtete Prozessierung der Daten möglich. Im Fall dieser Dissertation erfolgt über eine dieser Sichten die Bereitstellung der Beinahekollisionen und die Umsetzung der automatisierten Detektion von Beinahekollisionen. Außerdem ist die Bereitstellung anderer Verkehrssituationen zur weiteren Nutzung möglich.

Reporting Layer. Die Wissensentdeckung aus Datenbanken endet prinzipiell mit der Interpretation der gewonnenen Erkenntnisse und der damit verbundenen Präsentation der Ergebnisse. Um diese bereitzustellen und damit einen Input für die Entwicklung künftiger Systeme zu liefern, schließt die Gesamtarchitektur mit einer entsprechenden Präsentationsschicht ab.

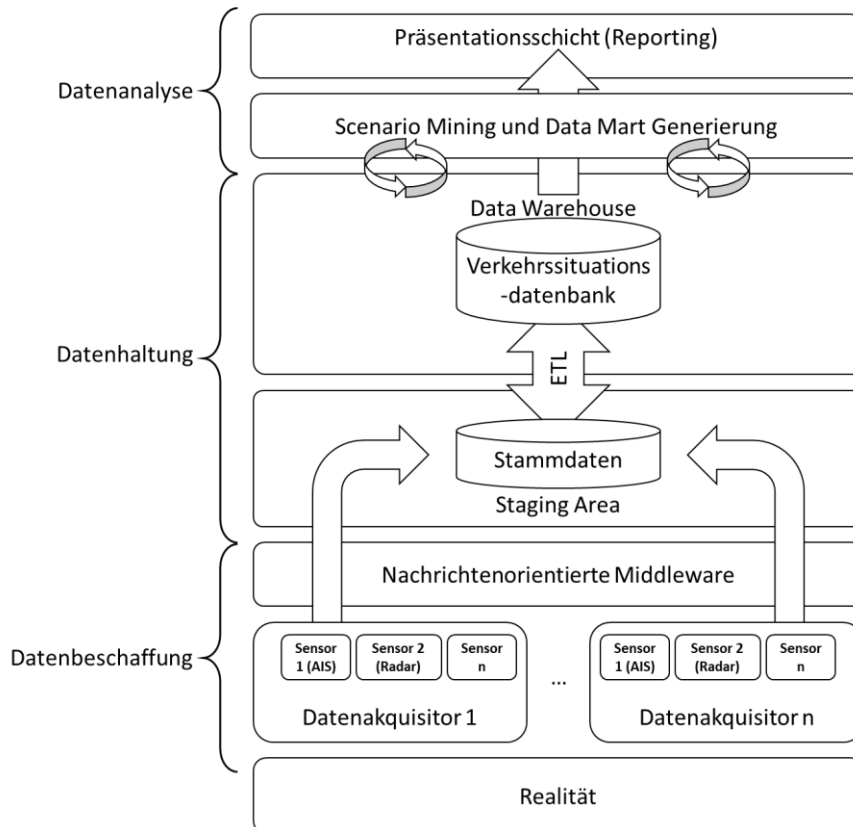


Abbildung 29: Konzeptioneller Aufbau des Gesamtsystems zur Detektion von Beinahekollisionen aus Verkehrsdaten

4.2. Datenbeschaffung

Die Überwachung von Seegebieten oder anderen Verkehrsräumen mittels Sensorik setzt eine geografische Verteilung der Sensorknoten voraus. Die Übertragung dieser Daten erfolgt in der Regel über Sensorknoten, die mit Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet sind und einen Teil der Sensorik der Datenakquisitoren bündeln. Dieses Sensornetz lässt sich für dieses Konzept als Teil des Geodatenbanksystems auffassen. Hierbei existieren zwei Ansätze die Sensornetze in das Datenbanksystem zu integrieren. Bei Sensorknoten welche die Möglichkeit besitzen, Daten zu speichern und auch Verarbeitungsschritte auszuführen, können diese mit Datenbankmanagementsystem (DBMS)-Funktionalität ausgestattet werden und als verteilte Datenbankkomponente betrachtet werden, welche Anfragen von Clients empfangen und die Ergebnisse zurückgeben können [Brin13, S.470 f.].

Eine andere Möglichkeit ist, die Messwerte an eine zentrale Datenbank zu übermitteln und von hier aus die Anfragen zu verarbeiten [Brin13, S.471 f.]. Der verteilte Ansatz stellt einige Voraussetzungen an die vorherrschende Infrastruktur, die bei der Realwelterfassung berücksichtigt werden muss. Zum einen müssen die Sensorknoten für Anfragen permanent erreichbar sein und zum anderen besteht die Notwendigkeit mögliche Objektredundanzen bei Sensoraufzeichnungen im Vorfeld zu beseitigen, was vor allem bei Gebieten, die von mehreren Sensorknoten observiert und demnach überlagert werden, zusätzlichen Kommunikationsaustausch bedarf. Aus diesem Grund wird für die Seeraumüberwachung ein dezentraler Ansatz vorgeschlagen. Dennoch müssen aufgrund der geografischen Entfernung des Testfelds die Sensordaten zunächst über das Internet übertragen werden. Das OGC hat hierfür eine Basisarchitektur, für Sensordaten mit Raumbezug, entworfen. Die Sensor Web Enablement (SWE) Initiative schlägt in diesem Zug eine Reihe an Spezifikationen zu Datenmodellen und Geodiensten vor [Brin13, S.471 f.]. Das Ziel ist es, Interoperabilität zu schaffen, indem alle Sensordaten im gleichen Format vorliegen und mit dem gleichen Protokoll kommuniziert werden, ungeachtet der Sensorspezifikationen auf der physischen Ebene. Dies ermöglicht auch die Erweiterbarkeit des Sensornetzes. Realisieren lässt sich dies zum einen durch eine sogenannte Sensor Model Language (SensorML), welche die Metadaten des Sensors als Extensible Markup Language (XML)-Datenmodell beschreibt. Dafür beinhaltet das Modell Angaben zum Sensor, wie etwa den Messgegenstand, Informationen zur Sensoridentifikation, die Position bzw. den Bereich der Messung, als auch die Mess- bzw. Verarbeitungsprozesse, welche die Sensordaten ggf. durchlaufen [BPRD08, S.177]. Ein Sensor wird laut OGC als Prozess beschrieben der über Attribute wie Inputs, Outputs, Position oder Schnittstellen verfügt (vgl. Abbildung 30). Auch die Schnittstellenbeschreibung spielt bei der SensorML eine Rolle. Daneben unterscheidet der Standard zwischen physikalischen und nicht-physikalischen Prozessen. Demnach kann auch eine rein mathematische Operation

ein Prozess sein (nicht-physikalisch). Bei SensorML lassen sich physikalische Prozesse, wie z. B. Detektoren, Aktoren und Sensorsysteme, bei denen Informationen über ihre Positionen und Schnittstellen relevant sein können, modellieren. Man unterscheidet auf der physikalischen Seite zwischen Systemen (Verbund) und einzelnen Komponenten. Bei einer Komponente kann auch die Verarbeitungsmethode beschrieben werden, um die Transformation der Daten reproduzieren zu können. Ein System ist somit ein Verbund von einzelnen Komponenten wodurch am Ende auch die Verbindung zwischen den Komponenten, sowie die Komponenten, die ein einzelnes System beschreiben, modelliert werden müssen [Bott02].

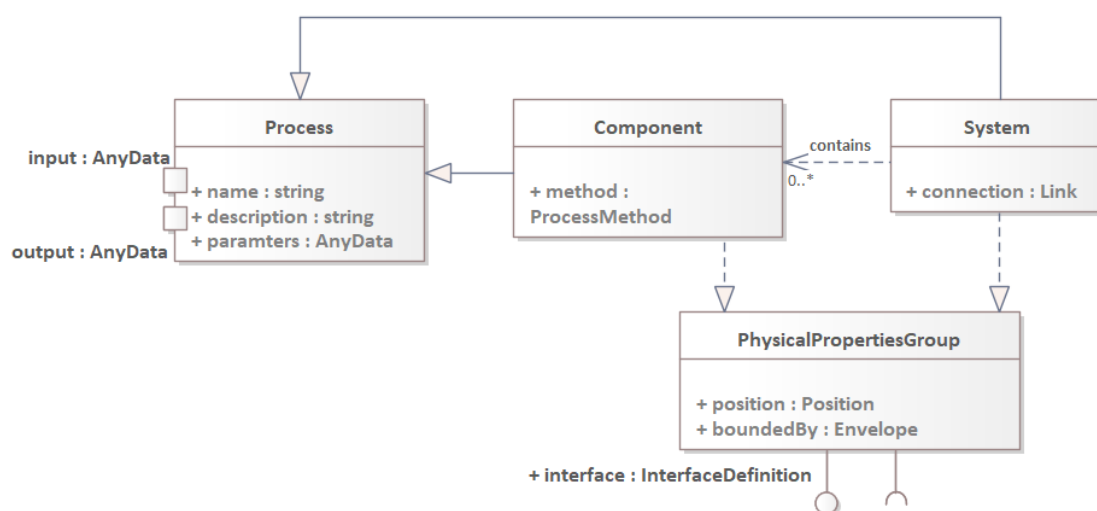


Abbildung 30: Vereinfachte Darstellung eines Auszugs aus dem SensorML-Modell zur Beschreibung eines Sensorsystems nach [Bott02]

Die Beobachtungen und Messungen der Sensoren werden mit dem OpenGIS Observation & Measurement (O&M) Standard kodiert [BPRD08, S.177]. Hierbei handelt es sich um ein high-level Framework, das die Flexibilität und Erweiterbarkeit von XML zu Nutze macht [BPRD08, S.178].

Der ISO-Standard 19156 des OGCs, welcher die O&M Datenstruktur beschreibt, definiert fünf Attribute, sechs Assoziationen und vier Bedingungen [Cox11, S.9]. Demnach wird eine Beobachtung oder Messung durch den erfassten Parameter, die Position mehreren Zeitstempeln, sowie der Qualität des Ergebnisses definiert (vgl. Abbildung 31). Der Standard unterscheidet zwischen drei Zeiten, die einer Messung angehängt werden können. Die phenomenonTime ist der Zeitpunkt, zu dem das Ergebnis für die Eigenschaft des interessierenden Merkmals gilt. Die resultTime beschreibt den Zeitpunkt, zu dem das Ergebnis verfügbar ist und somit die durchlaufende Prozedur abgeschlossen ist. Die resultTime und die phenomenonTime können daher auch identisch sein. Die validTime kann, wenn benötigt, beschreiben für welchen Zeitraum das Ergebnis verwendet werden soll, also valide ist.

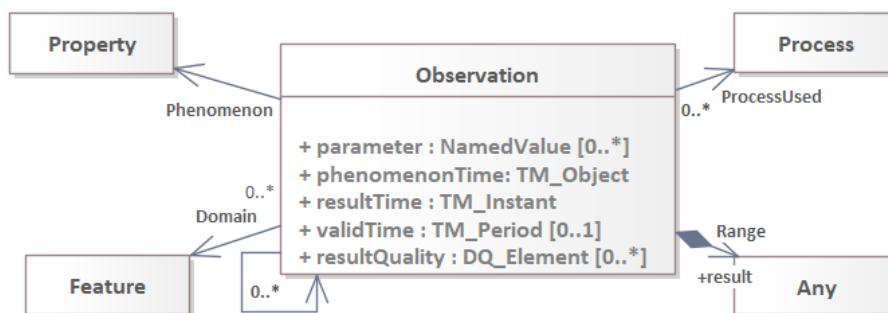


Abbildung 31: Vereinfachte Darstellung eines Auszugs aus dem O&M-Modell zur Beschreibung einer Beobachtung nach [Cox11]

SensorML und das O&M Datenmodell sind Grundvoraussetzung für den Sensor Observation Service (SOS). Der SOS Standard spezifiziert eine Schnittstelle, die über einen Webservice realisiert wird, über den sich Sensoren anmelden und verwalten lassen. Zudem lassen sich die erfassten Messdaten abfragen. Der SOS wird zwischen dem Client und einer Datenbank oder einen Datenstrom eingebunden. Für Anwendungen, bei denen keine permanente Verbindung mit den Sensorknoten aufrechterhalten werden kann, gibt es die transaktionale Lösung SOS-T die durch die InsertObservation Operation anfallende Beobachtungen verarbeiten kann [BPRD08].

Da die genutzte heterogene Sensorik der maritimen Domäne in Zeiten der Digitalisierung ebenfalls einem stetigen Wandel unterliegt, sollte die Anforderung an eine nachhaltige Datenbeschaffung hier berücksichtigt werden. Nachhaltigkeit lässt sich unter anderem durch eine gewisse Erweiterbarkeit und Homogenisierung der Datenbeschaffungskomponente realisieren. Die Erweiterbarkeit lässt sich über eine einheitliche Bereitstellungsschnittstelle der Beschaffungskomponente sicherstellen und durch den Einsatz des SWE Frameworks unterstützen. Homogenisierung der Sensorik kann entsprechend durch ein einheitliches Datenmodell, wie etwa das O&M Datenmodell erreicht werden. Die Realisierung und Verarbeitung dieser Schritte gelingen durch das Datenakquisitionssystem (vgl. Abbildung 32). Die realen Phänomene (x) werden von einem Sensor erfasst und in ein digitales Signal (f) umgewandelt. Dieses Signal wird anschließend in das einheitliche Format überführt.

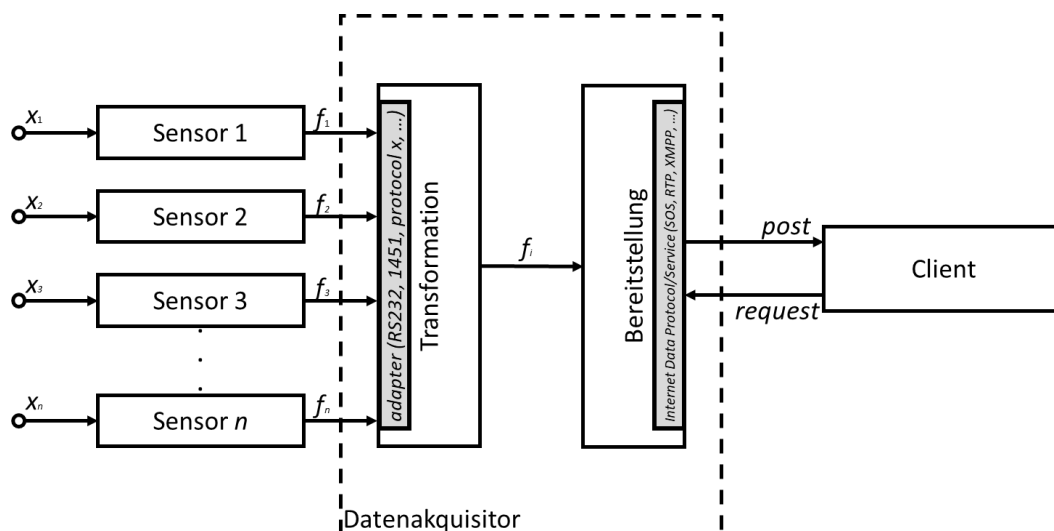


Abbildung 32: Datenakquisitionssystem nach [Kiri02]

Das Konzept für die Transformation der heterogenen Sensordaten und Standards hat den Anspruch auf Erweiterbarkeit und Verlustfreiheit der aufgezeichneten Daten. Die Eigenschaften Autonomie, Heterogenität und Verteilung sind eng mit den Federated Database Systems (FDBS) verknüpft. Da bei FDBS die einzelnen Datenbanken (Komponenten) von dem föderierten DBMS getrennt sind und bei Anfragen auf die Datenbasis ein Transformationsprozess angestoßen wird, wird die 5-Ebenen Architektur von FDBS adaptiert und für die Datenakquisitoren eingesetzt (vgl. Abbildung 33). Für das Konzept zur Datenmodelltransformation wird lediglich die Struktur und die einzelnen Schichten adaptiert. Es wird nicht, wie bei FDBS üblich, die Daten auf der Komponenten Datenbank (hier Ebene der Datenakquisitoren) erhalten und die Daten über die einzelnen Schichten angefragt.

Auf der untersten Ebene befindet sich das lokale Schema, welches zunächst durch die Formate der eingesetzten Sensorik abhängig ist. Die Schema Translation überführt die heterogenen, zumeist proprietären Formate in ein einheitliches, kanonisches Datenmodell (engl. canonical data model; CDM), das Komponenten Schema. Für den Prozess der Schema Translation ist ein Datenmapping notwendig, welches auf Datenakquisitor-Ebene erfolgt. Das Export Schema (Level 3) reduziert das Komponentenschema, um die wesentlichen Informationen und regelt die Zugangsberechtigungen. Im Falle unserer Sensorknoten werden hier die Informationen zur Verteilung der Sensordaten über die nachrichtenorientierte Middleware geregelt. Das Föderierte Schema fasst die einzelnen Export Schema zusammen und dient als Mittler zwischen dem einheitlichen, internen Datenmodell und dem anwendungsspezifischen, externen Schema, hierdurch ist es möglich verschiedene Standards zu implementieren, welche die Integrität in die Anwendung sicherstellt. Der FDBS Entwicklungsprozess stellt darüber hinaus die Möglichkeit bereit ein Data Dictionary zu integrieren. Für die Transformation wird ein einheitliches Datenmodell benötigt, um die verschiedenen

Eingangsdaten abbilden zu können. Da die oben beschriebene Observation-Class eine Instanz der GF_FeatureType Metaklasse der ISO 19109:2005 ist, kann die Beobachtung eines Sensors durch die nachträgliche Ergänzung von Features auch künftige Sensordaten repräsentieren. Um der zukünftigen Entwicklung der maritimen Domäne gerecht zu werden, empfiehlt sich die Nutzung der etablierten einheitlichen maritimen Datenstruktur (engl. Common Maritime Data Structure) des S-100 Frameworks wie von der e-Navigationsarchitektur der IMO vorgeschlagen [Iho10, Jo0113]. Da auch der S-100 Standard auf die entsprechenden ISOs zur Geographic Information und somit auf die XML Schema zurückgreift, lässt sich eine Observation gemäß SWE auch als S-100 Objekt repräsentieren. Die Überführung in ein einheitliches Datenformat unterstützt eine skalierbare Kopplung des Datenakquisitionssystems an die Infrastruktur.

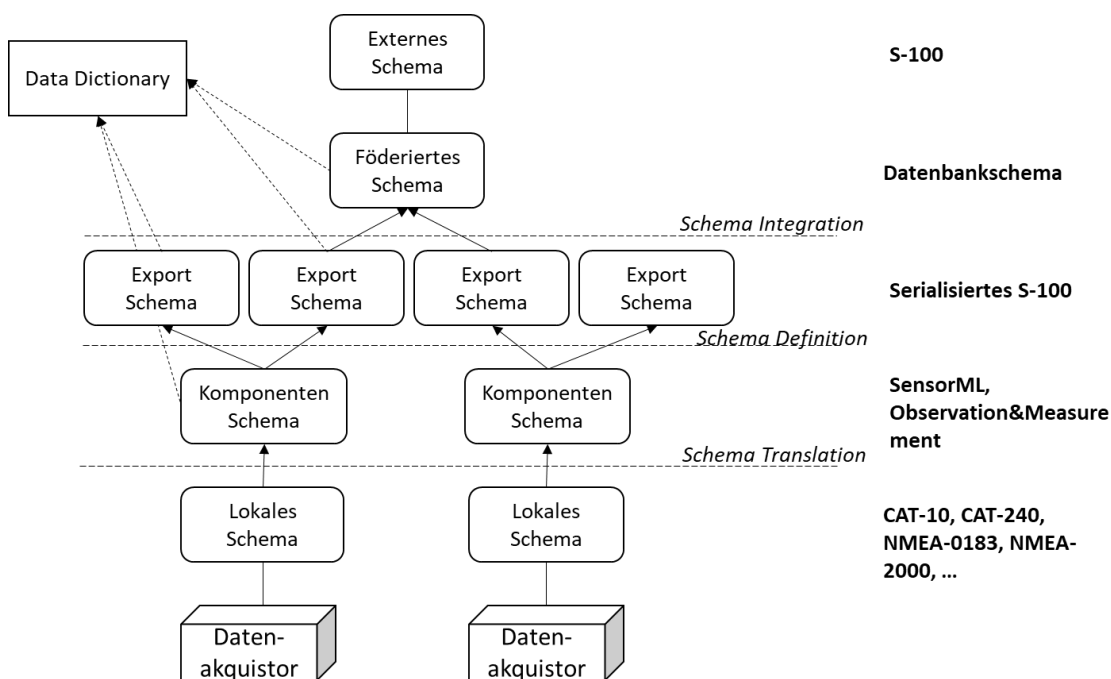


Abbildung 33: Bottom-Up Datentransformationsprozess föderierter Systeme nach [ShLa90, S.217]

4.3. Datenhaltung

Das Ziel der Datenhaltung ist, die Datenbeschaffung und Datenspeicherung voneinander zu trennen, um eine ad-hoc und permanente Auswertung der Daten zu begünstigen. Dies ist notwendig, um spontane Änderungen im Schiffsverkehr, insbesondere der Verkehrsteilnehmenden wahrzunehmen. Eine generelle Auswertung bestehender historischer Datensätze, wie es etwa in den NDS oder FOT der Fall ist, ist aufgrund der möglichen Änderungen des Status Quo des Verkehrssystems, wie etwa durch die Etablierung neuer Assistenzsysteme oder auch der Verbesserung von Manövriereigenschaften von Schiffen, nicht zielführend.

Veränderungen bewirken eine ständige Neuanpassung bestehender Erkenntnisse und Bewertungen.

Durch den Einsatz einer nachrichtenorientierten Middleware kann das Datenhandling von der Middleware übernommen werden. Durch diese kann eine Entkopplung der Sensorknoten an die Geodatenbank erreicht werden (vgl. Abbildung 34). Dies hat den Vorteil, dass auch weitere NutzerInnen die Live-Daten aus den Sensormessungen verwenden und weiterverarbeiten können. Tendenziell weist das SWE Framework einen zentralen Ansatz auf, weshalb immer ein Server für die Koordination zuständig ist.

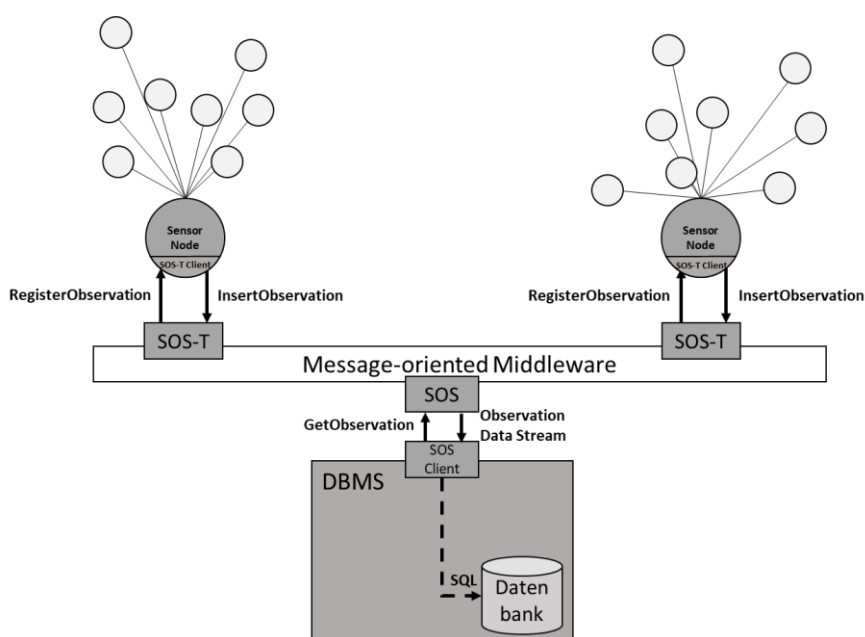


Abbildung 34: Einsatz von SWE Services in einer Bus-Netzwerk Architektur

4.3.1. Spatial Data Warehouse

Um sowohl der Speicherung der Daten als auch der Auswertung dieser gerecht zu werden, ist eine Entkopplung dieser beiden Prozesse notwendig (vgl. Abbildung 35). Die aufgezeichneten Daten müssen zunächst ohne Vorverarbeitung persistiert werden, um einen Daten- und Informationsverlust zu vermeiden. Demnach ist auch eine komplexe Datenstruktur innerhalb der Datenbank nicht zielführend. Der Aufbereitungsaufwand kann je nach Komplexität der Struktur zu einer Verzögerung der Speicherung führen, was die Datenspeicherung behindert. Die Daten werden ohne Überprüfung auf Fehler, Duplikate oder ähnliches in die Stammdatenbank geschrieben. Diese Datenbank ist auf die Verarbeitung von Transaktionen ausgerichtet und ist aufgrund ihrer flachen Struktur und der Minimierung von Indizes nicht für Analysezwecke geeignet.

Aufgrund der Tatsache, dass die erfassten Tracks und Situationen erst retrospektiv untersucht werden können, spielt die Echtzeit bei der Analyse von Szenarien wie erwähnt eine

untergeordnete Rolle. Die Daten werden daher in einem regelmäßigen Zyklus aufbereitet und in ein normalisiertes Datenformat überführt. Die Situationsdatenbank bildet die Beziehungen zwischen den Tracks in einer Begegnungssituation ab und reichert diese mit historischen Wetterdaten (Wetterklassen) und den Kontextinformationen aus der elektronischen Seekarte an. Hierbei werden Metadaten wie die minimale Distanz während der Begegnung errechnet, sowie eine Einordnung in Begegnungsklassen erzeugt (vgl. Abschnitt 4.4). Aus diesem Spatial Data Warehouse lassen sich so die Begegnungstypen anfragen, welche für die spätere Analyse und Detektion der Beinahekollisionen notwendig sind.

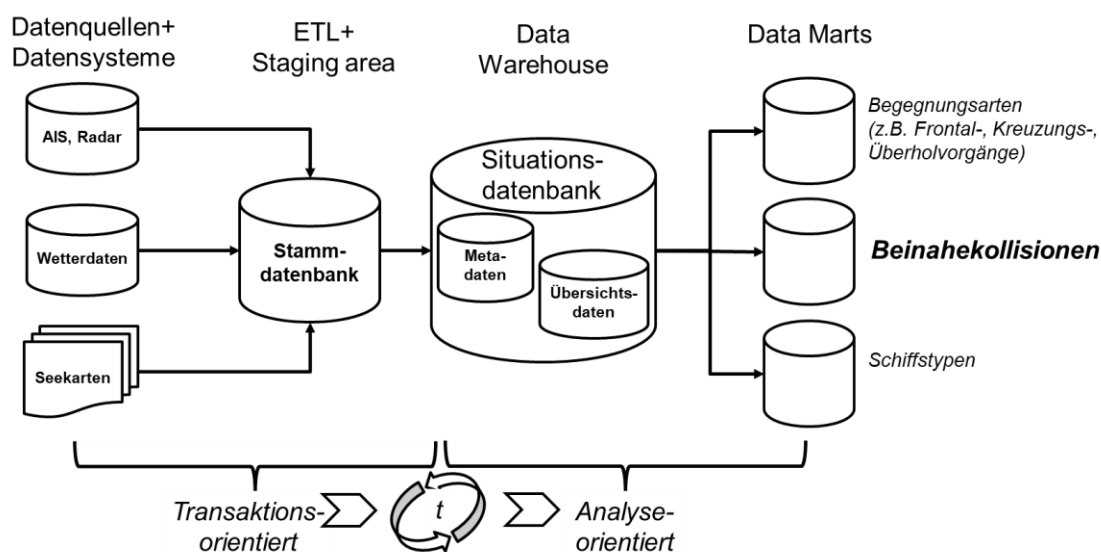


Abbildung 35: Data Warehouse Architektur zur Speicherung von Begegnungssituationen

Die Data Marts lassen sich auch für die Generierung einer Wissensbasis für bestimmte Situationen nutzen, um Erkenntnisse über Normalverhalten von Begegnungsarten zu generieren. Beispielsweise lassen sich aus diesem Data Warehouse Kreuzungssituationen zwischen gleichen Schiffstypen anfragen, wodurch die NutzerInnen einen Katalog mit entsprechenden Begegnungen dieses Profils erhalten.

Um die erhobenen Daten zu persistieren und den zuvor definierten Anforderungen gerecht zu werden wird im Folgenden das anforderungskonforme Datenmodell beschrieben (vgl. Abbildung 36). Um die heterogenen Daten in einer Datenbank zu speichern, werden die spatiotemporalen Daten zunächst auf die wesentlichen Faktoren (Zeit und Raum) reduziert und die zusätzlichen Attribute als Beschreibung des Datensatzes betrachtet. Die daraus resultierende Entität des *Plots* reduziert den erfassten Datensatz somit zunächst auf eine Position zu einem bestimmten Zeitpunkt. Diese Minimalbeschreibung eines Objekts ermöglicht die nachhaltige Erweiterbarkeit der Sensorlandschaft.

Um den Anforderungen gemäß der Datenqualität und Reproduzierbarkeit gerecht zu werden, werden den Plots stets genaue Informationen über den *Sensor* (sollte ein Sensor mehrere Informationen bereitstellen wird auch der *Sensorport* angegeben) und den Standort (*Station*) des erfassten Datensatzes angefügt. Hierdurch lassen sich defekte Sensoren schneller aufdecken und auch die Filterung gemäß Sensorik, sowie Standort kann durch diese Information verbessert werden. Im Datenaufbereitungsprozess werden die zuvor beschriebenen Fehler, die bei den Daten auftreten können durch einen Fehlercode dem Datensatz angehängt. Die Entität *Error* besteht somit aus einem Beschreibungstext sowie einer ID zum Verständnis des Fehlers, um die für die anwendende Person unbrauchbare Daten zur Abfrage zu filtern.

Durch Vererbung lassen sich diese Attribute beliebig oft ableiten und mit weiteren Informationen beschreiben. Die nächste hinreichende Abstraktionsform wird durch den *Locationplot* repräsentiert. Wie aus den Grundlagen, sowie den verwandten Arbeiten hergeleitet, spielen vor allem die Geschwindigkeit und der Kurs eines Objekts bei der Betrachtung von Beinahekollisionen eine wesentliche Rolle. Hieraus ergibt sich die Schnittmenge zwischen den Informationen von beispielsweise AIS und Radar. Bei der Transformation des Radarvideos in Radartracks wird der Datensatz, um die Geschwindigkeit sowie den Kurs des Ziels erweitert. Da diese Zusatzinformation für die Lageeinschätzung zweckdienlich ist, bildet diese Entität somit die nächste Abstraktionsstufe. Zur vollständigen Beschreibung der Datensätze ohne Informationsverlust werden die restlichen Werte mithilfe der Ableitung vom Locationplot in neuen Entitäten abgebildet. *Dynamicplot* beschreibt beispielsweise die dynamischen AIS-Nachrichten. Hier werden die zusätzlichen Werte, die über AIS übermittelt werden, persistiert. Der *Radarplot* kennzeichnet den Datensatz als Radarobjekt. Zur genauen Identifikation erhalten die Radarziele jeweils eine *TargetID*, um die Verbindung einzelner Plots aufzuzeigen.

Die einzelnen Plots werden so zu einem *Track* zusammengefügt. Dieser beinhaltet den Start- und Endzeitpunkt des Tracks mit Metainformationen wie den *Voyagerelatedinformation* oder auch den Charakteristiken des *Targets*. Reisebezogene Daten, die sich über den Verlauf des Tracks ändern, aber nicht für jeden Plot unterschiedlich sind, werden entsprechend in der *Voyagerelatedinformation* Entität beschrieben und ebenfalls mit Start- und Endzeitpunkt, sowie der ID des Tracks versehen. Schiffe, die im Hafen warten und anschließend zu einer neuen Reise aufbrechen, erhalten entsprechend eine neue *TrackID*. Für den maritimen Anwendungsfall wird vom *Target* eine Entität *Vessel* abgeleitet, um weitere Schiffscharakteristiken, die auch von externen Quellen, wie etwa dem Lloyd Register bezogen werden können, zu beschreiben. Aber auch weitere Informationen, die über AIS versendet werden

4.3.2. Vorverarbeitung

Um die Aussagekraft von Erkenntnissen basierend auf Datenanalysen zu untermauern, muss die Qualität der zugrundeliegende Datenbasis bewertet werden. Für eine Datenbasis die für unterschiedliche Anwendungsfälle eingesetzt werden kann, besteht die Herausforderung darin, dass die Daten bei der Identifikation von Fehlern in den Datensätzen nicht verändert werden dürfen, sondern lediglich markiert werden sollten. Die Qualitätsmessung hängt maßgeblich davon ab, welche Felder und Informationen aus den Daten zur Erstellung von Modellen genutzt werden und wie gravierend fehlerhafte Daten zur Weiterverarbeitung sind. Demnach kann eine Qualitätsbewertung erst durchgeführt werden, wenn der Anwendungsfall bekannt ist und auch der Einfluss den die Korrektheit oder eben die Fehler in den Datensätzen auf das Ergebnis haben können. Um eine einheitliche Grundlage zu haben können die Auffälligkeiten jedoch während der Vorverarbeitung kenntlich gemacht werden, um beispielsweise bei der Anfrage der Daten schon im Vorfeld fehlende oder unvollständige Daten aus dem Datensatz herauszufiltern.

Aber auch um reale Situationen zu reproduzieren und unverfälscht in der Simulation für das szenariobasierte Testen zu nutzen, müssen die erfassten Daten unverändert in den Einsatzbereich, wie etwa das SuT, eingespeist werden. Eine Kennzeichnung der Daten im Hinblick auf Qualität und Fehler kann die anwendende Person dabei unterstützen, ein Verständnis über die bereitgestellten Daten zu erhalten. Weiter ist das Wissen über semantische Fehler die bspw. bei der Datenaufzeichnung oder Übertragung aufgetreten sind, entscheidend um logische Fehler, wie ungewöhnliches Verhalten von Verkehrsteilnehmer, korrekt aufdecken zu können. In der Literatur unterscheidet man zwischen „missing values“, „incomplete data“ und „outliers“ [DaJo03, S.139 ff.].

Das Fehlen eines gesamten Datensatzes, wie etwa einer gesamten AIS Nachricht, ist schwierig zu kennzeichnen. Dies lässt sich, sollte es sich um verlorene Daten handeln, durch eine redundante Sensorlandschaft erreichen, indem ein Gebiet von mehreren Sensoren observiert wird. Bei bewusster Deaktivierung des AIS eines Zielschiffs, kann nur durch alternative Sensorik oder Beobachtung der Track eines Schiffes bestimmt werden. Da AIS wie in den Grundlagen in Kapitel 2.3 ein self-reporting System ist und die Zuständigkeit der Korrektheit der Daten bei Sender liegt, kann mittels AIS-Radar-Assoziation eine Aussage über die Existenz von Schiffen getroffen werden. Hierfür wird auf eine Multisensor-Datenfusion zurückgegriffen. Unter einer Datenfusion versteht man einen mehrstufigen Prozess, welcher Daten aus verschiedenen Sensorquellen miteinander vereint, um Schlussfolgerungen zu ziehen, die unter Verwendungen eines einzelnen Sensors nicht möglich wären [Klau99, S.1]. Dabei spielen die Verknüpfung, Korrelation und Kombination von Daten und Informationen

aus einzelnen und mehreren Quellen eine Rolle, um daraus verfeinerte Positions- und Identitätseinschätzungen, sowie vollständige und zeitnahe Bewertungen von Situationen und Bedrohungen und deren Bedeutung zu erhalten [LILH09, S.22 f.]. Die im Jahr 1986 gegründete Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Working Group hat im Jahr 1991 ein Data Fusion Lexicon herausgebracht [Whit91], sowie ein Datenfusionsprozessmodell (vgl. Abbildung 37) welches bis heute als Standard gilt [ESWH05, S.274 f.]. Das JDL Prozessmodell unterteilt die Fusionierung in fünf Ebenen, wobei die erste Ebene (Level 0) die Vorverarbeitung der Quellen beschreibt und daher nicht als vollwertiger Schritt betrachtet wird [Klau99, S.20 ff.].

Der Begriff Sources (dt. Quellen) meint in diesem Kontext nicht ausschließlich die Sensorik, sondern auch Datenbanken in welchen bereits Daten gespeichert sind. Ziel ist es, die Daten der unterschiedlichen Quellen zu einem bestimmten Objekt zu präzisieren oder darüber hinaus auch die vorliegende Situation (insbesondere um das Objekt herum) zu beschreiben. Bei dem JDL Prozessmodell handelt es sich nicht um einen festen Prozess, der stets alle Ebenen durchlaufen muss [HaLl97, S.12].

Source Pre-Processing (Level 0) Auf der untersten Ebene geht es darum, den Overhead an für die Fusion irrelevanten Daten zu reduzieren und nur die Daten herauszufiltern die unmittelbar für die Fusion notwendig sind [HaLl97, S.12].

Object Refinement (Level 1) Auf dieser Ebene geht es darum, Informationen aus den verschiedenen Quellen, die die Position oder die Identität betreffen zu bündeln, um eine verfeinerte Repräsentation einzelner Objekte zu erhalten. Hierfür werden die Daten unter anderem vereinheitlicht und auch die Schätzung der Position über die Zeit kann in diesem Schritt erfolgen, wenn beispielsweise Positionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden [HaLl97, S.12]. Daher unterscheidet man hier auch zwischen einer Positions- und einer Identitätsfusion [Klau99, S.33 ff.].

Situation Refinement (Level 2) In der Stufe 2 geht es bei der Verarbeitung um die Entwicklung einer Beschreibung der aktuellen Beziehungen zwischen Objekten und Ereignissen im Kontext ihrer Umgebung. Der Fokus liegt auf relationalen Informationen (d. h. physische Nähe, Kommunikation, kausale, zeitliche und andere Beziehungen), um die Bedeutung einer Sammlung von Entitäten zu bestimmen. Vor allem die Interpretation von Daten, auch Umgebungsinformationen über Gelände, umgebende Medien, Hydrologie, Wetter und anderen Faktoren werden in diesem Schritt analysiert. Dabei kommen formale als auch heuristische Techniken zum Einsatz [HaLl97, S.12].

Threat Refinement (Level 3) Die Verarbeitung auf Level 3 soll durch die Projektion der aktuellen Situation auf die Zukunft Rückschlüsse über potenzielle Bedrohungen und mögliche Handlungen liefern. Dies ist vor allem für die Kritikalitäts- und Risikobetrachtung wichtig, da hier auch die Auswirkung von unsicherem Wissen untersucht werden. Häufig werden in diesem Schritt spieltheoretische Techniken angewendet [HaLl97, S.12].

Process Refinement (Level 4) Bei dem vierten Verarbeitungsprozess geht es eher um einen Metaprozess, der zur Überwachung der Datenfusion, Echtzeitsteuerung und Verbesserung des Fusionsprodukt herangezogen wird [HaLl97, S.12].

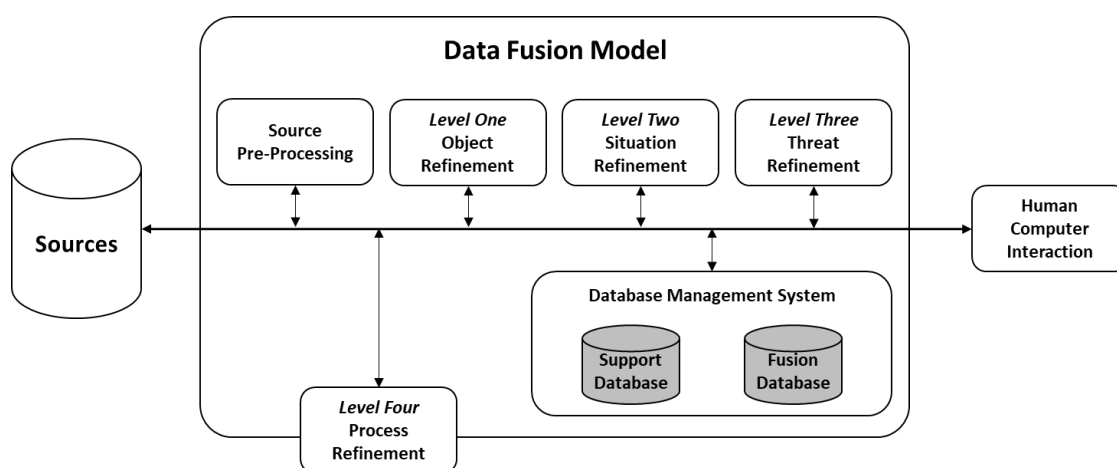


Abbildung 37: Prozessmodell zur Datenfusion nach [HaLl97, S.11]

Die Assoziation und gegebenenfalls Fusion von AIS und Radar lässt sich dem Level 1 zuordnen. Die Assoziation von AIS und Radartracks ist zur Überprüfung der Existenz von Schiffen für die Datenqualität hilfreich. Die Fusion kann mitunter zu starken Abweichungen führen, da der Mittelpunkt von erfassten Radartargets stark vom Detektionswinkel abhängig ist und somit nicht immer mit dem Mittelpunkt des Schiffes und damit der AIS Position übereinstimmt.⁵ Für eine Glättung und Interpolation von AIS und Radartargets eignet sich hingegen eine Mischung aus einer linearen Interpolationen für Zeitreihen mit wenig Manövern und die kubische Interpolation bei Manöverfahrten [ChCG00, ZHTM18].

Das Ergänzen von fehlenden Werten kann bei Abhängigkeit zu vorhandenen Informationen lediglich geschätzt werden. Bei den dynamischen Informationen kann durch die Überprüfung von zwei Werten (z.B. Geschwindigkeit und Position) gegen einen anderen (z.B. Kurs) der fehlende Wert retrospektiv bestimmt werden. Unvollständige Datensätze lassen sich in abgeschnittene (truncated) und zensierte (censored) Daten aufteilen [Daj03, S.144 ff.].

⁵ Untersucht und veröffentlicht in: Jankowski, Dennis; Lamm, Arne; Hahn, Axel: Determination of AIS Position Accuracy and Evaluation of Reconstruction Methods for Maritime Observation Data. In: IFAC-PapersOnLine Bd. 54 (2021), Nr. 16, S. 97–104

Zensierte Daten treten vermehrt beim ROT Wert von AIS Nachrichten auf. Häufig übermitteln Schiffe lediglich, ob eine Kursänderung vorliegt und wie stark, aber ohne den konkreten Wert zu übermitteln. Vor allem reisebezogene und statische AIS Nachrichten lassen sich vermehrt unvollständige Daten vorfinden [FeJa12]. Das Feld „Destination“ weist beispielsweise häufige veraltete Daten oder auch „Finger Flubs“ [Losh01, S.342] auf, da bei diesem Feld weiterhin händische Eingaben erforderlich sind. Eine Untersuchung im Rahmen dieser Forschungsarbeit hat ergeben, dass 52.2% aller Zielinformationen in AIS fehlerhaft sind und nur 1.3% den UN/LOCODE Vorgaben entsprechen [SLFH19]. In der daraus entstandenen Veröffentlichung⁶ ist ein Prozess zur automatisierten Verbesserung und Detektion von Fehlern in der Zielinformation entstanden. Mithilfe einer Datenbank mit allen existierenden Häfen weltweit und dem Einsatz von Algorithmen zum Vergleich zweier Wörter, wie etwa der Damerau-Levenshtein Distanz und der Jaro-Winkler Distanz, konnte eine deutliche Verbesserung der Zielangabe erreicht werden.

Reisebezogene Informationen wie Schiffstyp und -größe können aus sekundären Quellen wie dem Lloyd-Schiffsregister entnommen werden. Diese Quellen können helfen, fehlende Informationen in statischen AIS-Nachrichten zu ergänzen.

Bei der Ausreißerererkennung⁷ unterscheidet man zwischen Punkt-, Kollektiv- und Kontextausreißern. Diese Art der Fehler lassen sich vornehmlich in Zeitreihen aufdecken, da sie nur im direkten Zusammenhang und Vergleich mit vergangenen und zukünftigen Daten identifiziert werden können. Im AIS ist es möglich, dass aufgrund des Verlusts des GPS-Signals eine einzelne Position nicht in die Positionsreihenfolge passt. Diese Punktausreißer können mit dichte-basierten Clustering-Verfahren [EK SX96] oder der Ermittlung des Konfidenzintervalls erkannt werden. Das Konfidenzintervall des Kurses und Headings muss jedoch aufgrund der bestehenden Zirkularität anders bestimmt werden als das Konfidenzintervall der Geschwindigkeit. Um den arithmetischen Mittelwert zu bestimmen, müssen Sinus und Cosinus der Werte berechnet, aufsummiert und durch die Menge der Werte dividiert werden [MaJu00].

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sin a_j, \quad \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos a_j$$

⁶ Veröffentlicht unter: Steidel, Matthias; Lamm, Arne; Feuerstack, Sebastian; Hahn, Axel: Correcting the Destination Information in Automatic Identification System Messages. In: Abramowicz, W. ; Corchuelo, R. (Hrsg.): Business Information Systems Workshops. Bd. 373. Cham : Springer International Publishing, 2019 — ISBN 978-3-030-36690-2, S. 496–507

⁷ Umgesetzt in: Meyer, Torben: Konzeption und Implementierung einer Methodik zur Detektion fehlerhafter AIS-Werte in maritimen Beobachtungsdatensätzen, Bachelorarbeit (2017)

Der Durchschnitt ergibt einen Arkustangens des Quotienten aus \bar{S} und \bar{C} :

$$\bar{\theta} = \arctan\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right)$$

Diese Berechnung basiert auf der Tatsache, dass sowohl die Sinus als auch die Cosinus-Funktion eine Periode von 360° haben. Angenommen sei, dass die a_j und b_j nahe 0° bzw. 360° liegen. In diesem Fall sind die Sinuswerte nahe 0 und die Cosinuswerte nahe 1, was einen Arkustangens-Wert nahe 0 ergibt. Basierend vom Vorzeichen muss die Arcus Tangente $\bar{\theta}$ angepasst werden:

$$\theta := \begin{cases} \bar{\theta} + 180^\circ, & \bar{C} < 0 \\ \bar{\theta} + 360^\circ, & \bar{S} < 0 \cap \bar{C} > 0 \\ \bar{\theta} & , else \end{cases}$$

Basierend auf den oben genannten Annahmen und den Vorgaben des NMEA Standards für die AIS Felder wird mithilfe der Anlage 3 ein Fehlercode aufgebaut, der die AIS-Informationen der Nachricht nummeriert und eine Einteilung in die Unterklassen dynamische, statische und reisebezogenen Informationen und anschließend die drei Kategorien für Fehler zur Beurteilung der Datenqualität vornimmt.

4.4. Analyse von Verkehrssituationen

Im Folgenden soll nun das Konzept zur Analyse der Verkehrssituationen und der Detektion von Beinahekollisionen beschrieben werden. Zunächst werden die Einflussfaktoren die für eine korrekte Beurteilung notwendig sind systematisch hergeleitet. Hierbei wird zuerst eine Untersuchung von Kollisionen durchgeführt und die Häufigkeit der wesentlichen Faktoren, an denen eine Kollision fest gemacht werden kann, bestimmt. Die zweite Säule zur Ableitung der Einflussfaktoren ist eine Expertenbefragung, um die real berücksichtigenden Faktoren zu identifizieren. Abschließend wird basierend auf Schulungsunterlagen geprüft welche Einflussfaktoren es gemäß Theorie zu berücksichtigen gilt. Um anschließend das Vorgehen herzuleiten, werden die wesentlichen Begriffe Risiko, Kritikalität, Unsicherheit und Seltenheit erläutert und gegenübergestellt. Anschließend wird die Quantifizierung der Einflussfaktoren zur Berücksichtigung des Kollisionspotenzials basierend auf der Distanz vorgestellt. Danach wird ein Ansatz zur Bestimmung von Unsicherheiten basierend auf Manövererkennungen vorgeschlagen. Das Konzeptkapitel schließt mit einem Ansatz zur Beurteilung und Eingruppierung von Begegnungsarten. Anschließend wird das Konzeptkapitel auf die Anforderungserfüllung hin geprüft.

4.4.1. Herleitung der Einflussfaktoren

Die IALA hat im Rahmen des IALA Waterway Risk Assessment Programs ein detailliertes Netzwerk über die Kausalfaktoren die zu einer Kollision führen modelliert [FrRE08, S.37]. Daraus geht zusammenfassend hervor das in erster Instanz das Wetter einen ausschlaggebenden Einfluss auf das Kollisionspotenzial hat. Hier spielen vor allem Sichtweite aber auch Tageslicht eine Rolle. Anhand dieser Faktoren leiten die Navigierenden ihre Geschwindigkeit ab, beziehungsweise passen diese entsprechend an. Bei schlechter Sicht wird verstärkt auf das Radar als Informationsquelle zurückgegriffen, um die Distanz und den Zeitpunkt bis zur dichtesten Annäherung zu ermitteln. Basierend auf diesen Parametern und unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens wird die Zeit bis zum Ausführen nötiger Manöver bestimmt. Die letzten Faktoren sind vor allem dem Betrieb auf der Schiffsbrücke zuzuordnen in Abstimmung mit den technischen Hilfsmitteln (Radar) und den Verantwortlichen Instanzen finden in Kombinationen mit Alarmen und Stress, Handlungen statt, die entweder das Kollisionspotenzial entschärfen oder zu einer Kollision führen.

Um die Ergebnisse aus dem Waterway Risk Assessment Program zu prüfen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Untersuchung⁸ von Schiffsunfallberichten aus den Jahren 2007 bis 2017 durchgeführt. In diesem Zeitraum wurden 48 Unfallberichte über Kollisionen identifiziert und ausgewertet. Die Untersuchung hat bestätigt, dass insbesondere schlechtes Wetter die Bedingungen zur Lageeinschätzung erschwert und dadurch die Navigierenden in ein verspätetes Handeln kommen, wodurch es zu einer fehlerhaften Durchführung der COLREGs kommt, was abschließend die Kollision unausweichlich werden lässt. Häufig werden Kommunikationsprobleme bei Fehlverhalten angegeben. Aber auch die von der IALA identifizierten Kriterien wie unangemessene Geschwindigkeit in Kombination mit unpassenden Manöveraktionen führen häufig zu Schiff-zu-Schiff Kollisionen und wurden bei der Auswertung der Schiffsunfallberichte ebenfalls aufgedeckt. Konkret bemessen ließen sich die Unfälle durch eine zu geringe Distanz während der Durchführung der Ausweichmanöver. Dies bedeutet konkret das die Distanz zur Durchführung des Manövers des letzten Augenblicks bereits unterschritten war, als die verantwortlichen Akteure reagierten, beziehungsweise der Handlungsspielraum durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen oder eine Verengung des Fahrraumes so weit eingeschränkt war, sodass ein Manöver zur Vermeidung der Kollision nicht mehr vollumfänglich durchgeführt werden konnte. Demnach ist das Manöver des letzten Augenblicks eindeutig als letztes Glied der Ereigniskette zu verstehen, welche zu einer Kollision führt. Alle vorherigen Fehlverhalten resultieren in eine zu geringe Distanz und

⁸ Umgesetzt in: Etong, Chimene Julia; Müller, Rabea: Klassifikation und Analyse von Schiffsunfallberichten, Bachelorarbeit (2018)

müssen durch aktives Handeln vermieden werden. Aus diesem Grund wird sich im folgenden Konzept verstärkt auf die Detektion des Manövers des letzten Augenblicks konzentriert.

Zur Validierung der Erkenntnisse aus der Unfallberichtsanalyse wurden zusätzlich 15 Experten mit einschlägigen praktischen Erfahrungen auf See und insbesondere beim Verhalten während Begegnungssituationen in einem semi-strukturiertem Experteninterview nach den wesentlichen Faktoren, die für Sie eine Rolle bei der Einschätzung einer Situation spielen, befragt (vgl. Abbildung 38).

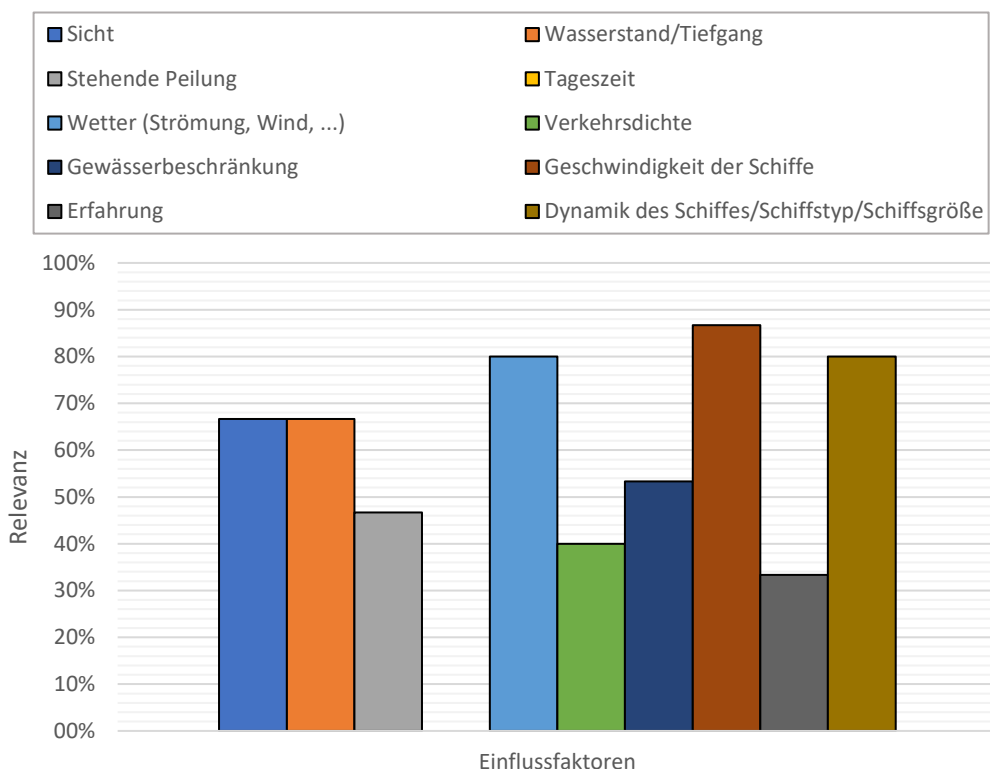


Abbildung 38: Verteilung der Signifikanz relevanter Einflussfaktoren bei der Bewertung des Kollisionspotenzials von Begegnungssituationen

Hier gaben zwei Drittel an, dass der Sichtbereich (z.B. Nebel) bei der persönlichen Beurteilung eine Rolle spielt. Das Interessante an diesem Faktor war, dass die jüngeren Nautiker die Sichtbarkeit nicht mehr als notwendig empfanden. Die ständig verbesserten Technologien auf der Schiffsbrücke, wie ECDIS und andere Assistenzsysteme, werden für die Beurteilung der Situation immer wichtiger. Die Faktoren Wetter, Geschwindigkeit der Schiffe, sowie die Dimensionen beider Schiffe (Manövrierfähigkeit) in Konfliktsituationen wurden von den Experten mit über 80% genannt. Auch die Verkehrsdichte wurde von 40% der Teilnehmer als zu berücksichtigender Faktor bestätigt. Die Hälfte der Nautiker gab an, dass der Gewässertyp (offenes oder beschränktes Fahrwasser) einen Einfluss auf die Beurteilung

der Situation hat. Es muss hinzugefügt werden, dass es sich bei den Experten hauptsächlich um Lotsen in beschränkten Gewässern handelte. Nur 3 der 15 Lotsen verfügten über umfangreiche Erfahrungen auf hoher See als Schiffsführer. Auch die Wassertiefe spielte für 66,6% der Teilnehmer eine wichtige Rolle. Wenn für die meisten Lotsen der Abstand zum anderen Schiff entscheidend ist, gaben fast die Hälfte der Experten an, dass eine Situation erst dann interessant wird, wenn eine stehende Peilung ermittelt wurde. Als letzten Einflussfaktor gab ein Drittel der Lotsen an, dass die Erfahrung des Nautikers auf dem Zielschiff einen Einfluss darauf hat, ob sie einen mehr oder weniger großen Abstand zum anderen Schiff halten müssen (z.B. wenn ein anderer Kollege an Bord ist). Abschließend wurden die Experten gefragt, welchen Einfluss das Tageslicht auf die Beurteilung der gegebenen Situation hat. Keiner der Experten gab an, dass dieser Faktor, aufgrund der Beleuchtung der anderen Schiffe und Leuchtfeuer bei Nacht, eine Rolle spielt.

Um sicherzustellen, dass alle Einflussfaktoren identifiziert wurden, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit als dritte Säule neben der Unfallberichtsauswertung und der Expertenbefragung das Handbuch zur Überwachung des Schiffbetriebs analysiert. Die Einschätzung einer Begegnung obliegt in der Schifffahrt den Experten, welche die Überwachung des Schiffbetriebes übernehmen (Officer of the Watch; OOW) und dementsprechend für die Sicherheit an Bord, sowie die Schiffsführung verantwortlich sind. Zur Kontrolle wird eine Lageeinschätzung von Land, durch unabhängige VTS vorgenommen, um gegebenenfalls Kontakt zu den Schiffen aufzunehmen.

Für eine Standardisierung des Vorgehens auf der Schiffsbrücke hat die International Chamber of Shipping (ICS) den Bridge Procedure Guide erstellt. Dieser beinhaltet Checklisten und Leitfäden zum sicheren Handeln auf der Brücke auch während der Reiseplanung und Überwachung. Folgende Faktoren müssen gemäß Handbuch in der Reiseplanung betrachtet werden [Inte98b, S.23]:

1. Berücksichtigung aller **Beschränkungen** auf der Route (wie Tiefgang oder Ladung)
2. Schiffsbetrieb, der möglicherweise einen **ausgewiesenen Seeraum** erfordert, z.B. Tankreinigung oder Lotseneinstieg
3. **Vorschriften**, wie z.B. Schiffsroutenpläne und Schiffsmeldesysteme (z.B. AIS)
4. Die **Meeresumwelt** (Gebiet um das Schiff herum)
5. Die **kartografierten hydrografischen Daten** entlang der Route
6. Berücksichtigung von **Wetter** (-vorhersagen) wie etwa Strömungs-, Gezeiten-, Wind-, Seegangs- und Sichtbedingungen
7. **Gebiete**, in denen es zu einer Landuntergangssituation kommen könnte

8. Die Berücksichtigung von Navigationshilfen, **Küstenmarkierungen**, Lichtern und Radarsichtzielen zur Positionsüberprüfung des Schiffes während der Reise
9. Besondere Beobachtung von Gebieten mit hoher **Verkehrsdichte**
10. die Zuverlässigkeit der **Antriebs- und Steuerungssysteme** an Bord

Die identifizierten Einflussfaktoren lassen sich in die Kategorien Regularien (1-3), Umweltinformationen (4-8), Verkehrsinformation (9) und Eigenschiffsinformationen (10) untergliedern (vgl. Abbildung 39).

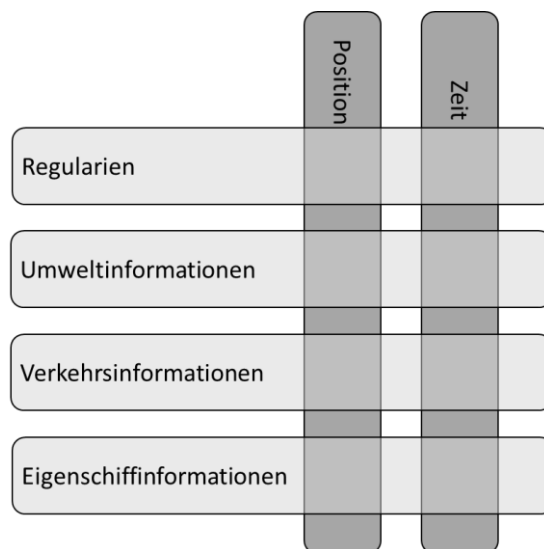


Abbildung 39: Kategorisierung der Einflussfaktoren

Gerade bei den vorherrschenden Regularien existieren örtliche Besonderheiten, da verschiedene Seebereiche spezielle Vorschriften aufweisen. Daher unterliegen auch die Regularien einem Raum-, und einem Zeitbezug. Ereignisse wie etwa Regatten weisen eine temporäre Änderung der Betonung auf, wodurch demnach auch die Aktualität der Karteninformationen, sowie der geänderten Regularien unerlässlich bei der Betrachtung von Situationen, sind.

Die Umweltinformationen können in dynamische und statische Informationen unterteilt werden. Mit dynamischen Umweltinformationen sind die Wetterzustände, sowohl die vorhergesagten als auch die realen Zustände wie Strömungs-, Gezeiten-, Wind-, Seegangs- und Sichtbedingungen gemeint. Statische Umweltinformationen lassen sich anhand der hydrografischen Karten ableiten und schließen Küstenmarkierungen, Lichter, Verkehrstrennungsgebiete und auch Wasserwege mit ein.

Die Verkehrsinformationen beinhalten die Verkehrsdichte und andere Verkehrsteilnehmer im Allgemeinen. Diese Informationen werden in der Schifffahrt über Radargeräte und das AIS erfasst. Hierfür helfen auch die Vorgaben zum sogenannten Watchkeeping

während der Reise. Der Ausguck ist während der Reise ebenso wichtig wie die Überwachung des Schiffes und die COLREG-konforme Bewältigung von Begegnungssituationen zur Kollisionsvermeidung [Inte98b, S.25 f.]. Ein weiteres wichtiges Werkzeug während der Reise ist der Sprechfunk über Kurzwelle, zur Kommunikation zwischen den Schiffen, sowie mit der Landseite. Laut des Leitfadens, soll der Sprechfunk jedoch nicht zum Zwecke der Kollisionsvermeidung genutzt werden [Inte98b, S.28]. Hierfür werden frühzeitige Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung vorgeschlagen. Der OOW sollte jedoch vor und während der Maßnahme prüfen, ob die gewählte Maßnahme den gewünschten Effekt erzielt.

Zur frühzeitigen Erfassung eines Kollisionsrisiko bei klarem Wetter schlägt der ICS Bridge Procedure Guide häufige Feststellung der Peilung mit dem Kompass zu den sich nähernden Schiffen vor. Eine stabile Peilung gilt als ein Indikator für ein potenzielles Kollisionsrisiko. Hierdurch kann von einem Kollisionskurs ausgegangen werden [Inte98b, S.28].

Zu den Eigenschiffinformationen zählt auch der Einsatz von Navigationshilfen und zusätzliche Informationen wie CPA Berechnungen und alarmgebende Assistenzsysteme (vgl. [Fotn16b]). Bei eingeschränkter Sicht soll das Radar zur Beurteilung des Kollisionsrisikos eingesetzt werden [Inte98b, S.28]. Die ARPA, erfassen dabei den Kurs und die Geschwindigkeit des Eigen- und Fremdschiffes und bestimmen Parameter wie DCPA, TCPA und CPA, um das Kollisionsrisiko aufzuzeigen [Inte98b, S.40 f].

Da „[...] eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst [...] In der realen Welt [...] immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).“ ist und „Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt [...] allumfassend sein (objektive Szene, Ground Truth)“ kann, ist vor allem die naturgemäße Nachbildung und Berücksichtigung der auf der Schiffsbrücke vorliegenden Infrastruktur entscheidend [UMRS15, S.2].

Diese Einflussfaktoren lassen sich zusammenfassend als wesentliche Informationen bei der Ermittlung des Kollisionspotenzials in einer bestimmten Begegnungssituation ansehen und müssen demnach auch für die Beurteilung zur Verfügung stehen.

Während der Begegnung schätzen die NautikerInnen das eigene Verhalten und das des Gegenübers ab, um den Handlungsspielraum der Akteure zu ermitteln. Hierbei greifen sie auch auf Wissen über die gegebenen Verkehrsregeln zurück. Wie gut sich also das Verhalten des Gegenübers während einer Begegnung vorhersagen lässt, ist demnach entscheidend für den

Ausgang einer Situation. Dieses Wissen ist jedoch rein subjektiv und hängt sehr individuell von der Fachperson ab.

Im Folgenden werden daher nun die Verfahren zur Quantifizierung der Parameter vorgestellt. Anschließend werden die einzelnen Teile zu einer gemeinsamen Detektion für Beinahekollisionen zusammengeführt.

4.4.2. Bewertung von Begegnungssituationen

Um im Folgenden eine Datenbasis aufzubauen, die für die Bewertungen von Begegnungssituationen im maritimen Verkehr geeignet ist und Beinahekollisionen zuverlässig detektiert, muss zunächst ein einheitliches Verständnis von Kritikalität definiert werden und weiter vom Begriff Risiko abgegrenzt werden.

Der Begriff Risiko (R) ist definiert als das Ergebnis der Häufigkeit (H) mit welchem ein unerwünschtes Ereignis eintreten kann und der Folgen und Konsequenzen (Schadensausmaß S) dieses Ereignisses [Abs03, S.2, Hill12, S.43]. Ist ein Risiko quantitativ erfassbar, so lässt es sich mathematisch als Paar von H und Schadensausmaß (S) darstellen:

$$R = (H, S)$$

Ist das S ebenfalls quantifizierbar und lässt sich von einem mittleren Schaden ausgehen, kann das Produkt $R = H * S$ verwendet werden [Benz04, S.10 f.].

Dem gegenüber steht der Begriff der Kritikalität. Die Kritikalität einer Begegnungssituation beschreibt das kombinierte Risiko der beteiligten Akteure, unter der Bedingung, dass die Verkehrssituation weiter fortgesetzt wird [NWBB21, S.18018]. Um demnach die Kritikalität bestimmen zu können, müssen zum einen Dynamikeigenschaften, das Verhalten, sowie die Handlungsspielräume der Akteure berücksichtigt werden [NWBB21, S.18018]. Zum anderen spielt die Vorhersagbarkeit, über die Absichten der beteiligten Akteure eine Rolle [NWBB21, S.18018].

Die Vorhersagbarkeit der existierenden Akteure geht stets mit einem gewissen Maß an Unsicherheit einher. Der Begriff der Unsicherheit wird in verschiedenen Bereichen unterschiedlich definiert. Im Allgemeinen wird Unsicherheit als das Fehlen von Wissen verstanden [Sull15, S.2]. Demnach spielt die Bestimmung eines Maßes für Unsicherheit vor allem bei der Wahrscheinlichkeitsmodellierung für Auftrittswahrscheinlichkeiten eine wesentliche Rolle. In der Verhaltensmodellierung kann ein gewisser Anteil der Unsicherheit mit der Abweichung vom Normalverhalten und regelkonformen Verhalten, also dem Auftreten von Anomalien, gleichgesetzt werden. Jedoch ist die Aussage über normales Verhalten aussagekräftiger je mehr sich das Verhalten im Konfidenzbereich der statistischen Verteilung

befindet. Bei selten beziehungsweise extremen Ereignissen ist durch die geringere Auftretswahrscheinlichkeit an den Rändern der Verteilungskurve, die auch die Beinahekollisionen kennzeichnen, ungenauer zu bestimmen. Was auch die Ermittlung eines Maßes zur Einschätzung des Risikos erschwert. Der Bereich der EVT widmet sich genau der Bestimmung und Modellierung von seltenen Ereignissen. Gerade in der Forschung rund um die Bereiche Reliability Engineering und Systemsicherheit spielt die Rare Event Probability Estimation eine große Rolle [MoBa16b, S.1].

Demnach wird folgendes Vorgehen als Beitrag zur automatisierten Detektion von Beinahekollisionen in historischen Verkehrs- und Begegnungssituationen vorgeschlagen. Zunächst erfolgt eine Bestimmung des Risikos für potenzielle Kollisionen. Hierzu werden zunächst Kollisionen und deren Einflüsse bestimmt. Anschließend muss die Vorhersagbarkeit der involvierten Verkehrsteilnehmenden auf einer mikroskopischen Ebene ermittelt werden, um eine Aussage über die Kritikalität und Unsicherheit zu machen. Dies muss abschließend formalisiert werden, um eine Aussage über das Kollisionspotenzial der Situation treffen zu können und somit eine Situation als Beinahekollision klassifizieren zu können.

Um in der maritimen Domäne die Begegnungen für die ein Handeln erforderlich ist zu sondieren, ist der bereits erwähnte CPA die etablierteste Metrik. Diese hat jedoch den wesentlichen Nachteil, dass die Entscheidung über den Schwellenwert, ab wann ein Eingreifen notwendig ist der Schiffsführung obliegt. Diese berücksichtigt unterschiedliche Faktoren, um zu einer Entscheidung zu kommen. Ein Blick in die verwandten Arbeiten zeigt, dass auch andere Maße objektivere Ergebnisse liefern, die für die Bewertung genutzt und eingesetzt werden können (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Bei der Risikobewertung von Begegnungssituationen, die mithilfe von historischen Tracks beschrieben werden können, spielt die Nähe zur potenziellen Kollision über den gesamten Verlauf der Begegnung eine Rolle [JBKW18, S.61]. Nähe in diesem Zusammenhang beschreibt jedoch nicht nur die Distanz zweier Schiffe zueinander, sondern auch die Entwicklung über die Zeit, sowie die Wahrscheinlichkeit, den Unfall zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr vermeiden zu können [JuSW17, S.152]. Um diese Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, muss zum einen die Dynamik, also die Fahrteigenschaften der Verkehrsteilnehmenden berücksichtigt werden [DaGa18, S.41, JBKW18, S.61]. Zum anderen spielt auch die Komplexität der Verkehrssituation, also die Einbeziehung von der Wettersituation, Hindernissen, Küstenverläufen und anderen Verkehrsteilnehmenden, eine Rolle [DaGa18, S.40 f.].

Aus diesem Grund werden nun für die Quantifizierung der Begegnungen Risikolevel definiert, in welche die Begegnung eingeordnet werden kann. Hilgert und Baldauf haben in ihrer Arbeit zur Risikomodellierung von maritimen Begegnungen eine Einteilung in vier

unterschiedliche Handlungsabschnitte gemäß der COLREGs gewählt [HiBa97]. Hilgert und Baldauf analysieren in ihrer Arbeit zunächst die COLREGs und legen für die dort definierten vier Risikostufen Grenzwerte und quantifizierbare Kriterien fest und beschreiben für jedes Risikolevel die Aktionen des kurshaltenden, sowie des ausweichpflichtigen Schiffes in einer Begegnungssituation unter Berücksichtigung der Sichtverhältnisse. Sie kritisieren das Fehlen fester und messbarer Schwellenwerte für diese Zustände und leiten aus historischen Beobachtungsdaten, konkrete Richtwerte ab. Das Ergebnis ihrer Arbeit ist ein Risikomodell zur Bewertung des Risikos einer Begegnung. Dieses Risikomodell soll als Empfehlung für Navigierende, die ARPA verwenden, eingesetzt werden [HiBa97]. Die Einteilung der Risikoklassen basiert auf den CPA Berechnungen und definiert unterschiedliche Distanzen zwischen den Verkehrsteilnehmenden. Weiter wird ein Faktor für unterschiedliche Sichtweiten und die Berücksichtigung von den Begegnungstypen eingeführt. Die grundlegenden Berechnungen und Parameter gehen von dem klassischen CPA aus. Wie jedoch bereits erwähnt basiert der CPA auf einer linearen Extrapolation, was zur Folge hat, dass die Berechnung in beschränkten Gewässern und Fahrrinnen keine zuverlässigen Ergebnisse liefern.⁹ Dieser Ansatz soll als Basis für die Risikolevel für Begegnungen genutzt werden. Folgende Parameter (vgl. Tabelle 3) spielen für die Einteilung der Risikolevel eine Rolle:

Tabelle 3: Wesentliche Parameter zur Beurteilung des Risikos von maritimen Begegnungen nach [HiBa97]

Parameter	Beschreibung
CPA	Entfernung am nächsten Punkt der Annäherung
RNG	tatsächliche Entfernung zwischen zwei sich nähernden Schiffen.
C_A	sicherer Abstand für die Beurteilung der Situation
C_N	nomineller Sicherheitsabstand
C_H	hydrodynamischer Sicherheitsabstand
CD, CD'	kritische Distanz bei Nebel
R_A	Grenze für "Gefahr der Kollision beginnt erst zu gelten"
R_M	Manövrierbereich
R_C	kritischer Bereich

Aufgrund der Trägheit in der maritimen Domäne konzentriert man sich im Vergleich zum Automobilbereich, welcher stärker von reaktivem anstelle von proaktivem Verhalten geprägt ist, auf Sicherheitsabstände zwischen den Verkehrsteilnehmenden. Die Metriken im Automobilbereich fokussieren demgegenüber eher die Vermeidung von Distanzen $d = 0$,

⁹ Umgesetzt in: Albrecht, Robert: Statistische Evaluierung gängiger nautischer Abstandsmessungsverfahren auf Basis von Beobachtungsdaten, Bachelorarbeit (2017)

also einer Kollision. Demnach haben auch Hilgert und Baldauf in ihrer Arbeit zunächst die Risikolevel über die Ermittlung der Distanz eingeordnet und erst danach die Zeit wie bei den TTX Metriken im Automobilbereich berücksichtigt. Dies gilt aber lediglich, wenn kein CPA verfügbar, ermittelbar oder dieser schlicht unsicher ist. Zusammenfassend lässt sich aus der in der Arbeit als vereinfachte Risikolevel bezeichneten Einteilung ableiten, dass erst der TCPA-Zeitraum zwischen 18 Minuten und 0 Minuten besonders beobachtet werden muss. Andere Arbeiten erheben einen Zeitraum von 20 Minuten, wobei man bei der Untersuchung auch den Zeitraum vor dem Eintritt einer Situation mit erhöhtem Risiko mit in die Analyse einbeziehen möchte [Iper15, S.52]. Aus diesem Grund wird nachfolgend, bei der Wahl eines Zeitraums zur Analyse einer Begegnung, mindestens die Betrachtung der 18 Minuten vor und nach dem Punkt der dichtesten Annäherung empfohlen.

Die Kriterien beziehungsweise die Herleitung der Maße berücksichtigen die Sichtweite, so wie die Einteilung der involvierten Verkehrsteilnehmenden der zu bewertenden Begegnungssituation in kurshaltendes und ausweichpflichtiges Schiff. Die Eingruppierung in Kurshaltend und Ausweichpflichtig über die Begegnungsarten wird in Abschnitt 4.4.4 näher erläutert. Ebenso wie Bestimmung von guten und schlechten Wetterbedingungen, wie Wellengang und Sichtverhältnissen in Abschnitt 4.4.3.

Tabelle 4: Risikolevel mit Kriterien nach [HiBa97]

Nr.	Risiko Level	Kriterium	Beschreibung
0	Sicherer Zustand	$CPA > C_A \ \& \ RNG > R_A$	Der Verkehrsteilnehmer stellt keine Gefahr/Kollisionspotenzial da und muss nicht berücksichtigt werden
1	Beobachtungszustand	$CPA < C_A \ \& \ RNG > R_A$	Es besteht keine direkte Gefahr aber das Risiko steigt. Es können bei Bedarf Manöver durchgeführt werden, um in den sicheren Zustand zu gelangen.
2	Gefahrenzustand	$CPA < C_A \ \& \ R_M \leq RNG \leq R_A$	Es existiert ein Kollisionsrisiko, wenn keine Handlung erfolgt. Regelkonformes Handeln ist notwendig. Das ausweichpflichtige Schiff muss ein Manöver zur

			Kollisionsvermeidung durchführen.
3	Manöverzustand	$CPA < C_A$ & $R_C \leq RNG \leq R_M$	Die Gefahr einer Kollision steigt. Auch das kurshaltepflichtige Schiff muss agieren (Manöver des letzten Augenblicks), um der Kollision noch zu entkommen. Auch Geschwindigkeitsreduktion kommt nun zum Tragen.
4	Unfallzustand	$CPA < C_H$ & $RNG \leq R_C$	Das Auftreten einer Kollision ist wahrscheinlich. Vollständiges Ausweichmanöver ist erforderlich.

Die notwendigen Handlungen für die Risikolevel aus Tabelle 4 unterscheiden sich je nach Sichtverhältnissen. Bei den sicheren Passierabständen wird zwischen einem hydrodynamischen und einem nominellen Passierabstand differenziert. Der hydrodynamische Abstand C_H geht von dem Abstand aus, der basierend auf der Dynamik der beiden Schiffe angibt, wie nah sich die Verkehrsteilnehmenden kommen können, ohne das eine Berührung ihrer Rümpfe aufgrund hydrodynamischer Wechselwirkungen möglich ist [HiBa97, S.535]. Dieser Abstand ist ohne Konstruktionsdetails nicht bestimmbar, weshalb hier auf einen fixen Wert zurückgegriffen wird. Bei dem nominellen Abstand wird ein Abstand basierend auf der Schiffslänge des größeren Verkehrsteilnehmenden bestimmt. Die Berechnung des Sicherheitsabstandes C_N erfolgt in [HiBa97, S.534 ff.], indem ein Faktor f (zwischen 2.5 und 10) abhängig von der Sichtweite und Art der Begegnung, mit der Länge des größten Schiffes (L_{max}) der Begegnung multipliziert wird. Dies ist eine vereinfachte Bestimmung des sicheren Passierabstands. Alternativ empfehlen Hilgert und Baldauf in ihrer Arbeit den C_N aus einer realistischeren Basis heraus abzuleiten und betiteln ihre vorgeschlagene Berechnung als pragmatischen Weg. Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, existieren hierfür unterschiedliche Ship Domains, die zwar komplexer aber dafür auch eine genauere Aussage über den sicheren Passierabstand erlauben. Aus diesem Grund wird basierend auf dem Ansatz von van Iperen (vgl. [Vani12]) basierend auf empirischen Daten C_N durch die Perzentile der gemessenen Abstände festgelegt ($r_1 - r_4$). Jedoch wurde in der Arbeit von van Iperen eine durchgängige Ship Domain basierend auf der Einteilung der Begegnungsarten ermittelt. Dieser Ansatz soll im Rahmen der hier vorliegenden Dissertation adaptiert werden und nur für die vier

Winkeleinteilungen der Begegnungsarten bestimmt und somit kombiniert werden. Daraus entsteht eine Ship Domain die für alle Begegnungsarten gilt und nicht eine Ship Domain pro Begegnungsart (vgl. Abbildung 40). Die gestrichelte Linie visualisiert die unterschiedlichen Perzentile. Für diese Shipdomain wurde der Ansatz von Goodwin verwendet, da dieser zum Ziel hat die subjektive Wahrnehmung der Schiffsführung zu objektivieren. Jedoch wurde die Ship Domain noch um einen Bereich für Head-On Situationen erweitert. Goodwin hat sich bei seiner Einteilung auf die Aufteilung basierend auf den Toplichtern orientiert. Da die KVRs beziehungsweise COLREGs keine exakte Aussage darüber treffen, ab welchem Winkel man von einer Kreuzungs-, Frontal-, sowie Überholsituation sprechen kann, gehen auch die Annahmen in der Literatur auseinander [KYCR21, S.4, VOB021, S.1300, XuZW14, S.6]. Lediglich zum Überholvorgang wird in den KVRs folgendes genannt [Inte77, S.6]:

„[...] wenn es [das Eigenschiff] sich einem anderen aus einer Richtung von mehr als 22,5 Grad achterlicher als querab nähert und daher gegenüber dem zu überholenden Fahrzeug so steht, daß es bei Nacht nur dessen Hecklicht, aber keines der Seitenlichter sehen könnte.[...]“

Demnach ereignet sich ein Überholvorgang, wenn ein Schiff die Marke von $247,5^\circ$ Backbord-, sowie $112,5^\circ$ Steuerbordseitig (in Vorausrichtung des zu überholenden Schiffes) überschreitet. Der Öffnungswinkel für Head-On Situationen wird in der Literatur die sich mit der Konzeption und Entwicklung von COLREG-konformen Ausweichassistenten beschäftigt, teilweise mit 5° - 10° zur Backbord und 5° - 10° zur Steuerbordseite angegeben, da es den COLREGs am nächsten kommt [KYCR21, S.4, VOB021, S.1300, XuZW14, S.6]. Jedoch haben Untersuchungen in der Simulation mit verschiedenen Öffnungswinkel insbesondere in Head-On Ausrichtung gezeigt, dass ein Peilungswinkel von 15° pro Seite deutlich defensiveres Verhalten bei den simulierten Verkehrsteilnehmenden hervorruft [KWZH14, WYLL18]. Dieser Wert wurde auch in einigen der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Experteninterviews bestätigt.

Der zuletzt definierte Sicherheitsabstand in der Arbeit von Hilgert und Baldauf wird als Passierabstand für die Situationsbeurteilung C_A betitelt. Dieser bezieht den maximalen Fehler von Positionierung und Evaluation C_E bei der CPA Berechnung mit ein und wird demnach auf den C_N addiert [HiBa97, S.535]. Auch für C_E wird zur Vereinfachung bei Entfernungen kleiner als sieben Seemeilen ein fixer Wert von 5% Entfernung angenommen.

Nachdem die Bestimmung der Passierabstände erläutert wurde, kann nun die Einteilung der Distanzen in die Risikolevel erfolgen. Bei der Betrachtung von bereits beendeten Begegnungen kann der Closest Point (CP) bestimmt werden. Hierdurch lässt sich sowohl das

erwartete Risiko als auch das reale Risiko bemessen. Hierfür erfolgt für jeden Zeitpunkt die Einordnung in die oben genannten Risikolevel durch die Bestimmung des prädizierten CPAs als auch die Betrachtung des CPs anstelle des CPAs.

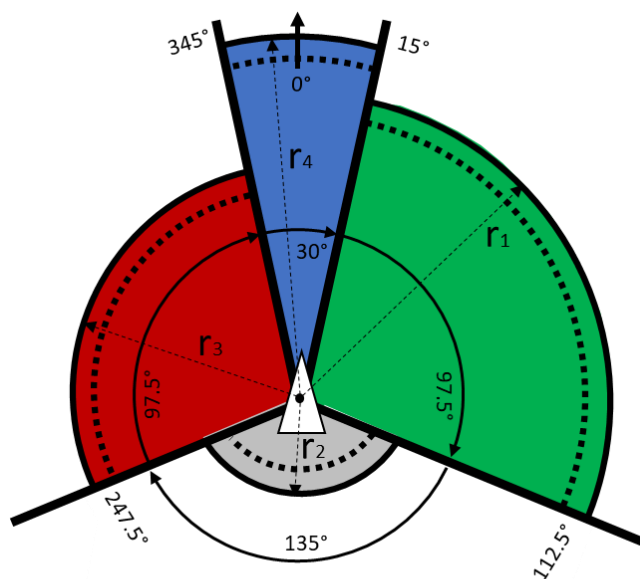


Abbildung 40: Adaptive Shipdomain mit Perzentilen für die vier unterschiedlichen Begegnungssituationen (Crossing (Give-Way und Stand-on), Overtaking, Head-On)

Für die tatsächliche Entfernung der Schiffe und nicht die angenommene extrapolierte Distanz am vermeintlich dichtesten Punkt der Annäherung werden drei Bereiche angenommen. Die Grenze (R_A) ab der die Gefahr der Kollision erst zu gelten beginnt definiert den Moment, ab dem ein anderes Schiff erst in den Betrachtungsraum der navigierenden Person trifft. Hilgert und Baldauf schlagen hierfür die Berechnung von R_A über relative Geschwindigkeit des sich nähernden Schiffes multipliziert mit 18 Minuten vor. Diese Vorgabe hat jedoch den Nachteil, dass wenn R_A als Schwelle zur Berücksichtigung betrachtet wird, bereits Kenntnis über die Zustandsinformationen des Schiffes bestehen muss. Daher wird im Folgenden ein fester Wert von drei Seemeilen für R_A angenommen. Dieser Wert ergibt sich durch folgende Betrachtungen. Zum einen hat eine Untersuchung¹⁰ zur Verlässlichkeit des CPAs, die im Rahmen dieser Dissertation entstanden ist, ergeben, dass die berechnete DCPA und die reale Distanz zwischen Schiffen bei einer Entfernung von 28km noch 8,5km und somit bei 30% liegt. Bei einer Distanz von 16km kommt der CPA mit einer Abweichung von 3,8km erstmals unter 25% und liegt demnach bei ca. 23%. Erst bei einer Distanz von 4 km (ca. 2,5 internationale Seemeilen) nähert sich die durch eine Abweichung von 500m der 10% Marke

¹⁰ Umgesetzt in: Albrecht, Robert: Statistische Evaluierung gängiger nautischer Abstandsmessungsverfahren auf Basis von Beobachtungsdaten, Bachelorarbeit (2017)

mit ca. 12,5% an. Zum anderen greift die Risikoeinteilung von Hilgert und Baldauf erst bei einem CPA < C_A. Diese geht bei einer Kreuzungssituation und schlechter Sicht von der 5-fachen und bei guter Sicht von der 10-fachen Länge des größten Schiffes aus. Die ‚Ever Ace‘ ist laut Lloyd’s Register seit der Fertigstellung am 28.07.2021 mit einer Länge von 399,97 m das größte Containerschiff der Welt.¹¹ Demnach bewegt sich der C_A maximal zwischen einer Entfernung von zwei bis vier Kilometern. Bei einem Puffer von 2,5 Schiffslängen, die als Minimalwert von Hilgert und Baldauf angegeben wurden (vgl. [HiBa97, S.535 Tabelle 2]), beträgt das Ergebnis knapp unter 5km. Umgerechnet und gerundet ergibt sich demnach eine Entfernung von ca. 3 nm. Dieser Wert lässt sich auch in der Literatur als Maß einer Begegnung finden [Iper15, S.52]. Im Rahmen der Expertenbefragung wurde dieser Wert ebenfalls erfragt und bestätigt.

Der Manövrierbereich R_M gibt an, ab wann ein Schiff laut COLREGs ein Manöver einleiten sollte, um einen sicheren Passierabstand zu gewährleisten. Durch den Einsatz von historischen Begegnungsdaten kann dieser Wert ebenfalls statistisch bestimmt werden. Hierzu ist es notwendig, die Schiffsmanöver vor dem CPA zu detektieren und ebenfalls mithilfe der Wahrscheinlichkeitsdichte abzubilden.

Zur Aufdeckung von Manövern ist die Beobachtung der Änderungsrate von Kurs ($C_\chi = \frac{d\chi}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\chi}{\Delta t}$) und Geschwindigkeit ($C_u = \frac{du}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta t}$) entscheidend. Für die Differenzierung von Manövern und Anpassungen wird in dem Bereich der change-point detection das cumulated sum (CUSUM) Verfahren verwendet [BaNO93, S.35 ff.]. Beim CUSUM Verfahren, welches eingesetzt wird um deutliche Änderungen einer sequenziellen Zeitreihe aufzudecken und darüber zu alarmieren, wird eine Alarmfunktion (t_a) eingeführt, die bei einem vordefinierten Schwellenwert (h) auslöst. Da es sich bei den Prozessen, die mittels CUSUM beobachtet werden, vor allem um konstante Zeitreihen handelt, wird zunächst mit einem initialen Durchschnittswert (μ₀) die Entscheidungsfunktion (g_k) auf null normalisiert. Das besondere beim CUSUM Verfahren ist, dass man bei der Nutzung sowohl den ein- als auch den zweiseitigen CUSUM einsetzen kann, was bedeutet, dass beim einseitigen Verfahren lediglich Änderungen in eine Richtung getriggert werden. Dadurch lassen sich bezogen auf die Detektion von Schiffsmanövern Backbord und Steuerbord Manöver separat betrachten. Auf Basis der Standardabweichung (v) können die Beobachtungen (y_n) mit leichten Schwankungen (bspw. Aufgrund von Strömung oder Wind) unberücksichtigt bleiben und nur bewusste, starke Änderungen werden als Manöver erfasst. [BaNO93, Page57]

¹¹ Vgl. <https://classdirect.lr.org/assets/LRV43905/details> (abgerufen am 07.03.2022)

Demnach sind Alarmfunktion und Entscheidungsfunktion (positive und negative Änderungen) wie folgt definiert [BaNO93, S.40 f.]:

$$t_a = \min\{k: (g_k^+ \geq \bar{h}) \cup (g_k^- \geq \bar{h})\}$$

$$g_k^+ = \left(g_{k-1}^+ + y_k - \mu_0 - \frac{v}{2}\right)^+$$

$$g_k^- = \left(g_{k-1}^- - y_k + \mu_0 - \frac{v}{2}\right)^+$$

Hierdurch lassen sich die Manöver von den historischen Tracks ermitteln. Die Manövrierfähigkeit von Schiffen unterscheidet sich aufgrund von Bauweise und Größe teilweise sehr stark. Während große Containerschiffe sehr starr einem Kurs folgen und von kleinen Strömungen eher unbeeindruckt bleiben, ist der umweltbedingte Drift von kleineren Schiffen in Daten deutlicher wahrnehmbar. Auch die Deutlichkeit mit der Schiffsführende Manöver durchführen, ist ebenfalls sehr individuell. Daher müssen Schwellenwert und Standardabweichungen für die Tracks möglichst individuell und nach Clustern angepasst werden.

Um weiter nicht nur ein einzelnes Manöver innerhalb eines Tracks zu identifizieren, sondern auch mehrere, ist ein konstanter Wert für μ_0 wie er in der Literatur vorgeschlagen wird, nicht zielführend. Der initiale Mittelwert lässt sich für diese Anwendung durch den Simple Moving Average (SMA) ersetzen, um sich nach abgeschlossenen Manövern auf den neuen Beobachtungsbereich (Kurs oder Geschwindigkeit) initialisieren zu können.

Der kritische Bereich R_c wird in der Arbeit von Hilgert und Baldauf mit $2 \min * vr$ angegeben. Da es sich bei Beinahekollisionen um seltene Ereignisse handelt [JuSW17, S.155], muss der Schwellenwert über die Auftrittswahrscheinlichkeit von seltenen Situationen definiert werden. Daher wird der R_c im Folgenden mithilfe einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bestimmt.

Demnach lässt sich eine Begegnung als ein seltenes Ereignis beschreiben, wenn eine bestimmte Distanz ($d(X^A, X^B) > 0$), basierend auf der Auftrittswahrscheinlichkeit ($\mathbb{P} < T$) bei gegebenen Einflussfaktoren, unterschreitet. In Kombination mit deutlichen kinematischen Veränderungen der Trajektorie ($f'(t) \neq 0 \cup f'(t) > h$) und einer geringen Vorhersagbarkeit (Anomalie) der gefahrenen Bahn lässt sich eine Situation als Beinahekollision definieren.

Formal erfüllt eine Beinahekollisionssituation die folgenden Bedingungen:

Seien demnach zwei Schiffe (A und B) mit ihren Positionen über die Zeit beschrieben als X_t^1 und X_t^2 . Für diese Schiffe soll nun die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, in der die

Schiffe einen Abstand T während der Dauer ihrer Reise (S) unterschreiten [MoBa16b, S.185 f.].

$$\mathbb{P}(\mathcal{R}) = \mathbb{P}(\{\|X_t^A - X_t^B\| \leq T, \quad \text{wobei } t \leq S\})$$

Hierfür kann die φ -Funktion wie folgt definiert werden,

$$\varphi: \begin{cases} \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ (X^A, X^B) \mapsto \|X^A - X^B\| \end{cases}$$

Um also eine Beinahekollision im Sinne der Extremwerttheorie (seltenes Ereignis) detektieren zu können, wird für jedes $T > 0$ angenommen, dass

$$\mathcal{R} = \left\{ \inf_{0 \leq t \leq S} \varphi(X_t^A, X_t^B) \leq T \right\}$$

Dabei gilt, das $T \neq 0$, da es sich andernfalls um eine Kollision handelt. Ein gängiger Schwellenwert zur Bestimmung einer Wahrscheinlichkeitsstufe α für seltene Ereignisse, ist die Bestimmung des Quantils q_α der gegebenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion Y [MoBa16b, S.33 ff.].

$$q_\alpha = \inf_{v \in \mathbb{R}} \{ \mathbb{P}(Y \leq v) \geq \alpha \}$$

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit historische Realsituationen auf das Vorliegen einer Beinahekollision untersucht werden, kann $\mathbb{P}(\mathcal{R}) \leq q_\alpha$ überprüft werden. Anschließend kann ebenfalls $\min_{t < S} (d(X^A, X^B)_1) \leq q_\alpha$ überprüft werden.

4.4.3. Kontextbetrachtung

Da die Risikobewertung oder genauer die Bestimmung der Schwellenwerte auf der Herleitung von Wahrscheinlichkeitsdichten basiert, um die subjektiven Einschätzungen zu objektivieren, ist es zunächst notwendig Cluster zu bilden, um die generellen Verhaltensweisen und Abstände bei aufgetretenen Begegnungssituationen zu bestimmen. Da hierfür auf statistische Verfahren und Werkzeuge zurückgegriffen wird, ist es entscheidend, eine aussagekräftige Menge an Situationen mit möglichst geringer Streuung zu haben. Aus diesem Grund müssen die abgeleiteten Einflussfaktoren im Folgenden klassifiziert werden. Anschließend werden die Trajektorien der Situationscluster statistisch beschrieben, um daraus Anomalien und Manövermodelle abzuleiten. Dies ist für die abschließende Unsicherheitsbewertung notwendig und wird in Abschnitt 4.4.4 näher erläutert. Um nun also die Komplexität bei der Clusterbildung zu reduzieren, werden die Einflussfaktoren zunächst ebenfalls quantifiziert und die detektierten Situationen abschließend den verschiedenen Metriken zugewiesen. Wie bereits zuvor erwähnt bedarf es bei der Zusammenfassung der Situationen die

Berücksichtigung der Kontextinformationen. Aus diesem Grund wird die Begegnung basierend auf den Wetterzuständen, dem vorherrschenden Verkehrsaufkommen und Seegebiet, sowie der Konstellation der Eigenschaften (Dynamik und Dimension) der involvierten Schiffe bewertet.

Wetterklassen. Um die verschiedenen Begegnungssituationen bezüglich des Wetterzustandes einzuordnen, werden die historischen Wetterdaten, zunächst auf Basis ihrer konkreten Zahlenwerte in Wetterklassen eingeordnet und zusammengefasst. Hierfür wird das Wetter mithilfe der Windeigenschaften (Richtung und Geschwindigkeit), sowie dem Seegang beschrieben. Für die Einteilung werden die etablierten maritimen Skalen zur Bestimmung des Wetters verwendet. Für die Windstärke hat sich die Beaufort-Skala bewährt. Diese teilt die Windstärke in insgesamt zwölf Klassen ein, von denen vor allem die Windstärken ab Stärke 8/9 nur sehr selten auftreten und hier bereits Sturmwarnungen herausgegeben werden [OvBa16, S.153]. Auch für den Seegang, welcher sich in Windstärke (nach Beaufort), Wellenlänge, sowie Wellenhöhe bemessen lässt existiert eine Skala, die sogenannte Petersen-Skala. Die Seegangstärke wird insgesamt in neun Klassen eingeteilt. Hierfür können die Winddaten anschließend mit den Wellendaten kombiniert und anschließend in eine 10-stufige Skala eingeteilt werden. Es muss erwähnt werden, dass die Windstärke und der Wellengang vor allem in geschützten Gewässern (wie beispielsweise der Elbe) nicht immer zwangsläufig miteinander korrelieren. Daher wird von einer pessimistischen Wettereinschätzung ausgegangen bei unterschiedlicher Einteilung der Wetterdaten von Wellen und Wind. Soll heißen, dass bei der Bestimmung des Wetters stets die schlechtere Klasse gewählt wird (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Wetterklasseneinteilung nach Windstärke, Wellenhöhe und Wellenlänge

Wetterklasse	Beaufort-Skala [OvBa16, S.152]	Petersen-Skala [Vmfo19]
Klasse 1:	Windstärke 0 (Windstille): < 1 kn	Seegangstärke 0: Wellenlänge: < 5 m Wellenhöhe: 0 m
Klasse 2:	Windstärke 1 (leiser Zug): 1 – 3 kn	Seegangstärke 1: Wellenlänge: < 15 m Wellenhöhe: 0 – 0,25 m
Klasse 3:	Windstärke 2 (leichte Brise): 4 – 6 kn	Seegangstärke 2: Wellenlänge: < 15 m Wellenhöhe: 0 – 0,25 m
	Windstärke 3 (schwache Brise): 7 – 10 kn	
Klasse 4:	Windstärke 4 (mäßige Brise):	Seegangstärke 3:

	11 – 16 kn	Wellenlänge: < 50 m Wellenhöhe: 0,75 – 2 m
Klasse 5:	Windstärke 5 (frische Brise): 17 – 21 kn	Seegangstärke 4: Wellenlänge: < 75 m Wellenhöhe: 2 – 4 m
Klasse 6:	Windstärke 6 (starker Wind): 22 – 27 kn	Seegangstärke 5: Wellenlänge: < 100 m Wellenhöhe: 3 – 6 m
Klasse 7:	Windstärke 7 (steifer Wind): 28 – 33 kn	Seegangstärke 6: Wellenlänge: < 135 m Wellenhöhe: 5 – 7 m
Klasse 8:	Windstärke 8 (stürmischer Wind): 34 – 40 kn	Seegangstärke 7: Wellenlänge: 150 – 200 m Wellenhöhe: 7 – 10 m
	Windstärke 9 (Sturm): 41 – 47 kn	
Klasse 9:	Windstärke 10 (schwerer Sturm): 48 – 55 kn	Seegangstärke 8: Wellenlänge: < 250 m Wellenhöhe: > 10 m
Klasse 10:	Windstärke 11 (orkanartiger Sturm): 56 – 63 kn	Seegangstärke 9: Wellenlänge: > 250 m Wellenhöhe: > 10 m
	Windstärke 12 (Orkan): > 64 kn	

Da sich das Wetter über die Zeit einer Begegnung ändern kann, wird auch hier das pessimistischste Wetter während der Begegnung angenommen, und vor allem der Fokus auf die Wetterklasse zum Zeitpunkt der minimalen Distanz gelegt.

Verkehrsdichte. Bei der Quantifizierung der Verkehrsdichte (ρ_V) geht es um die Einschätzung des Handlungsspielraumes (P_h) der Manövrieroptionen eines Verkehrsteilnehmers während einer Begegnungssituation. Dabei repräsentiert ein Wert von 0 einen uneingeschränkten Handlungsspielraum. Ein Wert von 1 besagt wiederum, dass keine Möglichkeit eines konfliktfreien Manövers existiert. Hierbei spielt neben der Größe der anderen Schiffe im Umkreis auch die Anzahl (n) sowie die Nähe der anderen Schiffe zum Eigenschiff eine wesentliche Rolle. Da bei allen Zielen im Umkreis von C_A von einer Begegnung gesprochen werden kann, nimmt der Einfluss von anderen Schiffen im Umkreis mit dem Verhältnis der

Dimension (*Länge * Breite*) relativ zur Ausrichtung des Schiffes und zur Entfernung des Schiffes (*d*) ab. Da es lediglich um die Freiräume des Manövrierpotenzials geht, wird auf die Berücksichtigung von sicheren Passierabständen (etwa in Form einer Ship Domain), bei der Bestimmung der Verkehrsdichte verzichtet. Die sicheren Passierabstände finden bereits bei der Begegnungsbewertung Anwendung und müssen demnach nicht erneut betrachtet werden. Zur Bestimmung des Kreisbogens (*b*) wird die folgende Formel angewendet:

$$b = \pi * C_A * \frac{\alpha}{180^\circ}$$

Zur Bestimmung der Bogenlänge (*b*) eines jeden Schiffes *i*, welche durch die Kreisraden *A* und *B* begrenzt wird, kann entweder die Ermittlung basierend der Kreissehne (*s*) oder aber aus dem Mittelpunktswinkel (α) erfolgen. Für die Bestimmung des Kreiswinkels wird um das Objekt/Hindernis basierend auf Länge und Breite eine Bounding Box gezogen und die Peilung zu den äußersten Eckkoordinaten bestimmt (vgl. Abbildung 41). Bei Überlappung der Kreisbögen unterschiedlicher Schiffe wird die Bogenlänge vereinigt. Die Bestimmung der Bogenlänge erfolgt für jedes Schiff. Jedes Schiff hat ein Intervall von Peilung A_i und B_i . Um Überlappungen und Verdeckungen mit zu betrachten, erfolgt die Berücksichtigung wie folgt: Es wird geprüft für alle $i \neq j$ ob $B_i > A_j$. Sollte dies nicht der Fall sein wird eine neue Bogenlänge (b_k) definiert, die durch das Intervall A_i und B_j beschrieben wird. Bei dem Randfall, dass ein Schiff von einem anderen vollständig verdeckt wird und sowohl A_i als auch $B_j < B_i$ sind wird dieses Schiff in die Summierung für ρ_V nicht einbezogen. Die Berechnung erfolgt nach dieser Prüfung wie folgt:

$$\rho_V = \frac{\sum_{k=1}^n b_k}{\pi * C_A}$$

Da laut Regularien die Schiffsführung dazu angehalten ist, möglichst wenige aber dafür deutliche Manöver während der Fahrt durchzuführen, spiegelt die Verkehrsdichte den Zustand wider, ohne Manöver durch das Fahrwasser zu navigieren. Es handelt sich somit um eine Momentaufnahme. Bei den betrachteten Hindernissen, die in die Verkehrsdichtermittlung eingehen, spielen nicht nur andere Verkehrsteilnehmer, sondern auch Küstenverläufe, Betonung oder vor Anker liegende Schiffe eine Rolle.

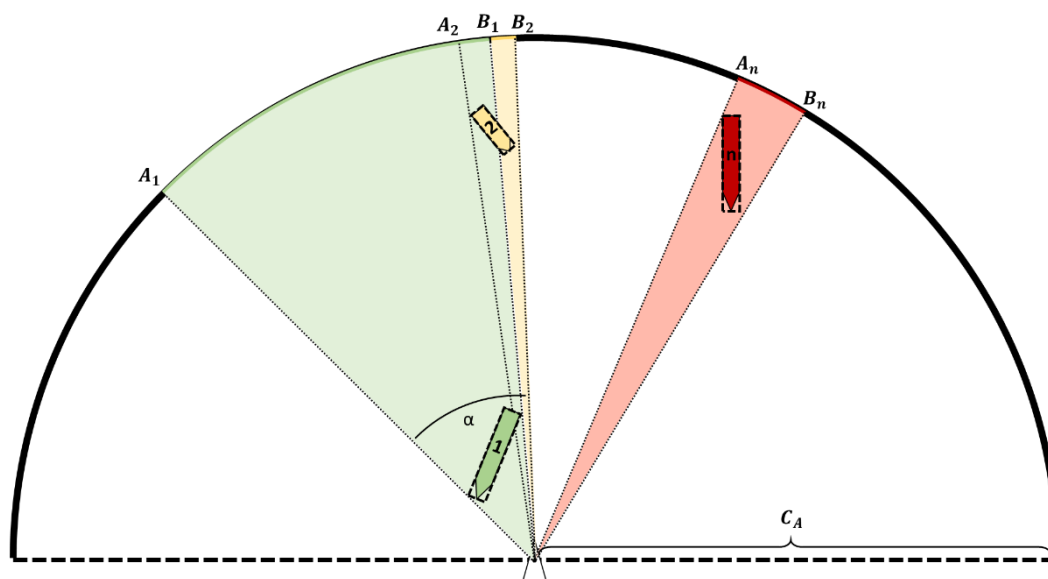


Abbildung 41: Kreisbogen zur Bewertung der Verkehrsdichte

Gewässertyp. Der Gewässertyp ist nicht nur relevant für die Berücksichtigung der Regeln, sondern auch wie der Verkehr geleitet wird. In beschränkten Gewässern orientieren sich die Schiffe an der vorgegebenen Betonung der Fahrwasser, was auch einen Einfluss auf die Distanz der Schiffe zueinander hat (zum Beispiel beim Passieren auf Wasserstraßen). Daher haben Schiffe in beschränkten Gewässern eine wesentlich kleinere Distanz zueinander. Demnach werden die Begegnungen in offenes und beschränktes Gewässer untergliedert. Diese Informationen werden aus den elektronischen Seekarten extrahiert, indem Gebiete mit Betonung durch die Bildung von Polygonen eingegrenzt werden und unterteilt werden können.

Schiffsklassen. Da das Risiko einer Begegnung auch immer von den Charakteristiken (Dimension und Schiffstyp) der beiden sich begegnenden Schiffen abhängt, wird auch diese Eigenschaft bei der Klassifikation berücksichtigt. Die Ausmaße des Gegenschiffes geben dem nautischen Personal auf der Brücke häufig eine notwendige Erkenntnis über die Manövrierfähigkeit. Durch diese Information wählt die Schiffsführung den angemessenen Sicherheitsabstand beim Passieren des Schiffes. Eine eigene Untersuchung der Schiffslängen aus den statischen AIS Daten in Form einer Kerndichtschätzung hat ergeben, dass die Längen in vier Klassen aufgeteilt werden kann:

- Klasse 1: bis 50m
- Klasse 2: 50m bis 170m
- Klasse 3: 170m bis 250m
- Klasse 4: über 250m

Bei den Schiffen der vorgestellten Klassen, lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Schiffe, noch in die Kategorien

- Klasse a: Cargo Ship
- Klasse b: Fishing Vessel
- Klasse c: Passenger Ship
- Klasse d: Service Ship
- Klasse e: Others

unterteilen. Dies sind auch die Klassen die bei der Auswertung von Unfällen der EMSA genutzt werden und spiegeln hier die höchste Übereinstimmung an ähnlichem Manövrierverhalten wieder (vgl. [Emsa16, Emsa17, Emsa19]).

Klassifikation¹². Durch die vielen Einflussfaktoren und Wertebereiche existiert eine Vielzahl an Kombination zur Clusterbildung, die dazu führt, dass die Größe der zugeordneten Begegnungen zu den einzelnen Clustern keine beziehungsweise nur schwer eine statistische Signifikanz aufweisen kann. Aus diesem Grund wird eine Begegnung zunächst als Vektor beschrieben und anschließend wird die Begegnungssituation jeweils den k nächsten Situationen im historischen Datensatz zugeordnet. Hierfür wird eine k NN-Regression angewendet [BuNN15]. Für einen Feature-Vektor $\tilde{x} \in \mathbb{R}^d$ eines gegebenen Datensatzes $D = \{(x_i, y_i) | 1 \leq i \leq n, x_i \in \mathbb{R}^d, y_i \in \mathbb{R}^d\}$, soll ein unbekanntes Nachbarschaftsmenge $\tilde{y} \in \mathbb{R}$ geschätzt werden. Dazu wird für ein vorher bestimmtes k die Nachbarschaftsmenge $N_k^D(\tilde{x})$ betrachtet, sodass:

$$|N_k^D(\tilde{x})| = k \text{ und } \max_{x \in N_k^D(\tilde{x})} d(\tilde{x}, x) \leq \min_{x \in D \setminus N_k^D(\tilde{x})} d(\tilde{x}, x)$$

Dadurch ist $N_k^D(\tilde{x})$ die Menge der k nächsten Nachbarn von \tilde{x} im Datensatz D bezüglich Metrik d . Die Schätzung \hat{y} der Nachbarschaftsmenge \tilde{y} ergibt sich:

$$\hat{y} = \frac{1}{k} \sum_{x_j \in N_k^D(\tilde{x})} y(x_j)$$

wobei $y(x_j)$ das zu x_j zugehörige Nachbarschaftsmenge aus dem Datensatz D ist.

Die Nähe wird bestimmt, indem die einzelnen Features des Vektors näher betrachtet werden, und der Abstand der skalaren Werte gemessen wird. Jedoch kann diese Annahme nicht direkt auf alle Features f_i angewendet werden, da zunächst der Abstand bestimmter

¹² Der hier vorgestellte Klassifikationsansatz wurde bereits in: Lamm, Arne; Möller, Julius; Hahn, Axel: Collision Risk Model for Encounter Situation Assessment Based on Empirical Observations. In: 2020 European Navigation Conference (ENC), 2020, S. 1–11 veröffentlicht und die Umsetzung ist in: Möller, Julius: Empirische Herleitung einer Risikobewertungsfunktion für maritime Begegnungssituationen, Masterarbeit (2019) erfolgt.

Features definiert werden muss. Für Features die nicht Skalar definierbar sind kann eine diskrete Metrik zur Bestimmung der Distanz angenommen werden [CiRe87]:

$$d(x, y) := \begin{cases} 1, & \text{falls } x \neq y \\ 0, & \text{falls } x = y \end{cases}$$

Für die Bestimmung der Abstände der einzelnen Features gilt, dass ein Wert mit 1 den maximalen Unterschied definiert und ein Wert mit 0 eine genaue Übereinstimmung der Features repräsentiert. Dies ist notwendig, um die einzelnen Features gegeneinander zu normalisieren. Demnach sei die Distanz d_B im mehrdimensionalen Vektorraum wie folgt bestimmt:

$$d_b(x, y) = \frac{\sqrt{d_{f_1}^2 + \dots + d_{f_n}^2}}{\sqrt{n}}$$

Abschließend kann aus der Nachbarschaftsmenge die minimalen Distanzen der Begegnungen bestimmt werden und aus diesen eine Verteilung mittels Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über die minimalen Distanzen ermittelt werden.

4.4.4. Bestimmung von Fahrerreaktionen und Unsicherheiten

Nachdem die Begegnungssituationen mit den Einflussfaktoren klassifiziert wurden, um eine qualitative (statistische) Aussage über das Risiko einer spezifischen Begegnung basierend auf der minimalen Distanz treffen zu können, muss für eine genauere Aussage über das Kollisionspotenzial der Begegnung die Vorhersagbarkeit über das Verhalten der beiden in der Begegnung involvierten Schiffe bestimmt werden. Für alle Situationen gelten demnach zunächst die aus dem FOT Kontext bekannten Indikatoren zur Erkennung von „Crash Relevant Events“ (vgl. Kapitel 2). Für die automatisierte Erkennung dieser vier Indikatoren werden im Folgenden die dafür erforderlichen Teilkonzepte vorgestellt. Für die fahrerreaktionsbasierte, sowie die historienbasierte Identifikation ist eine Bestimmung von Normalmodellen basierend auf den Beobachtungsdaten notwendig. Dabei ist für die Erkennung „deutlicher kinematischer Änderungen“ zunächst eine Manöverdetektion, wie sie in Abschnitt 4.4.2 bereits vorgeschlagen wurde, notwendig. Für die Beschreibung des Normalverhalten auf dem Wasser, wird ein Modell benötigt, das die Reaktionsmöglichkeiten der Schiffe beschreibt. Hierzu wird ein Modell ähnlich wie bei einem Straßennetz, welches die Knotenpunkte an denen die Fahrzeuge ihre Richtung ändern können und an denen die verschiedenen Straßen miteinander verbunden sind, aufgebaut. Da auf dem Wasser nicht immer Wasserwege existieren müssen diese Straßennetze zum Teil erst hergeleitet werden. Es empfiehlt sich daher die Manöver als Knotenpunkte zu identifizieren und ein Manövernetz aufzubauen. Dieses Modell kann somit beide Indikatoren unterstützen.

Für die normativen Indikatoren zu der die funktionsreaktionsbasierte Identifikation, sowie die kontextbasierte Identifikation zählt, ist Kenntnis über das regelkonforme Verhalten notwendig. Hierbei können folgende Fragen bzgl. der vorliegenden Begegnungssituation gestellt und beantwortet werden.

1. Verhalten sich eines oder beide Schiffe *untypisch*?
2. Verhalten sich eines oder beide Schiffe *regelkonform*?

Neben der Feststellung des regelkonformen Verhaltens, wird in den NDS oder FOT nach Anomalien in den Beobachtungsdaten geschaut, um aus diesen, Erkenntnisse für eine stetige Verbesserung der Sicherheit im Verkehr zu gewinnen. Im Transportwesen werden diese Anomalien meist mit seltenen Ereignissen gleichgesetzt. Zur Detektion von seltenen Ereignissen muss zunächst die Norm identifiziert werden. Diese Norm lässt sich durch die Bildung von Verhaltensmodellen erfassen. Unter dem Begriff Normalmodell wird zumeist ein mathematisches Modell verstanden, welches statistisch gesehen häufige Muster bis zu einer definierten Abweichung repräsentiert [Outl16]. Um das Verhalten eines Schiffes modellieren zu können, muss zunächst ein Verständnis darüber aufgebaut werden, wie die Planungsaufgaben einer Schiffsführung ablaufen. Die Planung einer Fahrt lässt sich in drei Ebenen modellieren (vgl. Abbildung 42).

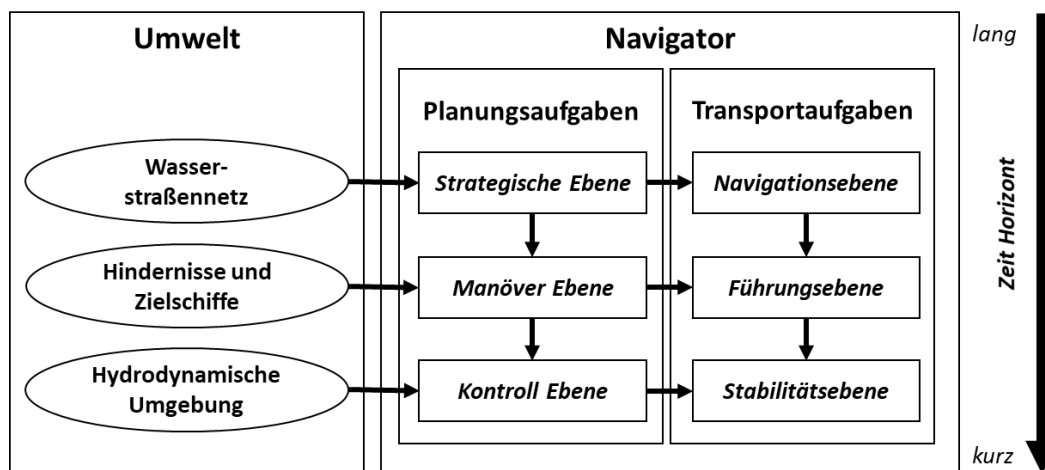


Abbildung 42: Grafische Darstellung der Transport- und Planungsaufgaben eines Nautikers nach [Dong82, Fotn16a]

Auf der strategischen Ebene plant die Schiffsführung die Reise vom Starthafen bis zum Zielhafen. Basierend auf dem Wasserstraßennetz plant diese die Route, die das Schiff nehmen wird, unabhängig von Zeit, Verkehr oder der hydrodynamischen Umgebung. Die zweite Ebene ist die Manövierebene. Die wichtigste Aufgabe dieser Ebene ist das Abfahren der geplanten Route bei gleichzeitiger Vermeidung von Kollisionen und Grundberührungen. Basierend auf der vordefinierten Route muss die Schiffsführung die vordefinierten Wegpunkte

(Peilungsänderung) und die vorliegende Verkehrssituation beachten. Während einer Begegnung muss diese handeln, indem sie ausweicht und der Route nach Konfliktauflösung durch Ändern des Schiffszustands (Kurs, Geschwindigkeit) an Wegpunkten weiter folgt. Die unterste Ebene ist die Steuerungsebene. Um eine bestimmte Peilung und Geschwindigkeit beizubehalten, muss die Schiffsführung aufgrund von Einflüssen wie Wind und Strömung im Laufe der Zeit kleine Anpassungen vornehmen, um das Wegdriften des Schiffes auszugleichen. Oftmals übernehmen Regler diese Aufgabe.

Eine Route wird in der ersten Ebene der Planungsaufgaben der Schiffsführung definiert. Die Routenplanung erfolgt zumeist auf einer sehr groben Granularität. Man kann in diesem Kontext auch von einer Topologie der Route (vgl. Route Topology Model; RTM) sprechen [Oltm15]. Dies bedeutet, dass bei der Routenplanung nicht unbedingt darauf geachtet wird, dass die Routen ausschließlich auf Wasserwegen verlaufen, da hier der Fokus vor allem auf der Festlegung der Wegpunkte liegt. Die Wegpunkte beschreiben die Punkte, an welchen das Eingreifen des Navigators erforderlich ist, um der Route bis zum Ziel weiter zu folgen. Hierfür wird zwischen den Begriff des Wegpunktes, sowie des Manöverpunktes differenziert. Wegpunkte lassen sich mit Manöverpunkten gleichsetzen, wenn es sich um im Vorfeld *geplante* Änderungen handelt. Weiter existieren auch *ungeplante Manöver*, welche zur Vermeidung von Unfällen oder zum Umfahren von Hindernissen notwendig sind. Bei diesen ungeplanten Manöverpunkten handelt es sich um eine bewusste, in der Regel kurzfristige Abweichung von der Route, mit darauffolgender Rückkehr auf die geplante Route (vgl. Abbildung 43). Die abgefahrne Spur mit all diesen Änderungen wird als Trajektorie bezeichnet.

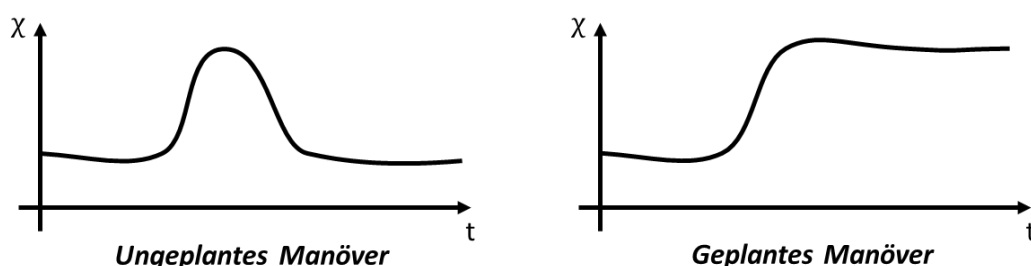


Abbildung 43: Beispielhafter Verlauf des Kurses eines Schiffes über die Zeit bei geplanten und ungeplanten Manövern

Diese Trajektorie lässt sich demnach durch mehrere Koordinaten (P), die durch Longitude (λ) und Latitude (φ) definiert sind, beschreiben. Da es der Schiffsführung lediglich möglich ist auf den Zustand des Schiffes in Form von Geschwindigkeitsänderungen (u), sowie Kursänderungen (χ) Einfluss zu nehmen, beschränkt sich auch die Menge der zu untersuchenden Manöver auf eben diese beiden. Daher wird das Verhaltensmodell auf der Manövrierebene

beschrieben. Minimale Änderungen aufgrund von Strömung oder anderen Umweltbedingungen sollen unberücksichtigt bleiben. Diese Untersuchung erlaubt die Modellierung des Verhaltens von Navigierenden. Es können starke kinematische Veränderungen, wie es auch im FESTA Handbuch Appendix zu den Unfall-Relevanten Ereignissen als Indikator beschrieben, erfasst werden (vgl. Abbildung 44).

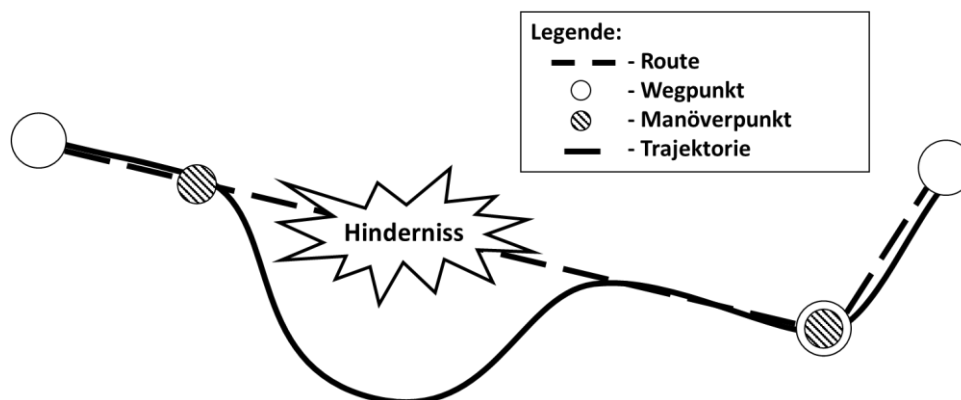


Abbildung 44: Unterteilung der Begrifflichkeiten Route, Wegpunkt, Manöverpunkt und Trajektorie

Zur Detektion der Manöver wird das bereits in Abschnitt 4.4.1 beschriebene CUSUM Verfahren eingesetzt. Mithilfe von CUSUM ist es möglich, den Startpunkt eines Manövers basierend auf Kurs- oder Geschwindigkeitsdaten zu erfassen. Alle anderen Beobachtungspunkte einer Trajektorie sollen unberücksichtigt bleiben. Hierdurch lässt sich die Trajektorie eines Schiffes rein mit den Manöverpunkten beschreiben. Verfahren wie der Douglas-Peucker-Algorithmus der häufig zur Kurvenglättung verwendet wird (vgl. [DoPe73]), indem durch Weglassen von einzelnen Punkten die Trajektorie so weit geglättet wird, dass die natürliche Form erhalten bleibt und nur signifikante Punkte (vergleichbar mit den hier beschriebenen Manöverpunkten) die Kurve repräsentieren, sind für die Generierung des Manövernetzes nicht geeignet. Da das Ziel des Manövernetzes darin besteht, den Beginn eines Manövers zu beschreiben, kann der Manöverpunkt durchaus vor dem Punkt mit der größten Steigung liegen. Verfahren wie der Douglas-Peucker-Algorithmus liefert in diesem Fall jedoch den Punkt mit der größten Steigung, da der Einsatzzweck für beide Verfahren ein anderer ist.

Manövernetzgenerierung. Für die Bildung des Manövernetzes werden zunächst alle Tracks der einzelnen Schiffe individuell betrachtet und durch die Nutzung des gleitenden Mittelwerts für die CUSUM-Berechnung die Manöverpunkte detektiert (vgl. Abbildung 45). Anschließend werden die vor- und nachgelagerten Manöverpunkte als Information an die Manöverpunkte annotiert und mittels dichtebasierter Clusterverfahren wie dem Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) Manövercluster gebildet [EKSX96]. Manöverpunkte, die keinem Cluster zugeordnet werden können, werden als

Rauschen bezeichnet und aus dem Prozess entfernt. Hieraus ergeben sich Manövercluster in Gebieten, in welchen es vermehrt zu Manövern innerhalb der historischen Daten gekommen ist. Unter der Annahme das es sich bei den Gebieten die als Cluster erkannt wurden, um übliche Manöver handelt, lässt sich mithilfe dieser Cluster ein Manövernetz erstellen. Da wie zuvor erwähnt, unterschiedliche Schiffstypen auch unterschiedliche Manövrierverhalten an den Tag legen, können die historischen Tracks zuvor geclustert werden, um eine höhere Aussagekraft und eine bessere Anomaliedetektion mit den Manövernetzen zu erzielen. Auch eine feingranularere Einteilung der Trackklassen beruhend auf den Wetterdaten ist empfehlenswert, um beispielsweise tidenabhängige Verhaltensmuster separat zu betrachten. Bevor ein Manövernetz final als Verhaltensmodell genutzt werden kann, werden die Tracks zunächst noch in die Fahrtrichtungen unterteilt. Dies realisiert sich durch die Ableitung der Betrachtung der aufeinanderfolgenden Manöverpunkte. Gerade für beschränkte Gewässer ist dies entscheidend, da Schiffe laut Regularien angehalten sind möglichst weit außen entlang der Tonnen zu fahren. So lässt sich das Manövernetz sowohl als gerichteter als auch als ungerichteter Graph repräsentieren.

Um von einem Cluster auf einen Punkt zu schließen wird der Median des Clusters bestimmt.

$$P_{medoid} = \underset{P_y \in \{P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mn}\}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n d(P_y, P_{mi})$$

Die Manövercluster weisen in der Regel eine elliptische Form (vgl. Anlage 4) auf, sowie eine Verteilung in Fahrtrichtung, weshalb sich die Bestimmung des Mittelpunktes durch Mittelwertmessung eher nicht eignet. Der Umriss (als Polygon) wird dann als Metainformation am Manöverpunkt gespeichert. Dies ist notwendig um später ungeplante Manöver (Anomalien) die sich außerhalb der Cluster befinden, aufdecken zu können.

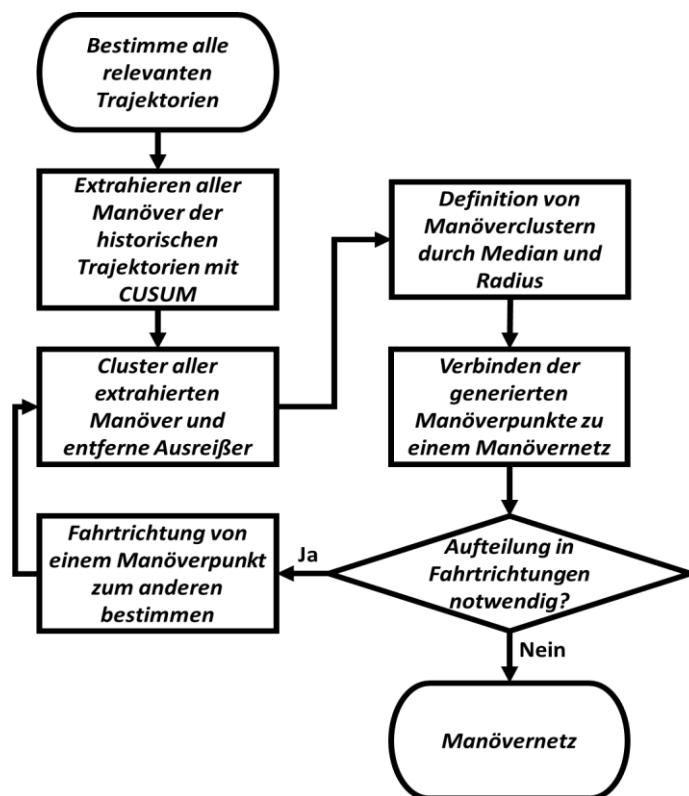


Abbildung 45: Prozess zur Manövernetzgenerierung

4.4.5. Berücksichtigung der Kollisionsverhütungsregeln

Zur Bestimmung der Unsicherheit soll neben der Untersuchung des Manövrierverhaltens und der sich daraus ableitenden anomalen Verhalten auch die Überprüfung des regelkonformen Verhaltens (nach KVR) untersucht und für die Bewertung der Unsicherheit betrachtet werden. Für eine aussagekräftige Einschätzung über Regelkonformität während einer Begegnungssituation, muss zunächst die Art der Begegnung bestimmt werden. Da für die Erkennung von Beinahekollisionen eine ex post Betrachtung erfolgt, kann auch die Einteilung der Begegnungstypen über den gesamten Begegnungszeitraum durchgeführt werden.

Für die Prüfung der Regelkonformität findet eine Einteilung in fünf Begegnungstypen statt. Hierbei handelt es sich um die drei Begegnungstypen die aus den KVRs bekannt sind:

1. Überholsituation
2. Kreuzungssituation
3. Frontalsituationen

Darüber hinaus werden noch die Begegnungstypen:

4. Verfolgungssituation
5. Passiersituation

betrachtet. Diese dienen der Unterscheidung zwischen Überholvorgängen und Verfolgungsvorgängen und zwischen Frontalsituationen und Passiersituationen, da sich das Kollisionspotenzial und die Regeln, die für diese Situationen angewendet werden, unterscheiden.

Eine Verfolgungssituation unterscheidet sich von einem Überholvorgang, durch die Tatsache, dass das überholende Schiff, dass zu überholende Schiffe steuerbordseitig die 90° Marke bzw. backbordseitig die 270° Marke passiert und sich abschließend vor dem Zielschiff befindet. Der Unterschied zwischen einer Frontalsituation und einer Passiersituation besteht in einer anhaltenden, stehenden Peilung innerhalb des definierten Bereichs von 345° bis 15° die für eine Frontalsituation zweier Schiffe spricht.

Für die Kreuzungssituationen gilt dies als sicher und durchgeführt, sobald die 0° Marke vor dem Zielschiff bzw. die 180° Marke achtern des Zielschiffes passiert wurde (vgl. Abbildung 46, rechts). Gerade in Begegnungssituationen ist die Schiffsführung häufig gezwungen auf ihre Erfahrung zu vertrauen, um die Art der Situation einzuschätzen und weniger im Vorfeld den exakten Winkel zum Zielschiff zu bestimmen, um darauf aufbauend Entscheidungen zu treffen. Demnach kann eine Begegnungssituation nur schwer anhand exakter Werte und starren Grenzen ausgemacht werden. Es kann mit diesen Werten nicht klar definiert werden, welche Situation zum Beispiel vorliegt, wenn ein Schiff mit stehender Peilung von $112,5^\circ$ auf ein Gegenschiff zu fährt. Deshalb empfiehlt es sich eine Situation mithilfe von Wahrscheinlichkeiten zu beschreiben. Sei demnach die Wahrscheinlichkeit einer Begegnungssituation mit P_E beschrieben. Zur Ermittlung der Begegnung wird neben der Peilung der Schiffe zueinander auch die Winkel basierend auf der Vorausrichtung der Schiffe zueinander betrachtet. Die Peilung (β) leitet sich somit aus den Kursen und den Positionen des Eigenschiffes (θ_O) und des Zielschiffes (θ_T) ab. Aus diesen Annahmen ergibt sich die in Abbildung 46 (links) dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Bestimmung der Begegnungssituation. Demnach gilt die Annahme das Begegnungen mit Peilungen von 270° und 90° eindeutig einer Kreuzungssituation, Peilungen mit 0° eindeutig Frontalsituationen und 180° eindeutig Überholvorgängen zugeordnet werden können.

Die Grenze zwischen zwei Begegnungsarten (15° , $112,5^\circ$, $247,5^\circ$, 345°) kann so mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% für Begegnungsart A, sowie 50% für Begegnungsart B beschrieben werden. Die Bestimmung des Begegnungstyps erfolgt für jeden Zeitpunkt und wird entsprechend über die Zeit kumuliert. Anschließend wird der Mittelwert gebildet. Begegnungen die nicht eindeutig (Schwellenwert unter 70%) einer Begegnungsart zugewiesen werden können, werden als uneindeutige Begegnung gekennzeichnet. Zur Bestimmung wird nicht der gesamte Zeithorizont bestimmt, sondern die Begegnungssituation bis zum Ausweichmanöver eines der beiden Schiffe als Endzeitpunkt der Begegnungsbestimmung

herangezogen. Entscheidend für die Bewertung ist für diesen Ansatz lediglich die Peilung und der Winkel zwischen den Kursen der Schiffe zueinander. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze, welche für eine Einteilung der Begegnung auch die Peilung zum CPA präzisieren oder auch den Winkel zwischen der Ausrichtung der Schiffe mit dem Beschleunigungsvektor extrapolieren [KWZH14, WBNL19, XuLH09]. Da hier jedoch historische Begegnungen betrachtet werden und keine Entscheidungsunterstützung erfolgt, reicht die Bestimmung der Peilung und der Ausrichtung der Schiffe zueinander als Momentaufnahme, wie sie auch auf der Brücke durchgeführt wird aus.

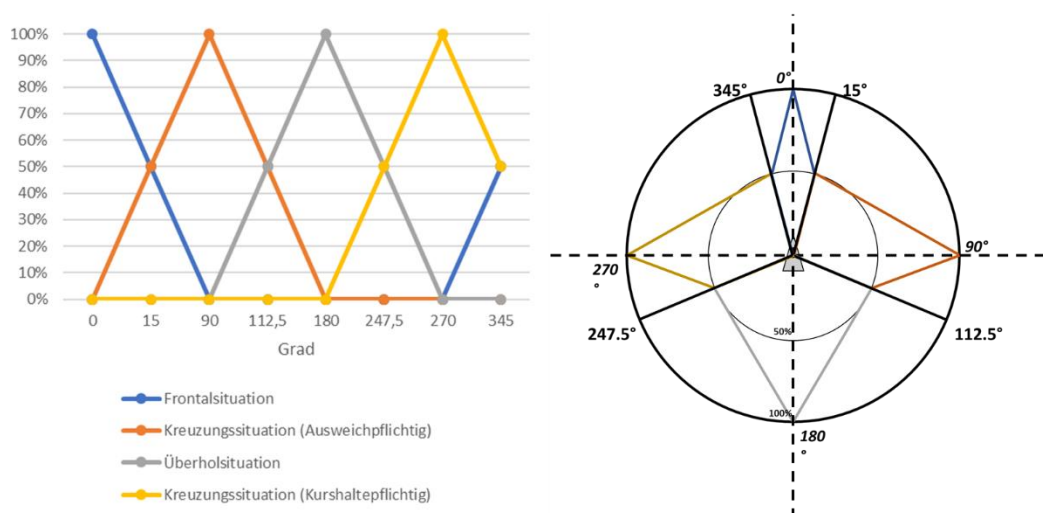


Abbildung 46: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Begegnungssituationen Frontal-, Kreuzungs- und Überholsituationen

Spezielle Begegnungsarten¹³. Um auch für Begegnungen eine empirische Aussage über das Kollisionspotenzial treffen zu können, welche als uneindeutig identifiziert wurden, wird ein Ansatz zur Ähnlichkeitsanalyse vorgeschlagen, um Klassen mit ähnlichen Begegnungen zusammenzufassen. Auch die bereits zugewiesenen Begegnungen lassen sich so nochmal gegen die entstehenden Cluster validieren.

Der Prozess zur Clusterbildung von Begegnungen mittels Ähnlichkeitsanalyse gliedert sich in drei Schritte auf:

1. Vereinfachung der Trajektorien und Normalisierung des Begegnungsverlaufs
2. Überführung der Begegnungsverläufe in eine beschreib- und vergleichbare Form
3. Einteilung der Cluster

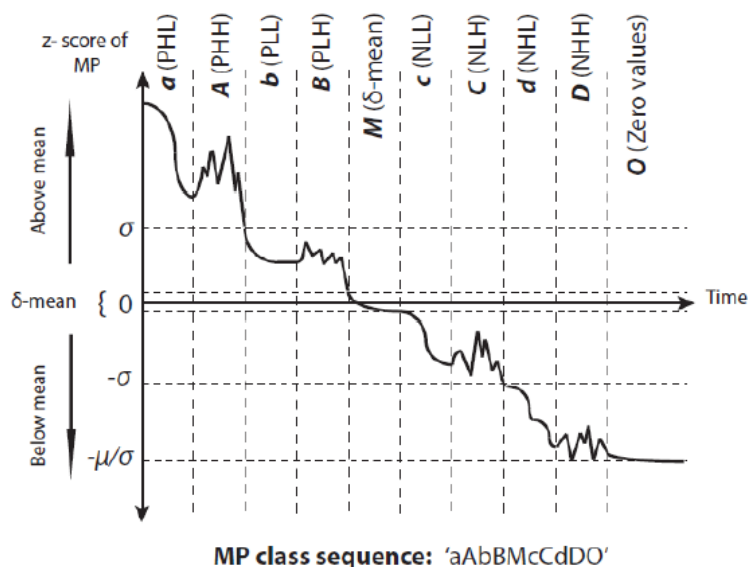
Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse von Trajektorien, Zeitreihen oder Zeichenketten finden überwiegend Anwendung in den Gebieten der Rechtschreibprüfung, Bild-, Duplikat-,

¹³ Umgesetzt in: Mentjes, Jan: Intelligente Zeitreihen- und Ähnlichkeitsanalyse von Schiffsbegegnungssituationen, Masterarbeit (2020)

Sprach- oder Gestenerkennung. Hierbei kommen zumeist Deskriptoren zum Einsatz, die eine bestimmte Information so beschreiben, dass diese im Nachgang verglichen werden kann. Hierfür ist eine messbare Bestimmung des Abstandes zu den anderen Deskriptoren erforderlich.

Auch die Wahl des Distanzmaßes für die Ähnlichkeitsanalyse hat Auswirkungen auf das Ergebnis der Ähnlichkeitsanalyse [MSME15]. Viele existierende Ansätze konzentrieren sich beim Vergleich lediglich auf geometrische Ähnlichkeiten, sodass bestimmte zeitliche Bewegungsmuster unberücksichtigt bleiben. Die Arbeit von Dodge et al. (2012) stellt einen Ansatz vor, der auch die Übereinstimmung der Bewegungen von Objekten untersucht [DoLW12]. Zeitreihen über die Geschwindigkeit werden als Buchstabensequenzen repräsentiert und können so Bewegungsmustern zugeordnet werden. Hierfür werden die Trajektorien als Input genutzt und zunächst über die Beschleunigung oder Lenkbewertung ein sogenanntes Movement Parameter (MP) Profil abgeleitet. Dieses wird anschließend in gleiche oder unterschiedliche große Sequenzen eingeteilt, die die einzelnen Bewegungen beschreiben. Zur Standardisierung der Bewegungsmuster wird anschließend der z-Score bestimmt und die einzelnen Segmente mit Buchstaben zu versehen, die Bewegungsmuster als Zeichenketten zu repräsentieren und anschließend mittels gängiger Verfahren der Linguistik, wie etwa der Levenshtein-Distanz vergleichen zu können [Leve65]. Zuvor definierte Kostenmatrizen (vgl. Anlage 5-6) geben die Gewichtung der Abstände der Buchstaben zueinander zurück. Für die Einteilung und den Vergleich werden neben den z-Score der MP Buchstaben aus der zugrundeliegenden Arbeit (vgl. Abbildung 47) noch die Buchstaben H für High und L für Low erweitert. Bei den Merkmalen der Kursdifferenz und relativen Peilung wird eine eigene H, R, O, L - NWED Kostenmatrix erzeugt. Die Buchstaben stehen entsprechend für Head-On (H), Crossing Right (R), Overtaking (O) und Crossing Left (L).

Zur Bewertung der Ähnlichkeit bei dem Kurswinkel der Vorausrichtung beider Schiffe und der Peilung, kann die NWED-Kostenmatrix aus Anlage 5 verwendet werden. Für Distanzen und Geschwindigkeiten aber auch für Umweltinformationen, wie Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe, Wasserstand ist die NWED-Kostenmatrix aus Anlage 6 entworfen. Für die ROT-Werte die NWED-Winkel-Kostenmatrix aus Anlage 7.



MPC	Deviation	Sinuosity	Assigned letter
PHH	positive high	high	A
PHL	positive high	low	a
PLH	positive low	high	B
PLL	positive low	low	b
M	δ-mean	—	M
NLH	negative low	high	C
NLL	negative low	low	c
NHH	negative high	high	D
NHL	negative high	low	d

Abbildung 47: Ähnlichkeitsmaße zur Mustererstellung nach [DoLW12, S.9]

Verhaltensregeln für Begegnungen. Gemäß der KVRs gibt es für Maschinenfahrzeuge drei wesentliche Regeln, die es bei Begegnungen zu beachten gilt und die ein Manöver zur Folge haben. Diese drei wurden entsprechend für die Regelkonformitätsprüfung berücksichtigt [OvBa16, S.94–95]:

1. Entgegengesetzte Kurse (Frontalsituationen und Passiersituationen): „Maschinenfahrzeuge auf entgegengesetzten oder fast entgegengesetzten Kursen [...], muss jedes Fahrzeug seinen Kurs so nach Steuerbord ändern, dass Sie einander Backbord passieren.“
2. Kreuzende Kurse (Kreuzungssituationen): „Kreuzen sich die Kurse zweier Maschinenfahrzeuge [...] muss dasjenige Ausweichen, welches das andere an Steuerbordseite hat. Es muss [...] vermeiden, den Bug des anderen Fahrzeuges zu kreuzen.“
3. Überholsituation: „[...] Jedes überholende Fahrzeug muss ausweichen.“

Daraus ergeben sich die folgenden Regelverletzung die es in den Begegnungssituationen zu prüfen gilt:

1. Schiffe passieren einander steuerbordseitig.
2. Ein Schiff in Frontalsituation führt ein Backbordmanöver durch.
3. Kurshaltendes Schiff führt ein Manöver durch.
4. Ausweichpflichtiges Schiff kreuzt Bug des kurshaltenden Schiffes.
5. Das zu überholende Schiff führt ein Manöver während des Überholvorgangs durch.

Last-Minute-Manöver. Wie bereits während der Einteilung der Risikolevel und auch in den Erkenntnissen der FOT und NDS Studien festgestellt, stellt das Manöver des letzten Augenblicks einen eindeutigen Indikator zur Erkennung von Beinahekollisionen dar. Dies lässt sich auch dadurch Begründen, dass der Mensch intuitiv das Möglichste unternimmt, um einer Gefahrensituation zu entkommen oder den Schaden zu minimieren. Demnach handelt der Mensch in diesen Momenten aus einem Instinkt heraus und folgt demnach einem reaktiven Verhalten. Das Manöver des letzten Augenblicks kann per Definition von einer oder von beiden Verkehrsteilnehmenden eingeleitet werden. Um Manöver des letzten Augenblicks zu bestimmen, werden mittels CUSUM Kursänderung, sowie Be- oder Entschleunigung während einer Begegnung festgestellt (vgl. Abschnitt 4.4.2).

4.5. Zusammenfassung und Anforderungserfüllung

Das Konzeptkapitel hat sich am datenwissenschaftlichen Prozess entlang den wesentlichen Herausforderungen die zur Erfüllung der Ziele adressiert werden müssen angenommen. Dabei lässt sich die TF1 mit dem Prozessschritt der Datenbeschaffung verlinken. Die TF3 entsprechend mit der Datenhaltung und adressiert demnach die Anforderungen zur Integration in ein Testfeld unter Anwendung dieser, für die Evaluation von Schiffsführungssystemen. Die TF2 die sich als umfangreichste der drei Teilforschungsfragen zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage identifizieren lässt, kann demnach dem letzten Prozessschritt des datenwissenschaftlichen Prozesses, der Datenanalyse, zugeordnet werden. Das Konzept des Datenakquisitionssystem und die damit einhergehende Erweiterbarkeit des Sensornetzes durch die Sensorknoten und dem SWE adressieren die wesentlichen Anforderungen die sich der TF1 zuordnen lassen. Durch die Ermöglichung des Einsatzes beliebiger Sensoren können auch die speziell für die Verkehrsüberwachung benötigten Sensoren in das System integriert werden, was bereits auf Konzeptebene eine Erfüllung der Anforderungen 1, 2 und 6 zur Folge hat. Diese soll durch die Implementierung der Konzeptvorschläge abschließend bestätigt werden. Die Anforderungen 3, 4 und 5 lassen sich durch den Einsatz der SensorML, O&M und S-100 Datenmodellierung ermöglichen und müssen ebenfalls durch die konkrete Implementierung bestätigt werden. Durch den Aufbau eines Data Warehouses sind die Anforderungen 7 und 10 adressiert und bieten auf Konzeptebene bereits die Basis zur Erfüllung der Anforderung. Der vorgestellte Datenverarbeitungs- und

Datenqualitätsbewertungsprozess hat einen direkten Bezug zu den Anforderungen 8, 9 und 25 wodurch bereits alle Anforderungen die zur Erfüllung von TF1 erforderlich sind auf konzeptioneller Ebene adressiert und zum Teil erfüllt wurden. Eine finale Bestätigung der Erfüllung der Anforderung muss sich im Kapitel 5 zeigen. Durch die Nutzung und Berücksichtigung der nachrichtenorientierten Middleware, wie sie bereits in der Architektur für Testfelder vorgeschlagen wurde, kann auch schon ein Bezug zu Anforderung 24 und damit zur Beantwortung der TF3 hergestellt werden. Auch durch die Nutzung von Views gemäß der Reporting Layer ist der Anforderung 24 direkt zugeordnet.

Die Anforderungen die von den verwandten Arbeiten und damit von der TF2 aufgestellt wurden, werden nun den Teilkonzepten der Datenanalyse gegenübergestellt. Durch die systematische Herleitung der relevanten Einflussfaktoren, die sich alle bereits durch die Nutzung von den maritimen Technologien abbilden lassen, können die Anforderungen 11, 14, 16 und 19 bereits als adressiert bestätigt werden. Die KVRs werden in dem Konzept zu den Begegnungssituationen und der Risikobewertung ebenfalls direkt adressiert, weshalb auch die Anforderungen 12, 13, 15, 17 und 20 auf Konzeptebene bereits als berücksichtigt festgehalten werden können. Durch die Manövererkennung mittels CUSUM und dem Konzept des Manövernetzes werden auch die letzten ungenannten Anforderungen 18, 21, 22 und 23 adressiert, wodurch bereits auf der Konzeptebene eine Berücksichtigung aller Anforderungen bestätigt werden kann und für die nachfolgenden Kapitel gewährleistet ist. Die Anforderungen zur TF1 und TF3 sollen nun durch die Umsetzung in der Implementierung abgedeckt werden.

5. DaWINCSi - Data Warehouse for Incidents and Near Collision Situations

Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung der vorgestellten Konzepte und Prozesse zum Aufbau einer Datenbank mit maritimen Verkehrssituationen und Beinahekollisionen. Für die Realisierung dienen Teile des physischen Testfeldes LABSKAUS aus eMIR [BrHa17, Brin17, Brin18]. Das Testfeld eMIR ist in der deutschen Bucht verortet. Es unterteilt sich in verschiedenste Komponenten die für eine Verifikation und Validierung von Schiffsführungssystemen geeignet ist. Hierunter fallen zum Beispiel Testträger oder eine mobile Brücke auf der physischen Testfeldseite. Und einer maritimen, verteilten Verkehrssimulation auf der virtuellen Testfeldseite. Die zur Verkehrserfassung erforderliche Referenzwasserstraße ist in der Nordsee und der Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel lokalisiert. Dabei handelt es sich um ein Gebiet welches mit Sensor- und Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet ist. Im Rahmen der Forschungsarbeit sind zum einen neue Komponenten für das Testfeld insbesondere der Referenzwasserstraße entstanden, zum anderen wurden existierende Bestandteile modifiziert und erweitert, um die Anforderungen an eine Beinahekollisionsdatenbank zu erfüllen.

Im Folgenden werden demnach die Komponenten beschrieben, die für die Realisierung und Evaluation des hier vorgeschlagenen Konzeptes neu aufgebaut oder modifiziert wurden.

Datenbeschaffung. Für die Erhebung der Situationsdaten wurde mehrere Sensorboxen (vgl. Abschnitt 5.1) aufgebaut, um die Bewegungsdaten der einzelnen Schiffe (Mittels AIS und Radar) aufzuzeichnen und punktuell die Wetterinformationen mittels Anemometer zu sammeln. Darüber hinaus wurden AIS-Empfänger in Kooperation mit der Jade Hochschule in Wilhelmshaven installiert und über eine Kooperation mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Zugriff auf die aufgebaute Radarkette entlang der deutschen Küste ermöglicht. Für die Evaluation dieser Arbeit wurde das Radar auf Helgoland benutzt. Sowohl für die Radardaten der WSA als auch für die AIS Empfänger sind im Rahmen der Forschungsarbeit unter anderem Skripte entstanden um eine direkte Integration der Daten in das Testfeld eMIR zu ermöglichen.

Für die Kontextinformationen wurden zum einen Wetterinformationen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bezogen und zum anderen Wetterdaten Daten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) genutzt. Die vom BSH bereitgestellten Daten (vgl. Anlage 8) beschreiben die aufgezeichneten Zustände des Wassers wie Wasserstand, Strömung, Wind (Geschwindigkeit und Richtung auf dem Wasser), Wellenhöhe und die Wassertemperatur. Informationen zu Niederschlag, Luftdruck, Luftfeuchte und Sichtweite wurden

entsprechend durch die DWD-Daten angereichert (vgl. Anlage 9). Die Wetterdaten stehen als GRIB2 im NetCDF-Format zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um ein Datenformat für meteorologische Daten, welches die zugrundeliegenden Daten in einem Raster anordnet und beschreibt. Es kann sowohl 2-, als auch 3-Dimensional sein (beispielsweise Strömungsdaten in unterschiedlichen Wassertiefen). Die Daten wurden zum Teil verarbeitet, sodass neben den Rasterdaten auch Polygone zu den Wetterinformationen direkt in der Datenbank existieren.

Die ENC's stehen über einen Dienst von SevenCs (Chartworld GmbH) als ChartServer zur Verfügung. Der Chartserver erlaubt es sowohl die Bilddaten der Karte mittels Web Map Service (WMS) als auch die deskriptiven Informationen von Objekten wie Positionen, oder Werte über eine Web Feature Service (WFS) Schnittstelle anzufragen. Diese Daten können als GeoJSON weiterverarbeitet werden. Die ENC Daten sind für die Bestimmung von beschränkten Gewässern und offenen Gewässern, Betonung, Wassertiefen und Küstenverläufen notwendig. Das zugrundeliegende Kartenmaterial entspricht dem S-57 Standard. Da es als Webdienst bereitsteht, gewährleistet die Firma SevenCs eine permanente Aktualität des Kartenmaterials.

Sowohl die Wetter-, als auch die Kartendaten werden nicht gänzlich in der Datenbank gespeichert, sondern lediglich die Klasseneinteilungen, wie im Konzept beschrieben. Bei den Wetterdaten wurde für eine performantere Arbeit Teile aus den NetCDF Dateien, wie vorab beschrieben, in der Datenbank vorgehalten.

Datenhaltung. Für die Datenhaltung wurde ein PostgreSQL Datenbankmanagementsystem im Rahmen des eMIR Testfeldes aufgesetzt (vgl. Abschnitt 5.2), sowie ein Subscriber-Client umgesetzt, der die Daten von der nachrichtenorientierten Middleware des Testfeldes ausliest und in die Datenbank schreibt.

Datenanalyse. Die Softwareartefakte für die Vorverarbeitung der Daten und Transformation in das Data Warehouse, sowie die Detektion von Beinahekollisionen wurden mithilfe der Datenanalyseplattform Konstanz Information Miner (KNIME¹⁴) realisiert (vgl. Abschnitt 5.3). Hierfür wurden die Programmiersprachen Java und Python verwendet. KNIME bietet für die Umsetzung bereits diverse Bausteine zur Verarbeitung von relationalen Daten und bietet durch den Status einer freien Software gemäß GNU General Public License (GPL) die Möglichkeit eigene Bausteine zu entwickeln, aber auch die Nutzung von Lösungen aus der Community, wodurch bereits die wesentlichen Algorithmen und Verfahren des maschinellen Lernens und des Data-Mining als Erweiterung hinzugefügt werden kann. Durch den

¹⁴ <https://www.knime.com/> (abgerufen am 22.02.2023)

Charakter eines interaktiven Datenanalysetools eignet es sich ebenfalls für die explorative Entwicklung von Prototypen und zum Experimentieren an verschiedenen Ansätzen. Darüber hinaus existiert eine KNIME Server Lösung die für akademische Zwecke kostenfrei genutzt werden kann. Diese ermöglicht es Workflows die mit dem Client im Kleinen entwickelt wurden auf einem Server laufen zu lassen und größere Datenmengen zu verarbeiten. Auch die Kollaboration an gemeinsamen Projekten und eine Funktion für das Ausführen von Jobs (terminiertes Ausführen von Workflows) wird unterstützt.

5.1. Sensor Data Distribution Node

Um die Datenbank mit Realdaten zu befüllen bedarf es Sensoren, die den Verkehr digital erfassen und verarbeiten. Der Aufbau der im eMIR Testfeld als Navibox bezeichnet wurde, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit weiterentwickelt und der ursprüngliche Einsatzzweck und Funktionsumfang als Schnittstelle zur Testfeldsensorik und -aktorik (vgl. [Brin18, S.102]) etwas verlagert. Diese Verlagerung ging mit einer Umbenennung einher. Die nun unter dem Namen Sensor Data Distribution Node (SaDiNe) bezeichneten Komponenten erfüllen die Aufgabe einer skalierbaren und erweiterbaren Sensorplattform die für die Übertragung und Untersuchung von maritime Verkehrsdaten eingesetzt werden kann. Dieser Sensorknoten ist mit Mobilfunk (LTE/4G) ausgestattet. Für die Verbesserung von Übertragungsgeschwindigkeiten und Latenzen findet eine erste Vorverarbeitung von Sensordaten, die für den Anwendungsfall in ihrer Rohform nicht notwendig sind (wie zum Beispiel Radarvideo), bereits am Knoten statt. Hierfür ist ein Industrie-PC (IPC) verbaut, der mit den notwendigen Treibern, Libraries und Applikationen ausgestattet ist, um ein Processing durchzuführen. Der Sensorknoten ist mit AIS und Radar für die Verkehrsbeobachtung, und einem Anemometer für die Wetterinformationen ausgestattet. AIS Nachrichten und Winddaten werden vom NMEA Bus ausgelesen (mittels CANBOAT¹⁵ Projekt), in das spezifizierte S-100 Datenmodell gewandelt und für die Übertragung komprimiert und serialisiert (vgl. [Brin18]). Das Radarvideo wird zunächst mithilfe einer Trackingsoftware von CambridgePixel¹⁶ ausgewertet und die detektierten Objekte über die von SPxTrackingServer bereitgestellte proprietäre Schnittstelle ausgelesen und ebenfalls in S-100 überführt, komprimiert und serialisiert. Änderungen und Aktualisierungen des S-100 Modells können berücksichtigt werden, indem die mithilfe von Enterprise Architect¹⁷ entworfenen Datenmodelle als XSD Schemadatei exportiert und mithilfe des Eclipse¹⁸ Modelling Frameworks (EMF) in ein Ecore-Metamodell überführt werden. Die entwickelte Software der SaDiNe

¹⁵ <https://github.com/canboat/canboat> (abgerufen am 22.02.2023)

¹⁶ <https://cambridgepixel.com/> (abgerufen am 22.02.2023)

¹⁷ <https://www.sparxsystems.com/> (abgerufen am 22.02.2023)

¹⁸ <https://www.eclipse.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

kann diese Ecore Dateien anschließend interpretieren und die erfassten Objekte entsprechend mappen.

Die Nutzung von zwei unterschiedlichen Sensoren zur Erfassung von Verkehrsteilnehmern, stellt die erforderliche Redundanz und die Validität der erfassten Verkehrsteilnehmer im zu beobachtenden Raum sicher. Zur Vermeidung von Radarschatten wurden drei Radarquellen (Cuxhaven, Brunsbüttel und Helgoland) eingesetzt, um die Referenzwasserstrecke vollständig über AIS und Radar zu beobachten. AIS Empfänger wurden hierfür in Wilhelms- haven, Cuxhaven und Brunsbüttel aufgebaut. Für die Datenübertragung zur Datenbank wird die vom Testfeld bereitgestellte nachrichtenorientierte Opensource Middleware RabbitMQ¹⁹ verwendet. Hierzu läuft eine zentrale Instanz, auf die sich die Boxen nach dem Start automatisch verbinden und mit der Datenübertragung beginnen. RabbitMQ nutzt das Advanced Message Queuing Protocol (AMQP²⁰). Aber auch die Protokolle Streaming Text Oriented Messaging Protocol (STOMP²¹) und Message Queuing Telemetry Transport (MQTT²²) werden unterstützt. Clients für RabbitMQ können mit vielen gängigen Programmiersprachen implementiert werden. Entscheidend für die Aufbereitung der Daten und auch die Auswertung ist es das sowohl auf historische Daten in der Datenbank, als auch auf Datenstreams über RabbitMQ zugegriffen werden kann, um sowohl Änderungen der für die Bewertung des Kollisionspotenzials zugrundeliegenden Normalmodelle feststellen zu können, aber auch um eine Anomalieerkennung von Livedaten für das Verkehrsmanagement zu ermöglichen.

Abbildung 48 zeigt den Aufbau der technischen Elemente die in der Box zur Verkehrserfassung verbaut sind. Für die Datenverteilung werden Datenbusse eingesetzt um die Daten anschließend mittels Wandler in den IPC einzulesen. In der Abbildung ist auch der Einbau einer Kamera dargestellt. Dies wurde prototypisch in Cuxhaven realisiert. Im Rahmen der Arbeit wurden die Kamerabilder jedoch nicht verwendet. Der GPS-Empfänger wird hauptsächlich für die Zeitsynchronisierung der Boxen genutzt. Ein exemplarischer Zusammenbau der Box lässt sich der Anlage 10 entnehmen. Das Erfassungsgebiet der aufgezeichneten und verwendeten Datengrundlage lässt sich der Anlage 11 entnehmen.

¹⁹ <https://www.rabbitmq.com/> (abgerufen am 22.02.2023)

²⁰ <https://www.amqp.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

²¹ <https://stomp.github.io/> (abgerufen am 22.02.2023)

²² <https://mqtt.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

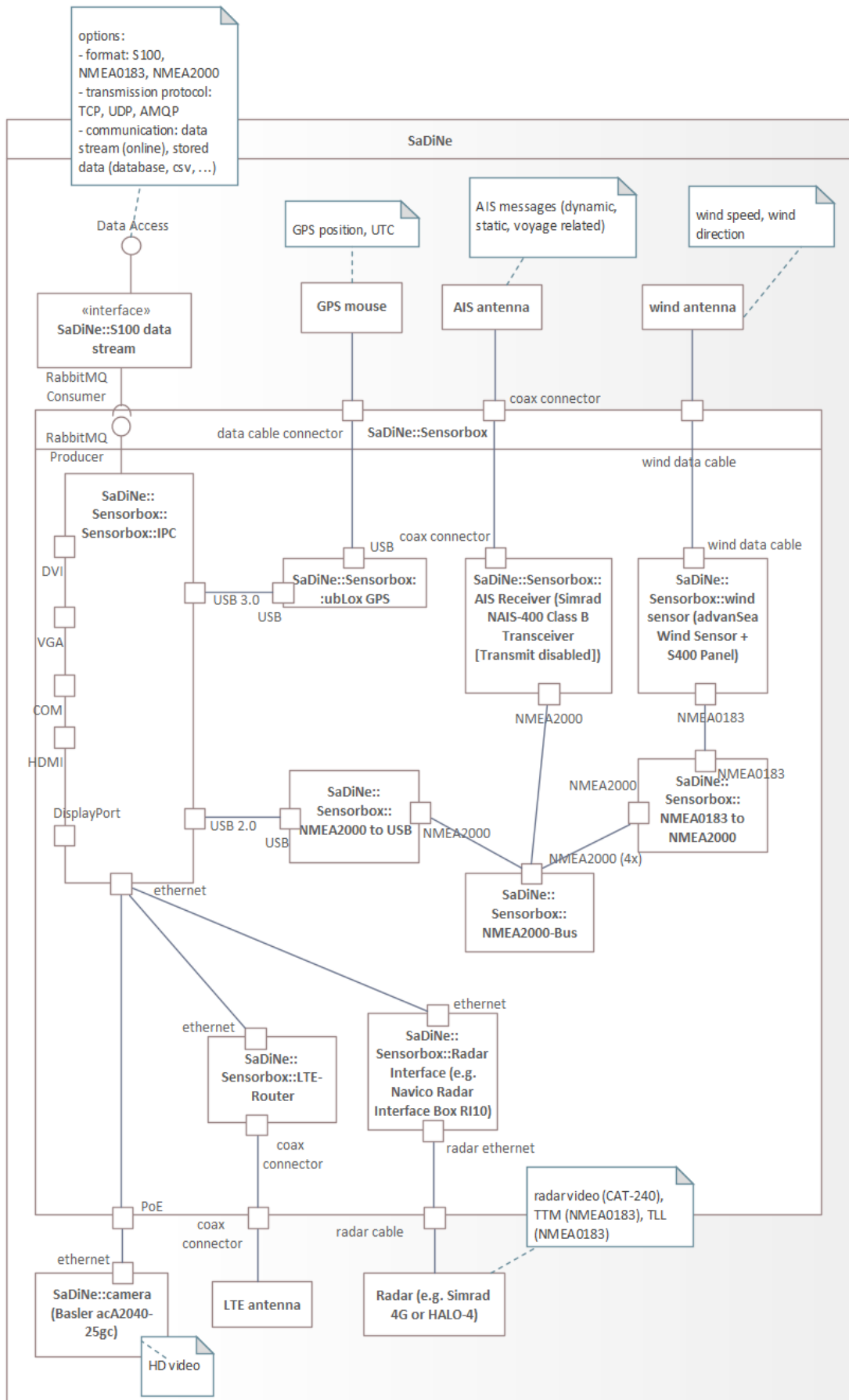


Abbildung 48: Kompositionsstrukturdiagramm der eingesetzten Sensorbox im Feld

5.2. Traffic Data Warehouse

Die Datenhaltung erfolgt, wie im Konzept beschrieben, in einem zweistufigen Prozess. Als DBMS wird PostgreSQL²³ verwendet, da es für den Einsatzzweck die erforderlichen Funktionen wie etwa die Handhabung von komplexen Datentypen unterstützt und mit PostGIS²⁴ auch eine Erweiterung für Geodaten bietet. Darüber hinaus sind Konnektoren für die gängigsten Programmiersprachen verfügbar.

Für die Verarbeitung wurden zwei Datenbanken angelegt, die für die Einsatzzwecke (transaktionsorientiert und analyseorientiert) unterschiedlich konfiguriert und indiziert wurden, um eine schnelle Durchsuchung der Datenbasis zu ermöglichen. Auch die Tabellenstruktur der beiden Datenbanken ist auf die für den vorgesehenen Zweck angelegt. Durch das Anlegen verschiedener Views bietet die relationale Datenbank darüber hinaus die Möglichkeit die Daten auch für andere Einsatzzwecke bereitzustellen, ohne dafür zusätzlichen Speicherplatz zu verbrauchen oder die Datenmenge zu duplizieren. Die transaktionsorientierte Datenbank besteht aus einer Tabelle (vgl. Abbildung 50) mit Indizes auf der Zeit und der ID, die in einem festgelegten Zyklus aufbereitet und in die analyseorientierte Datenbank übertragen wird. Die meisten Spaltenbezeichnungen und -bedeutungen ergeben sich aus der Tatsache, dass der Zweck dieser Tabelle ist AIS und Radardaten zu speichern. Die Spalte „theme“ gibt an, um welche Art von Nachricht es sich handelt. Bei der Spalte „referenceID“ wurde ein Schema (vgl. Abbildung 49) erarbeitet, welches den erfassten Sensor und auch die Sensorbox beschreibt mit welchem eine bestimmte Nachricht aufgezeichnet wurde (Aufschlüsselung entnehme Anlage 19, Anlage 20 und Anlage 21).

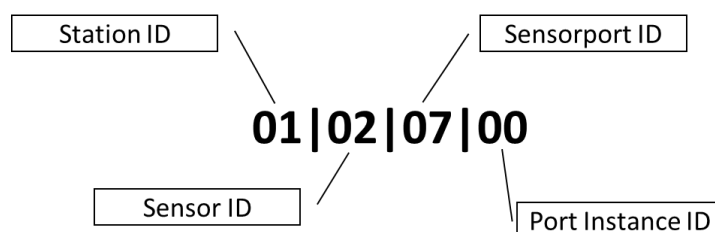


Abbildung 49: Zusammensetzung und Aufbau der „referenceID“

Die Stammdaten bleiben bei diesem Vorgang erhalten, sodass auch die ursprünglichen Daten für Auswertungen und Optimierungen weiterverwendet werden können.

²³ <https://www.postgresql.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

²⁴ <https://postgis.net/> (abgerufen am 22.02.2023)

Tables::track	
«column»	
*PK	id: bigint
	callsign: varchar(50)
	mmsi: bigint
	imo: bigint
	radarid: integer
*	position: geometry(point)
	heading: double precision
	sog: double precision
	cog: double precision
	rot: double precision
	length: double precision
	width: double precision
	draught: double precision
	eta: timestamp with time zone
*	theme: varchar(50)
	shiptype: varchar(50)
*	timestamp: timestamp with time zone
	destination: varchar(50)
*	referenceid: varchar(50)
	navstatus: varchar(50)
	bow: double precision
	stern: double precision
	port: double precision
	starbord: double precision
«PK»	
+	PK_track(bigint)

Abbildung 50: Transaktionsorientierte Tabelle „tracks“ für AIS und Radardaten in der *nbdatabase*

Die analyseorientierte Datenbank entspricht der aufgesplitteten transaktionsorientierten Datenbank, die wiederum um die Felder für die Qualitätsbewertung, Typeinteilung und auch der statistischen Auswertungen erweitert wurde. Im Zentrum stehen die erfassten Plots (Positionen) der verschiedenen Schifftracks. Diese haben einen Index auf der Position und Zeit. Für die Tabellen, die die Werte der verschiedenen Einträge repräsentieren liegen die Indizes für einen schnelleren Zugriff auf den IDs der jeweiligen Attribute. Für den Aufbau der analyseorientierten Datenbank wurde darüber hinaus auf einen weiteren Vorteil der PostgreSQL Datenbank zurückgegriffen, indem auch das Konzept der Vererbung für die einzelnen Plots auf die Sensorarten aufgeteilt wurde. Das hat den Vorteil, dass „SELECT“-Anfragen auf die plot-Tabelle durchgeführt werden können, die es ermöglicht, nur die explizit eingetragenen Zeilen anzuzeigen. Somit wurde eine Tabelle für AIS-Plots und Radar-Plots angelegt, sodass hier entweder spezifisch AIS oder Radardaten mit deren spezifischen Ausprägungen angefragt werden können oder alle existierenden Zeilen. Dadurch erhält man eine Liste mit AIS- und Radardaten. Entscheidend ist hierbei, dass jeweils nur die Spalten (Eigenschaften) zurückgegeben werden, die die Schnittmenge also die in Plots definierten Spalten zurückgeben. Für die Übersichtlichkeit werden in der Abbildung 51 nur die Kerntabellen ohne die Tabellen zur Auflösung der IDs dargestellt. Eine vollständige Übersicht lässt sich dem Anhang entnehmen (vgl. Anlage 22).

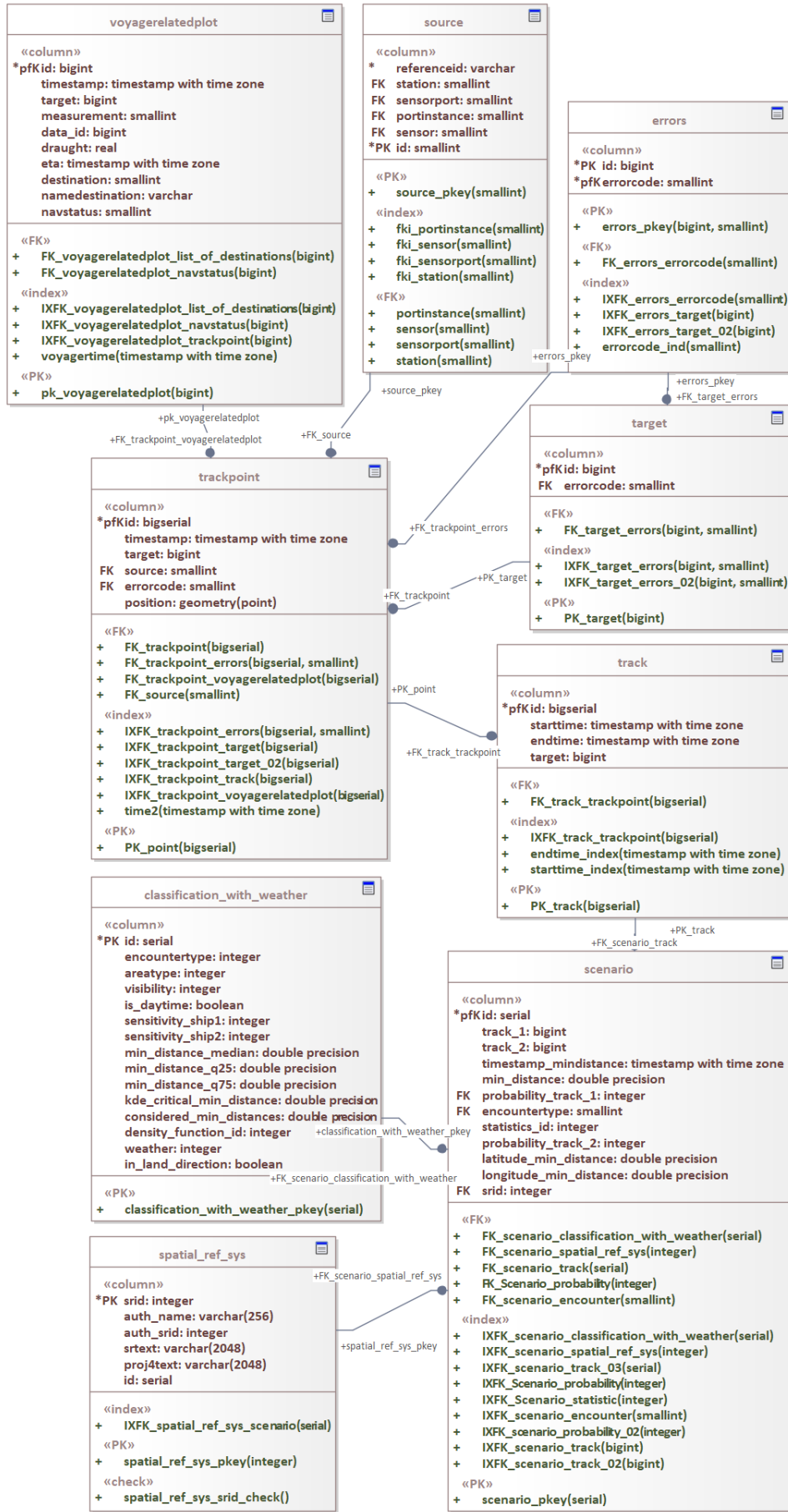


Abbildung 51: Datenbankschema der analyseorientierten Datenbank

Die Aufbereitung der Daten gemäß dem Konzept, mitsamt der Bestimmung der Datenqualität durch Prüfung der einzelnen Nachrichtenbestandteile erfolgt mithilfe eines in KNIME implementierten Workflows, welcher anschließend auf dem Server deployt und als zeitlich terminierter Auftrag in regelmäßigen Abständen ausgeführt wird. Die Assoziation der AIS und Radartracks zur Qualitätsbeurteilung wurde ebenfalls mit einer Software namens SPx FusionServer²⁵ der Firma Cambridge Pixel realisiert. Für die Weiterverarbeitung werden, die in diesem Schritt bereits berechenbaren Informationen gewonnen und an die Verkehrssituationen angehängt. Hierzu zählt die minimalste Distanz der Verkehrsteilnehmer zueinander, sowie die Peilung und der Winkel in dem die Schiffe zueinander stehen (vgl. Abbildung 52). Die Interpretation der Werte erfolgt in der Risikobewertung der Begegnung in Abschnitt 5.3.



Abbildung 52: Prozess der Datenaufbereitung gemäß dem KNIME-Workflow

²⁵ <https://cambridgepixel.com/products/tracking-fusion-distribution/spx-fusion-server/> (abgerufen am 22.02.2023)

5.3. Near Collision Detection

Für die Vorverarbeitung und Aufbereitung der Verkehrsdaten in dem Data Warehouse, sowie der Detektion von potenziellen Kollisionssituationen besteht Bedarf an einer Anwendung die es ermöglicht, den modellierten Prozess beliebig zu erweitern und auch die Ergebnisse und Veränderung der Daten an den einzelnen Prozessschritten zu dokumentieren und nachvollziehen zu können. Darüber hinaus soll der Prozess in definierbaren Intervallen durchgeführt werden, um die Daten in regelmäßigen Abständen aufzubereiten und die Ergebnisse zu persistieren und zu berichten. Für die Implementierung des Analyseprozesses wurde, wie bei der Aufbereitung auch, auf KNIME zurückgegriffen. Mit KNIME lässt sich ein kompletter KDD-Prozess mithilfe von Bausteinen (Nodes) erstellen. Da KNIME als Eclipse Plugin Projekt entwickelt wurde, lässt es sich auch in diverse Programme einbinden und ist betriebssystemunabhängig. KNIME unterstützt wie bereits erwähnt diverse Datenbankanbindungen, sowie die Möglichkeit zur Nutzung verschiedener Skriptsprachen. Mithilfe von Erweiterungen werden nicht nur Java, R²⁶ und Python²⁷, sondern auch Tools wie Matlab²⁸ unterstützt. Durch die programmiersprachenabhängigen Snippets können eigene Methoden direkt in KNIME implementiert werden und Libraries in den Prozess eingebunden werden. Mithilfe des bereitgestellten Software Development Kit (SDK) ist es möglich, auch gänzlich eigene Nodes in Java zu entwickeln und anschließend im Workflow zu verwenden. KNIME unterstützt ebenfalls die Analyse von Big Data mittels gängiger Technologien wie Hadoop²⁹, Hive³⁰, Impala³¹ oder Spark³² sowie die Möglichkeit auch kollaborativ an Projekten zu arbeiten und mithilfe der KNIME Cluster Execution, lässt sich die Rechenlast auch auf mehrere Clients verteilen (KNIME 2016b). Die KNIME Plattform hat auch den gesamten Umfang der WEKA³³ Bibliothek integriert, die durch die Anwendenden genutzt werden kann (KNIME 2016a). Die Visualisierung der Ergebnisse, lässt sich zum einen durch von KNIME selbst entwickelten Charts realisieren und zum anderen ist auch die Nutzung von JFreeChart-Diagrammen oder JavaScript und eine Kartendarstellung durch OpenStreetMaps möglich.

²⁶ <https://www.r-project.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

²⁷ <https://www.python.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

²⁸ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (abgerufen am 22.02.2023)

²⁹ <https://hadoop.apache.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

³⁰ <https://hive.apache.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

³¹ <https://impala.apache.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

³² <https://spark.apache.org/> (abgerufen am 22.02.2023)

³³ <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (abgerufen am 22.02.2023)

Die Bausteine sind für die Wiederverwendung entwickelt und stehen zum Teil als eigene KNIME-Knoten oder als KNIME-Component für die allgemeine Nutzung zur Verfügung (vgl. Anlage 23, Anlage 24 und Anlage 25). Dadurch ist es möglich, auch einzelne Bausteine wie das Encounter Labeling oder die Berechnung einer Shipdomain um ein Schiff herum, unabhängig von Anwendungsfall der Beinahekollisionsdatenbank zu verwenden. Ein ScenarioViewer ermöglicht es, die Begegnungen abzuspielen und nutzt dafür die Interpolation der Trajektorien um eine gleichmäßige und verlustfreie Rekonstruktion der Begegnung zu realisieren (vgl. Anlage 26). Dieser ScenarioViewer wurden auch im Rahmen der ExpertInnenbefragungen eingesetzt. Auch experimentelle Bausteine wie die SpeedGridMap oder der DynamicTimeWarping Knoten stehen zur Verfügung. Diese Bausteine sind im Rahmen von Experimenten während der wissenschaftlichen Arbeit entstanden. Wie der Abbildung 53 entnehmbar wurden die Konzeptartefakte parallelisiert und als Metadaten der Begegnung zugeführt. Dadurch ist es möglich, die Indikatoren (funktionsreaktionsbasiert, fahrerreaktionsbasiert, kontextbasiert, historienbasiert) separat Anzufragen und die Konstellation und Zusammensetzung dieser Indikatoren als Einfluss auf das Kollisionspotenzial von Begegnungen hin zu untersuchen.

5.4. Zusammenfassung und Anforderungserfüllung

Wie bereits in Abschnitt 4.5 angesprochen sollen nun die Erfüllungen der Anforderungen zu TF1 und TF3 gezeigt werden. Die Erfüllung der Anforderungen zu TF2 kann erst durch die Anwendung und Einsatz demonstriert werden und soll in der Evaluation erfolgen. Der datenwissenschaftliche Prozess wurde auch in der Implementierung weiterverfolgt. Dabei lässt sich die TF1 mit dem Prozessschritt der Datenbeschaffung verlinken. Das Konzept des Datenakquisitionssystem wurde durch die SaDiNe umgesetzt und die damit einhergehende Erweiterbarkeit des Sensornetzes durch die Sensorknoten und dem SWE und die Möglichkeit der Integration in das Testfeld eMIR konnte bestätigt werden. Damit können die wesentlichen Anforderungen die sich der TF1 zuordnen lassen als erfüllt betrachtet werden. Durch den Einsatz von AIS, Radar, Anemometer, Wetterdaten vom BSH und der DWD, sowie Nutzung der elektronischen Seekarten wurden die Anforderungen 1, 2, 6 erfüllt. Die Anforderungen 3, 4 und 5 konnten durch das Datenbankschema der analyseorientierten Datenbank und durch die Nutzung von Keys und IDs sowie der referenceID ebenfalls erfüllt werden. Die Reproduzierbarkeit (Anforderung 5) ist durch die Integration in das Testfeld und die damit einhergehende Transformation in S-100, die durch die von Brinkmann (2018) vorgeschlagene Polymorphe Schnittstelle, Daten in die beliebigen Formate überführen kann gegeben [Brin18]. Durch die Umsetzung und den Aufbau des Traffic Scenario Data Warehouses und den damit einhergehenden KNIME Workflows sind die Anforderungen 7, 8, 9, 10 und 24 ebenfalls erfüllt. Die Nutzung und Implementierung des ScenarioViewers konnte

die Erfüllung der Anforderung 25 zeigen. Somit sind alle Anforderungen die die TF1 und TF3 betreffen bereits als Artefakte umgesetzt und können als erfüllt betrachtet werden. Durch die abschließende Evaluation und den Einsatz der Komponenten können die prototypischen Implementierungen als Anforderungserfüllung angenommen werden.

6. Evaluation

Zur Evaluation der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und in Kapitel 4 vorgestellten und in Kapitel 5 umgesetzten Konzeptarbeit, werden die einzelnen Komponenten auf die im Vorfeld definierten und von den vorgestellten verwandten Arbeiten in Abschnitt 3.2 nicht vollständig erfüllten Anforderungen hin überprüft. Durch die Aufgliederung des Gesamtsystems in die einzelnen, im Abschnitt 4.1 vorgestellten, Prozessschritte lassen sich somit die Ziele und dadurch auch die wissenschaftliche Forschungsfrage dieser Arbeit beantworten. Hierfür werden zunächst die Kernartefakte der Arbeit: Begegnungsklassifikation, Risikobewertung, sowie die Manövererkennung und das Manövernetz evaluiert. Anschließend werden die Kernartefakte als Gesamtsystem untersucht und die sich daraus ergebenden, identifizierten Beinahekollisionen mittels ExpertInnenbefragung überprüft.

6.1. Begegnungen klassifizieren mit Wahrscheinlichkeiten und Ähnlichkeitsanalyse³⁴

Für die Quantifizierung von Unsicherheiten und Bewertung des regelkonformen Verhaltens in Begegnungen ist es entscheidend, dass die Begegnungen hinreichend gut in die verschiedenen Begegnungsarten eingeteilt werden. Begegnungen die nicht eindeutig einer Klasse zugeordnet werden können, werden als „undefiniert“ geführt. Zunächst wurden die Begegnungen mithilfe der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Peilung und Winkel der Schiffe zueinander (vgl. Abschnitt 4.4.2) in die verschiedenen Kategorien eingeteilt. Für die Evaluation der Begegnungsarten wurden 10.000 Begegnungen aus dem Traffic Data Warehouse angefragt und untersucht. Der verwendete Datensatz bestand aus 194 Frontalsituationen, 4.462 Passiersituationen, 1.054 Kreuzungssituationen, 1.520 Überholsituationen und 2.770 Folgesituationen gemäß der Wahrscheinlichkeitseinteilung aus Abschnitt 4.4.2.. Da das Erfassungsgebiet der Referenzwasserstraße vor allem in beschränkten Gewässern verortet ist, sind wie aus den Zahlen zu erkennen lediglich ca. 2% der Situationen Frontalsituationen. Dies liegt daran, dass der Verkehr durch die Betonung entlang der Elbe geregelt wird. Die meisten Frontalsituationen treten demnach im Nord-Ostsee-Kanal (NOK) auf. Die vorliegenden Begegnungssituationen werden zur Unterscheidung nun nach den Merkmalen „Kursdifferenz“, „relative Peilung“ und „Distanz“ in Ähnlichkeitsgruppen unterteilt. Auch hier wird nur die Zeit bis zur minimalsten Distanz der Begegnungen miteinander verglichen.

³⁴ Umgesetzt in: Mentjes, Jan: Intelligente Zeitreihen- und Ähnlichkeitsanalyse von Schiffsbegegnungssituationen, Masterarbeit (2020)

Abschließend wird geprüft, welche Begegnungstypen in den einzelnen Gruppen verfügbar sind, um Rückschlüsse daraus zu ziehen, ob bestimmte Begegnungen auch mit diesem Verfahren in derselben Gruppe landen. Haben alle Situationen denselben Typ, wird angenommen, dass sie dieselbe Art der Begegnung repräsentieren. Sind mehrere Begegnungstypen in einer der Gruppen enthalten, so wird der Begegnungstyp als korrekt angenommen, welcher die größte Menge an Begegnungen in einer Gruppe hat. Dabei wird dieser Typ entsprechend als korrekt klassifiziert und die anderen Typen als fehlerhaft gekennzeichnet. Auch bei Einzigartigkeit (Eine Gruppe mit nur einer einzigen Begegnung) wird diese als korrekt behandelt. Die Klassifikationsgenauigkeit wird nun über eine Konfusionsmatrix (vgl. Abbildung 54) visualisiert. Auf der Konfusionsmatrix werden die Begegnungstypen der Wahrscheinlichkeitsberechnungen aufgetragen. Auf der Y-Achse erfolgt die Gegenüberstellung der als korrekt und fehlerhaft gekennzeichneten Begegnungsgruppen aus der Ähnlichkeitsanalyse.

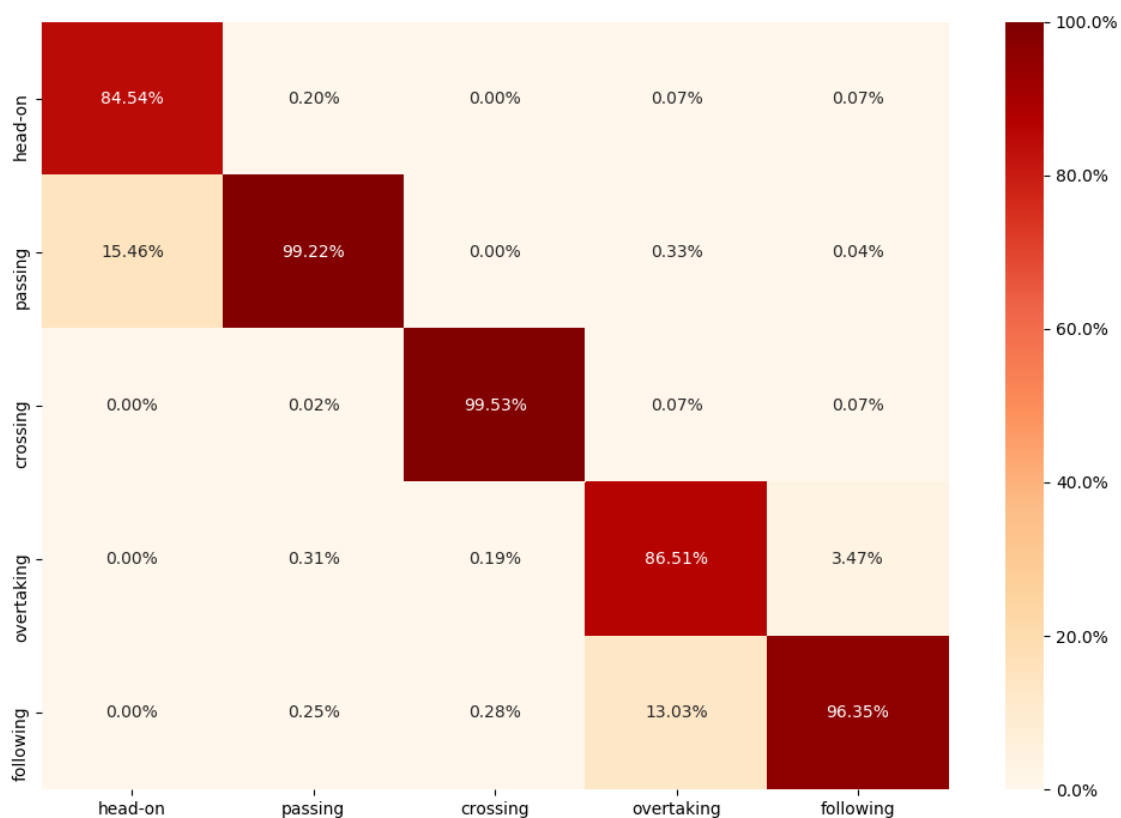


Abbildung 54: Konfusionsmatrix der Klassifikationsverfahren zur Bestimmung von Begegnungen

Die Konfusionsmatrix zeigt, dass sich die Begegnungsarten basierend auf der Betrachtung von Peilung, Kurs und Distanz gut klassifizieren lassen. Jedoch zeigt die Matrix auch, dass Differenzierungen zwischen Frontalsituationen und Passiersituationen, sowie Überholvorgänge und Verfolgungssituationen durchaus sinnvoll sind, da sich diese Situationen in

gewisser Weise, rein durch den Vergleich der Zeitreihen, ähneln, aber das zugrundeliegende Risiko doch ein deutlich Anderes ist. Dennoch gibt es auch in den anderen Klassen einen kleinen Anteil an falsch klassifizierten Situationen. Dies sind vor allem Situationen, welche in der Tat die Begegnungsart augenscheinlich durch starke Kursänderungen verändern oder die Situation ab einem gewissen Zeitpunkt auseinanderläuft. Die als fehlerhaft klassifizierten Situationen werden rückwirkend als undefiniert kategorisiert, um die Sensitivität bei der Überprüfung der Regelkonformität nur auf wirklich eindeutige Begegnungen ausführen zu können. Da es zu den verschiedenen Begegnungsarten mehrere Cluster entstanden sind, empfiehlt sich als Ausblick eine weitere Untersuchung dieser Cluster, um auch andere Begegnungsarten, wie etwa Schlepper oder Pilotoperationen, genauer zu untersuchen und Gemeinsamkeiten festzustellen. Um jedoch den zuvor definierten Anforderungen gerecht zu werden und die Begegnungen gemäß der KVRs zu untersuchen, wurde auf eine weitere Einteilung und Separierung von Begegnungsarten verzichtet.

6.2. Risikobewertung unter Berücksichtigung von Kontextinformationen³⁵

Für die Evaluation der empirisch basierten Risikobewertung wurden zunächst ca. 170.000 Begegnungssituationen ausgewählt, die alle erforderlichen Informationen (vgl. Abschnitt 4.4.3) enthielten und frei von Fehlern (gemäß Anlage 3) waren. Die für die Evaluation verwendeten Situationen wurden im Zeitraum zwischen dem 06.01.2017 und dem 12.01.2018 aufgezeichnet. Für diese Begegnungssituationen wurde abschließend das Kollisionsrisiko bestimmt. Einem Experten der als Lotse arbeitet, wurden händisch ausgewählte Situationen (vgl. Tabelle 6) im Rahmen eines Interviews vorgestellt. Dieser wurde anschließend gebeten, die Situation als eher kritisch (>50%) oder eher unkritisch (<50%) einzustufen.

³⁵ Veröffentlicht unter: Lamm, Arne; Möller, Julius; Hahn, Axel: Collision Risk Model for Encounter Situation Assessment Based on Empirical Observations. In: 2020 European Navigation Conference (ENC), 2020, S. 1–11, Umgesetzt in: Möller, Julius: Empirische Herleitung einer Risikobewertungsfunktion für maritime Begegnungssituationen, Masterarbeit (2019)

Tabelle 6: Übersicht der bei der Expertenbefragung verwendeten Begegnungssituationen

Begegnung Nr. (ID)	Beschreibung	Maximale Risikobewertung	Experteneinschätzung
1 (67757)	Overtaking-Situation im Küstengewässer, im Fahrwasser, minimale Begegnungsdistanz: 717 m, normale Wetterbedingungen.	47%	<50%
2 (196226)	Passing-Situation im Fahrwasser vor Cuxhaven, minimale Begegnungsdistanz: 74 m, starker Wind, eingeschränkte Sichtweite	84%	>50%
3 (78142)	Crossing-Situation im Küstengewässer, hinter Ende des Fahrwassers, minimale Begegnungsdistanz: 485 m, mäßiger Wind, eingeschränkte Sichtweite	20%	<50%
4 (95898)	Passing-Situation im Küstengewässer, minimale Begegnungsdistanz: 809 m, normale Wetterbedingungen	9%	<50%
5 (117075)	Passing-Situation im Fahrwasser vor Bremerhaven, minimale Begegnungsdistanz: 108 m, keine Wetterinformationen verfügbar	57%	>50%
6 (85006)	Passing-Situation im offenen Meer, minimale Begegnungsdistanz: 846 m, mäßiger bis starker Wind, mittlere Sichtweite	17%	<50%
7 (128557)	Overtaking-Situation vor Bremerhaven, minimale Begegnungsdistanz: 50 m, eingeschränkte Sichtweite, mittelstarke Strömung von hinten, Wind- und Wellendaten nicht verfügbar.	64%	>50%

Die Befragung hat gezeigt, dass die Risikobewertung der sieben Situationen aus dem etwa ein-jährigem Datensatz an Begegnungen eine 100% Übereinstimmung ergeben hat. Dies legt nahe, dass auch die Erfahrung und Risikoeinschätzung stark von den Distanzen und den vorherrschenden Wetterbedingungen abhängig ist. Eine weitere Auffälligkeit, die die Annahmen dieser Forschungsarbeit bestärkt ist die Tatsache, dass die Situationen mit dem höchsten, identifizierten Risiken (2+7) auch Situationen mit einem unüblichen Fahr- und Manövrierverhalten sind, was bei der hier untersuchten Risikoeinschätzung noch nicht

berücksichtigt wurde. Auch der Experte hat bei diesen Situationen eindeutiger angemerkt, dass diese Situationen als kritisch einzustufen sind. Diese Erkenntnis kann als Indiz aufgefasst werden, dass Schiffe vor potenziellen Kollisionen und insbesondere vor der Minimaldistanz häufiger Manöver durchführen und diese Situationen demnach als besonders kritisch einzustufen sind (vgl. Anlage 33 und Anlage 34).

6.3. Fahrerreaktionen und Unsicherheiten erkennen mittels Manövernetz

Zur Beurteilung des wissenschaftlichen Konzeptes zur Detektion von Manövern mittels CUSUM und zur Generierung eines Manövernetzes zur Beschreibung von Normalverhalten von Schiffsklassen, wird die Evaluation in zwei Teile aufgegliedert. Zunächst wird die Detektion mittels CUSUM einer qualitativen Bewertung unterzogen, indem mit dem Versuchsträger ZUSE des Testfelds eMIR bestimmte zuvor definierte Manöver gefahren werden und diese anschließend aus der retrospektive detektiert werden (vgl. Tabelle 7). Anschließend wird das Manövernetz zur Erkennung von Anomalien und zur Routenempfehlung erzeugt, um so zu validieren, dass ein Manövernetz zur Modellierung von Normalverhalten geeignet ist.

6.3.1. Evaluation der Manövererkennung mit CUSUM³⁶

Zur generellen Prüfung der Eignung des CUSUM Algorithmus für die Erkennung von Manövern (Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen) wurden zuvor definierte Experimente gefahren (vgl. Tabelle 7) und anschließend die Manövererkennung über die Datensätze laufen gelassen. Hierfür wurden die schiffsinternen Daten ausgelesen und die Informationen untersucht, die auch in der AIS Nachricht zu finden sind. Durch die genaue Messung der Manöverbeginne, kann so die Diskrepanz zwischen Initialisierung des Manövers und der Detektion mittels CUSUM bestimmt werden. Es wurden starke und weniger starke Manöver gefahren, um zu untersuchen, wie sensitiv der Alarmtrigger des CUSUM justiert werden muss. Weniger starke Manöver definieren das legen des Ruders auf 20° in die Steuerbord- und Backbordrichtung, bis eine 20° Änderung des Kurses erreicht wurde. Starke Änderungen sind die Änderung des Kurses um 40° mit 40° Rudereinschlag.

³⁶Die Ergebnisse und der Versuchsaufbau hierzu wurden in: Lamm, Arne; Hahn, Axel: Detecting maneuvers in maritime observation data with CUSUM. In: 2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). Bilbao: IEEE, 2017 — ISBN 978-1-5386-4662-5, S. 122–127 veröffentlicht.

Tabelle 7: Tabellarische Übersicht der gefahrenen Manöver zur Evaluation des CUSUM

Experiment	Beschreibung
1	Kleine Kursänderung (20° Ruderwinkel) zur Backbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
2	Kleine Kursänderung (20° Ruderwinkel) zur Steuerbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
3	Große Kursänderung (40° Ruderwinkel) zur Backbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
4	Große Kursänderung (40° Ruderwinkel) zur Steuerbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
5	Lange Kursänderung zur Backbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
6	Lange Kursänderung zur Steuerbordseite, ohne Geschwindigkeitsänderung
7	Kursänderung mit Beschleunigung
8	Kursänderung mit Bremsvorgang
9	Keine Kursänderung und Beschleunigung
10	Keine Kursänderung und Bremsvorgang

Die Beschreibung des Verfahrens wird an Experiment 1 vorgenommen. Alle gefahrenen Manöver wurden durch den CUSUM Ansatz in einer tolerierbaren Zeit von wenigen Sekunden erfasst (vgl. Anlage 27). Es wurde der CUSUM auf den COG, Heading, SOG und STW Werten durchgeführt. In Abbildung 55 ist eine Trajektorie ersichtlich (die Zeit wurde der Übersicht halber nicht dargestellt) in der die ZUSE zunächst einen bestimmten Kurs hält, anschließend ein Backbordmanöver durchführt und den Kurs anschließend erneut hält. Man sieht, dass im Kurvenverlauf bei stabilem Kurs der Verlauf aufgrund von Umwelteinflüssen (Wind, Wellen und/oder Strömung) leicht schwankt und regelmäßige Anpassungen vorgenommen werden müssen, um den Kurs zu halten. Diese kleinen Schwankungen sollen vom CUSUM nicht detektiert werden, sondern erst das aktive Backbordmanöver.

Der Verlauf in Abbildung 56 zeigt die Anwendung des CUSUM auf dem COG. Man sieht, dass sich der Kurs zunächst bei etwa 160° befindet anschließend ein Manöver mit Ruderlegung von 20° durchgeführt wird und der Kurs anschließend bei 140° angelegt wird.

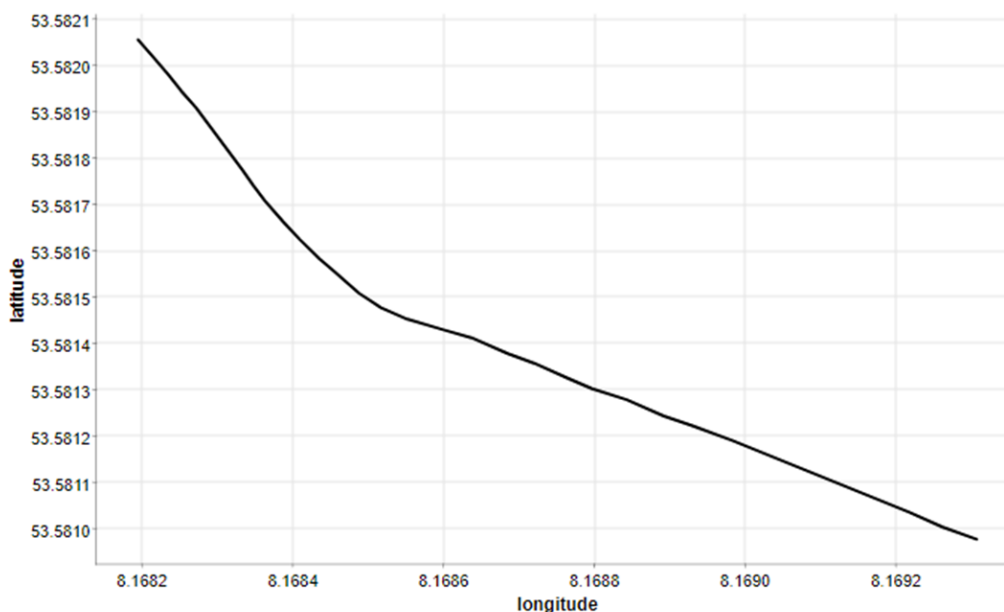


Abbildung 55: Trajektorie eines Backbordmanövers mit 20° Rudereinschlag (Experiment 1)

Die anderen Linien zeigen die Entscheidungsfunktion des CUSUM Algorithmus für die negative Änderungen (gN - Backbordmanöver) und die positiven Änderungen (gP - Steuerbordmanöver). Bei der Berechnung kommt, wie im Konzept beschrieben, ein gleitender Mittelwert zum Einsatz. Der Kurvenverlauf beider Funktionen zeigt, dass die Funktionen ohne Regung leicht um den Wert 0 schwanken, solange bis das Backbordmanöver eingeleitet wird. Anschließend zeigt der Verlauf von gN einen starken Ausschlag. Auch gP reagiert aufgrund des gleitenden Mittelwertes leicht. Mithilfe des CUSUMs lässt sich also zum einen identifizieren, wann das Manöver eingesetzt hat (Beginn der Steigung von Funktion gN) und auch das es sich um ein Backbordmanöver handelt (Ausschlag von Funktion gN). Entscheidend ist die Wahl des Wertes für den Schwellenwert der Alarmfunktion. Dieser muss fein genug gewählt werden, um Manöver frühzeitig zu erkennen, aber nicht zu fein um keine Fehlalarme auszulösen. Generell ließ sich durch die zehn Experimente feststellen, dass die Geschwindigkeitsverläufe wesentlich stabiler waren als die Kursverläufe, wodurch die Geschwindigkeit prinzipiell feiner justiert werden konnte als der Schwellenwert des Alarms für die Kursinformationen. In der Untersuchung rund um den Aufbau des Manövernetzes für unterschiedliche Schiffstypen konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass kleinere Schiffe mehr Schwankungen unterliegen als größeren und daher auch hier eine Anpassung der Alarmfunktion für die unterschiedlichen Schiffstypen vorgenommen werden müssen.

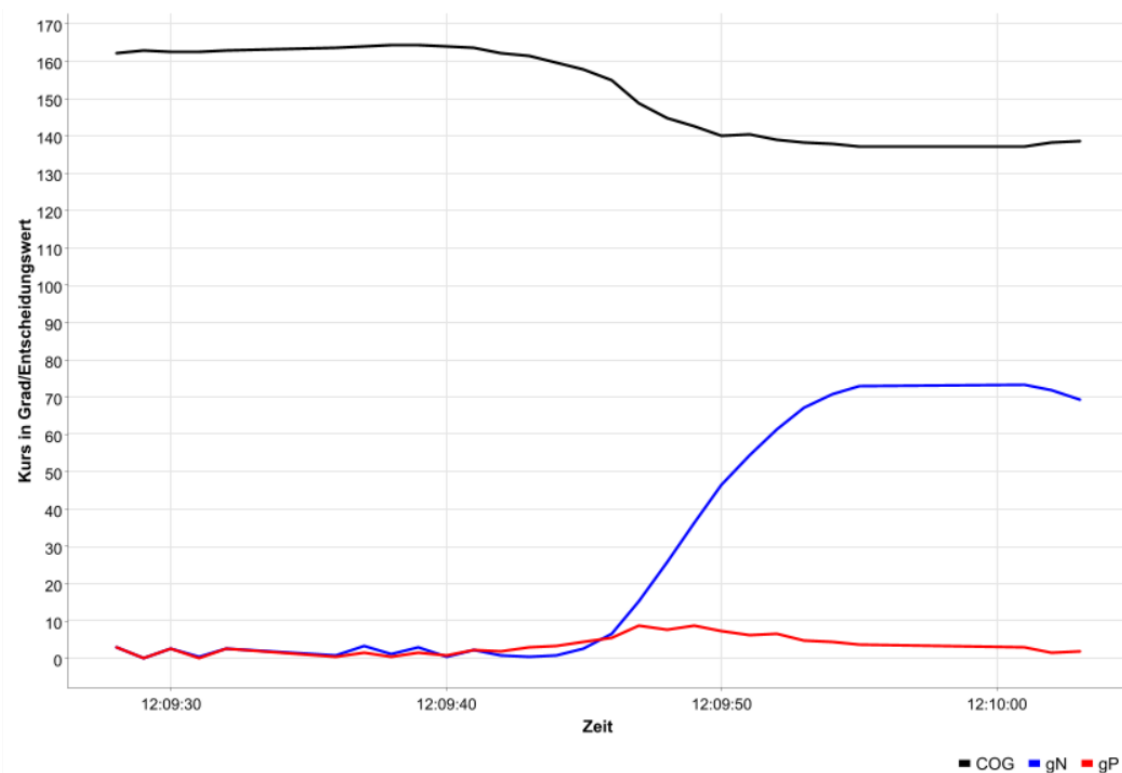


Abbildung 56: Kursverlauf und CUSUM-Entscheidungsfunktion des Experiment 1 über die Zeit

Für die Vollständigkeit findet sich in der Abbildung 57 das Experiment 9 mit der Erhöhung der Geschwindigkeit. Hier lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Entscheidungsfunktionen deutlich ruhiger ist. Und die Funktion gP mit Einsetzen der Beschleunigung deutlicher ansteigt. Ebenfalls ist hier aufgrund des gleitenden Mittelwerts eine leichte Steigung der Funktion gN zu erkennen. In beiden Kurvenverläufen sowohl für die Geschwindigkeit (Experiment 9) als auch beim Kurs (Experiment 1) ist erkennbar dass die Entscheidungsfunktion nach konstanter Haltung der Werte eine Abwärtstendenz zeigt, sodass die Möglichkeit besteht, entgegen des eigentlichen Vorbilds vom CUSUM, mehrere Manöver hintereinander detektieren zu können. Die unterschiedlichen Steigungen sind damit zu begründen, dass die Änderung des Kurses weniger stark ausfällt als die der Geschwindigkeit, weshalb die CUSUM Entscheidungsfunktion weniger stark ansteigt und weniger schnell wieder auf den Ursprung zurückfällt.

Nachdem die generelle Funktionsfähigkeit des CUSUM-Verfahrens qualitativ gezeigt wurde, soll im Folgenden die quantitative Verwendung des Ansatzes für die Erzeugung von Normalmodellen dargestellt und untersucht werden.

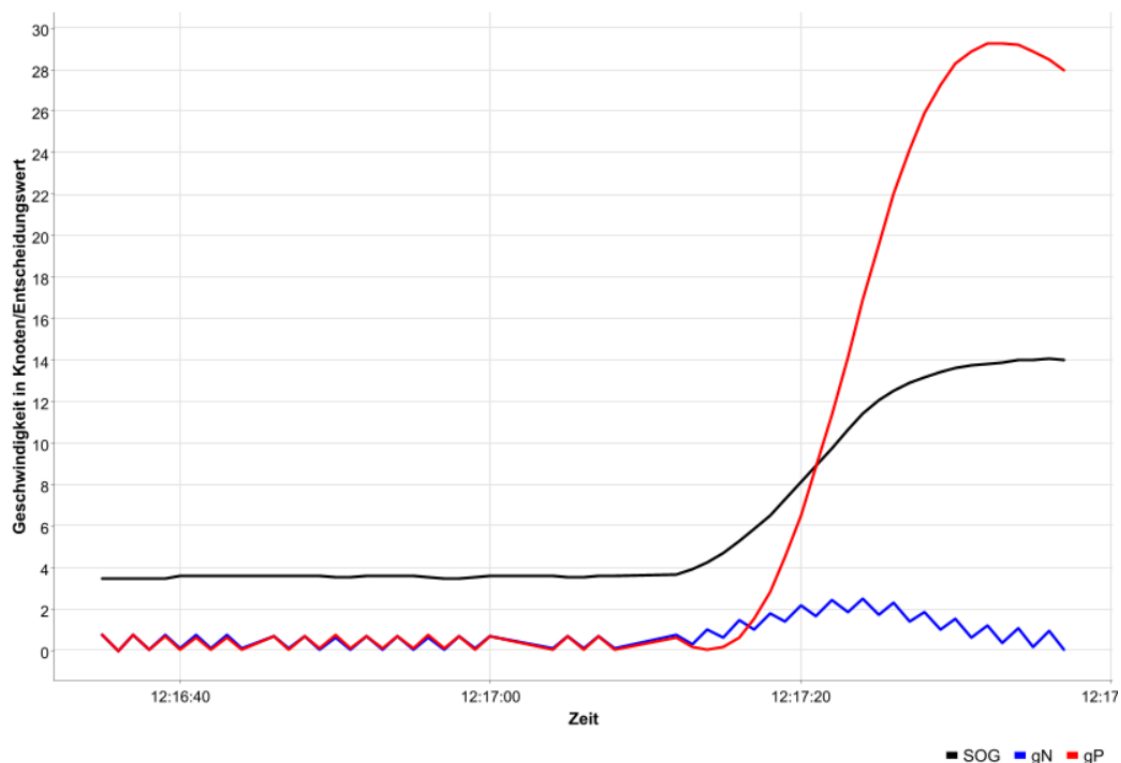


Abbildung 57: Geschwindigkeitsverlauf und CUSUM-Entscheidungsfunktion des Experiment 9 über die Zeit

Die Evaluation des Manövernetzes wird nun anhand zweier Anwendungsbeispiele mit unterschiedlichen Bedingungen an das Normalmodell gezeigt. Bei dem ersten Anwendungsbeispiel geht es darum, basierend auf einem Manövernetz Routenempfehlungen für Schiffe auszugeben. Dieses Anwendungsbeispiel dient dazu, darzustellen, dass das Manövernetz ein adäquates Normalmodell abbildet und somit für die Aufdeckung von unsicherem Verhalten geeignet ist. Der zweite Anwendungsfall ist die Anomalieerkennung mittels Manövernetz. Dies ist direkt mit der Anforderung 23 verknüpft, anomales und somit unsicheres, also in diesem Kontext schwer einschätzbares Verhalten sichtbar zu machen.

6.3.2. Evaluation des Manövernetzes – Anwendungsbeispiel 1: Routenempfehlung

Als Anwendungsbeispiel für die Routenempfehlung sei für diese Evaluation das Projekt HANSA³⁷ (Retrospective Analysis of Historical AIS Data for Navigational Safety Through Recommended Routes) genannt. Bei dem Projekt, welches Mitte 2018 gestartet ist und eine Laufzeit von 2 Jahren hatte, bestand der Forschungsbeitrag darin, ein Werkzeug zu entwickeln, welches basierend auf historischen AIS Daten und Wetterinformationen Routenempfehlungen zur sicheren Planung von Reisen ausgibt. Das Projektkonsortium hatte während der Projektlaufzeit angefragt und Interesse bekundet, dass veröffentlichte Verfahren zur Manövererkennung einsetzen zu wollen [LaHa17, LaHa19]. Daraufhin wurden die

³⁷ <https://www.martera.eu/projects/2017/hansa> (abgerufen am 05.01.2023)

Veröffentlichungen zur Verfügung gestellt und auf der Basis der Veröffentlichungen wurde das Verfahren für den Einsatz des Projektes umgesetzt. Der Kern dieses Werkzeuges basiert auf einem Modell welches die durch das CUSUM Verfahren detektierten Manöverpunkte mit einem genetischen Verfahren kombiniert und anlernt. Der Ansatz wurde von den Projektpartnern mit zwei Datensätzen, einem aus der Nord-, sowie einem aus der Ostsee evaluiert [FWSM20]. Zunächst wurde das CUSUM Verfahren untersucht, indem Experten vorab Wegpunkte bestimmten und die Distanzen zum Zentroid bestimmt wurden. Die Ergebnisse für den verwendeten Datensatz bzw. das ausgewählte Gebiet lieferten zufriedenstellende Ergebnisse und erfüllten die Anforderungen der Experten [FWSM20, S.443]. Der verwendete Datensatz umfasst eine Zeitspanne von acht Wochen und wurde für die generelle Bewertung des Normalmodells eingesetzt. Anschließend wurden für die Evaluation der Vorhersagbarkeit von Schiffsrouten, vier exemplarische Routen ausgewählt und mit dem generierten Manövernetz in diesem Bereich abgeglichen. Das Modell besaß für die ausgewählten Routen mehr Manöverpunkte als die von den Experten ausgewählte Route mitsamt der Wegpunkte. Auch hier lieferte das Manövernetz basierend auf den Manöverpunkten des CUSUM Verfahrens laut den AutorInnen zufriedenstellende Ergebnisse [FWSM20, S.445 ff.]. Somit lässt sich abschließend festhalten, dass das Manövernetz geeignet ist Routenempfehlungen zu liefern, da es in der Lage ist, das normale Verhalten in Gewässern abzubilden. Im Umkehrschluss kann die Annahme getroffen werden, dass sich das Manövernetz eignet, um die Unsicherheit von Schiffen für die Detektion von Beinahekollisionen zu messen, was in diesem Anwendungsfall von unabhängiger Seite evaluiert wurde und in diesem Abschnitt nochmal gezeigt werden konnte. Auch die Anwendung und Rekonstruierbarkeit des Manövernetzes in einem anderen Forschungskontext konnte durch diesen Evaluationsabschnitt gezeigt werden.

6.3.3. Evaluation des Manövernetzes – Anwendungsbeispiel 2: Anomalieerkennung³⁸

Für das zweite Anwendungsbeispiel, soll das CUSUM Verfahren und das daraus extrahierte Manövernetz zur Detektion von Anomalien eingesetzt werden. Hierfür wurde das Manövernetz aus einem Datensatz von 301:55:36h (ca. 12,5 Tage) und 1.621.475 dynamischen AIS Datenpunkten erzeugt. Da das zu beobachtende Gebiet vor allem Sensorstationen in der Elbmündung hat, werden andere Cluster als Ausreißer herausgefiltert, da nicht genügend Daten in den anderen Randbereichen verfügbar waren. Daher lässt sich ein vereinzelter Punkt ohne Zugehörigkeit in Bremerhaven feststellen (vgl. Abbildung 58). Zur

³⁸ Veröffentlicht unter: Lamm, Arne; Hahn, Axel: Statistical Maneuver Net Generation for Anomaly Detection in Navigational Waterways. In: 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Paris, France: IEEE, 2019 — ISBN 978-1-72810-521-5, S. 1438–1443

Untersuchung von Anomalien wurden diejenigen Schiffstracks näher gesichtet, welche Manöver aufwiesen, die fernab der Manöverpunkte des Manövernetzes lagen. Dabei ließ sich feststellen, dass es sich hierbei um Schiffe handelt, die ein ungewöhnliches Verhalten aufweisen.

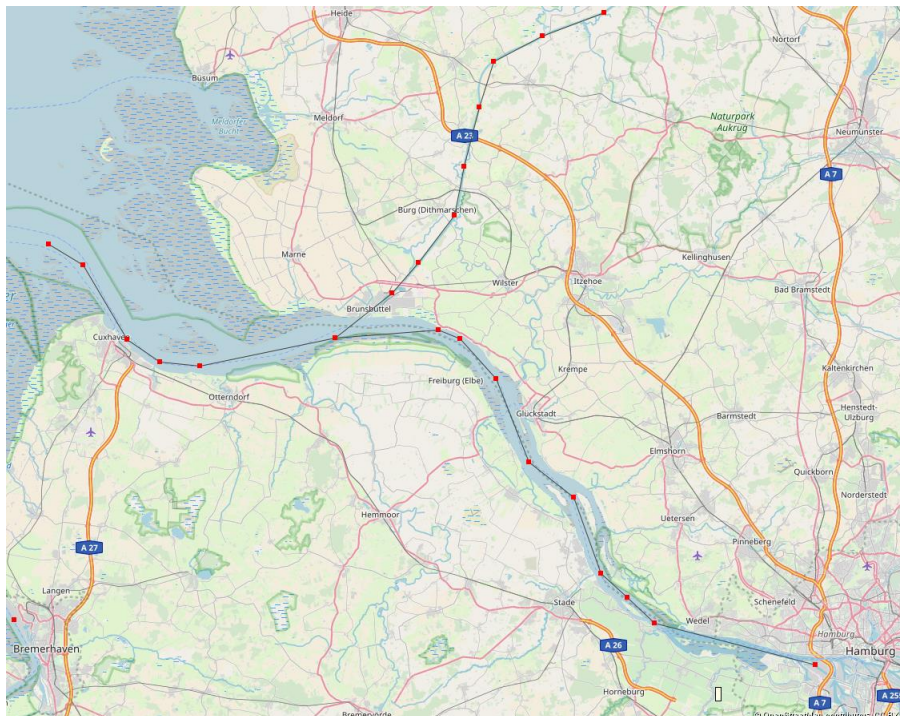


Abbildung 58: Generiertes Manövernetz aus einem Datensatz der Deutschen Bucht

In Abbildung 59 ist ein Schiffstrack zusammen mit dem generierten Manövernetz dargestellt, bei welchem ein Schiff aus Cuxhaven in Richtung Brunsbüttel/Hamburg unterwegs ist, anschließend eine Reihe von Manövern durchführt und wieder zurück nach Cuxhaven fährt. Dies würde für die Beinahekollisionserkennung ebenfalls als unsicheres Verhalten eingestuft werden.

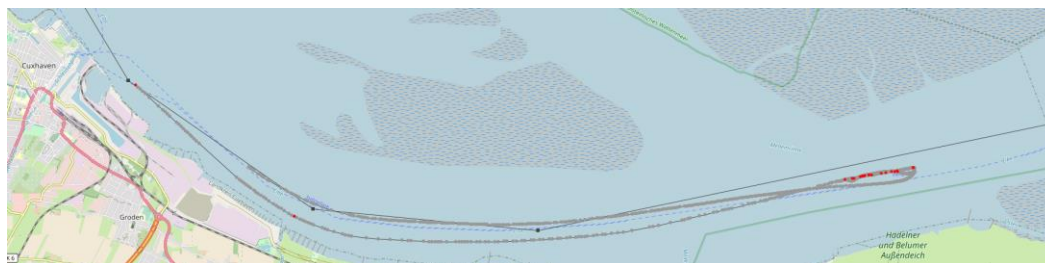


Abbildung 59: Anomaliedetektion mittels Manövernetz

Aus dem Beispiel in Abbildung 59 lässt sich gut erkennen, dass gerade große Kursänderungen wie die hier zu sehende 180° Änderungen dazu führen, dass zunächst keine weiteren Manöver mehr erkannt werden können, da sich die Entscheidungsfunktionen des CUSUM-

Algorithmus‘ durch den gleitenden Mittelwert erst wieder normalisieren müssen, und somit die Spanne bis zum Ende der Situation zu gering ist.

6.4. Evaluation der Detektion vom Manöver des letzten Augenblicks

In den vorangegangenen Abschnitten zur Evaluation des Lösungskonzeptes wurde das Verfahren zur Manöverdetektion untersucht, um zu zeigen das durch den CUSUM und das Manövernetz durchaus Manöver und Anomalien erkannt werden können, was als Vorarbeit und Voraussetzung für die abschließende Darlegung des Verfahrens zur Erkennung von Beinahekollisionen dient. Auch wurde gezeigt, dass die zugrundeliegende oder vorab erforderliche Risikobewertung von Begegnungen ebenfalls dienlich ist, um automatisiert und zielgerichtet nach potenziellen Kollisionssituationen zu suchen. Um nun abschließend zu belegen, dass potenzielle Kollisionssituationen, wie in den Grundlagen angenommen, deutlich häufiger aufzufinden sind, als reale Kollisionen und diese ebenfalls als Grundlage zur Verbesserung der Sicherheit auf See eingesetzt werden können soll die nun folgende Evaluation zwei Dinge zeigen: Zum einen soll hiermit gezeigt werden, dass Beinahekollisionen häufiger (täglich) zu finden sind, und zum anderen, dass die Unsicherheit einen großen Einfluss darauf hat, ob eine Situation als kritisch eingestuft werden kann oder nicht. Für die Evaluation wurde ein Datensatz vom 01.01.2019 verwendet und hier aus der Vorverarbeitung nur Szenarien verwendet, die den qualitativen Vorgaben entsprechen, also genügend Informationen für die Untersuchung bereitstellen. Demnach beinhaltet der Datensatz 190.078 Datenpunkte, welche sich in 319 Schiff-zu-Schiff Begegnungen aufteilen lassen. Dabei wiesen drei Begegnungen ein Manöver auf, welches vom Verfahren als Manöver-des-letzten-Augenblicks identifiziert wurde. Aus der Abbildung 60 lässt sich erkennen, dass bereits Begegnungen vorhanden sind, die im Verlauf der Begegnung einen DCPA von 0 aufweisen. Als Einschränkung sei ergänzend gesagt, dass Begegnungen für diesen Lauf nur Situationen mit einer Minimaldistanz von zwei Seemeilen (3704 Meter) aufgetragen werden.

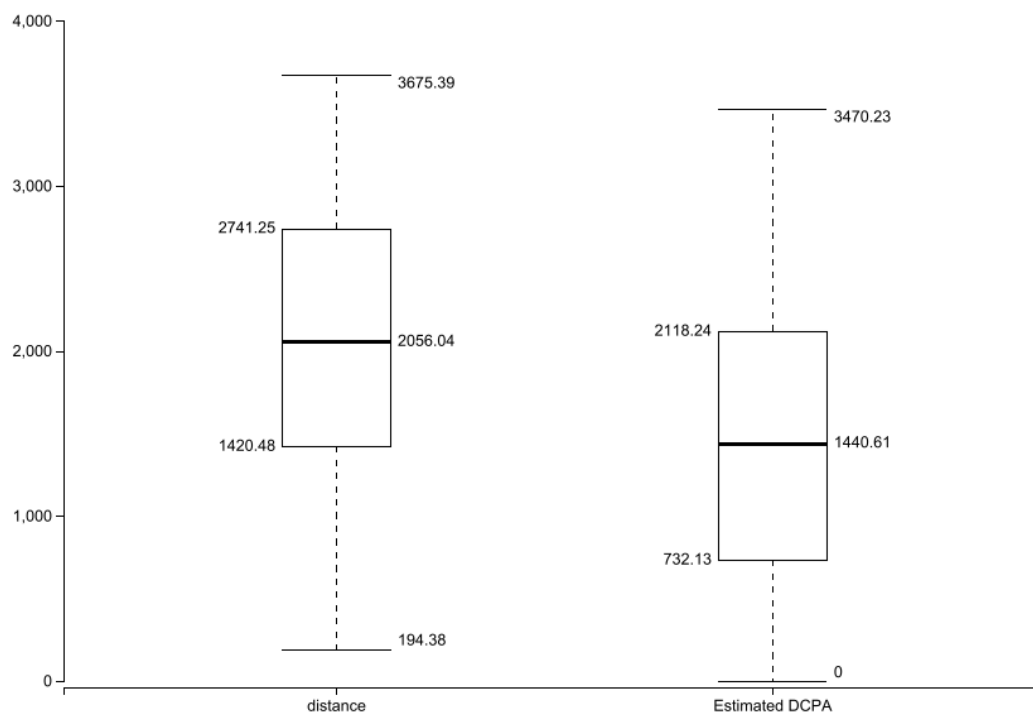


Abbildung 60: Boxplot zum Vergleich von DCPA und realen Distanzen der gesammelten Begegnungen (Distanzen in m)

Darüber hinaus handelt es sich bei dem Datensatz, um Daten die nicht aus dem Testfeld stammen, um gleichzeitig auch die Übertragbarkeit des Prozesses auf andere Bereiche zu demonstrieren (vgl. Abbildung 61).

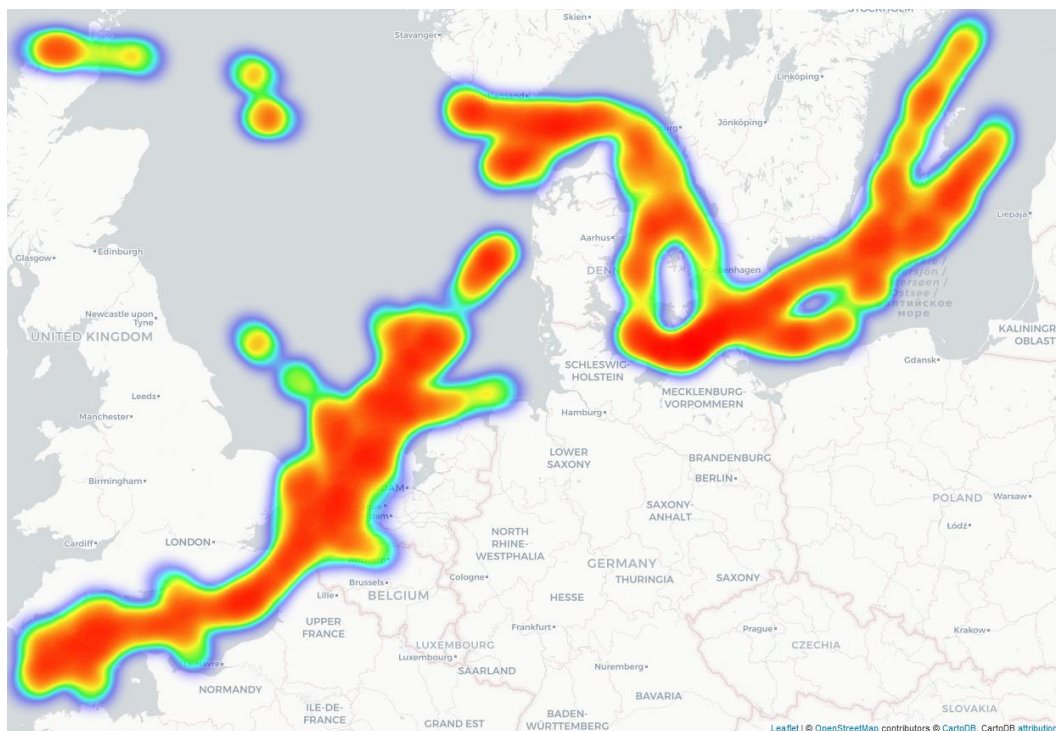


Abbildung 61: Heatmap zur Darstellung und Verortung des zugrundeliegenden Datensatzes

Das erste Szenario was repräsentativ für die Bestätigung der Annahmen dienen soll, ist das Szenario mit der ID 396 (vgl. Abbildung 62). Bei diesem Szenario handelt es sich um eine Situation die als Frontalsituation klassifiziert wurde. Eines der Schiffe weist eine Länge von 114 m auf, das andere eine Länge von 105 m. Dazu wurde zwischenzeitlich ein DCPA von 0m festgestellt. Die minimale Distanz beim realen CPA lag bei 716m. Dazu ist beim Verlauf beider Schiffe deutlich zu erkennen, dass diese bereits weit vor der Begegnung ungeplante Manöver durchführen und auch beide Schiffe während und bereits vor dem Punkt mit der minimalsten Distanz vermehrt Manöver detektiert werden konnten. Demnach lässt sich erstens ein gewisses Maß an Unsicherheit bei beiden Verkehrsteilnehmern unterstellen, zweitens die Distanz die für die Schifffahrt und basierend der Länge der Schiffe schon als nah zu bezeichnen ist (vgl. Fujii Schiffsdomäne in Abbildung 8 die eine Entfernung der 6,4-fachen Schiffslänge in Frontalsituationen annimmt), drittens die Aufdeckung von Manövern des letzten Augenblicks und viertens ein kurzzeitiger DCPA von 0 Metern im Verlauf der Begegnung. Die Abbildung 62 zeigt in Rot den Zeitraum in dem von beiden Verkehrsteilnehmern ein aktives Manöver durchgeführt wird. Die Orange/Gelb umrandeten Kästchen wiederum zeigen die Manövereinleitung beider Schiffe. Der Gesamtverlauf der Begegnung lässt sich Anlage 35 entnehmen.

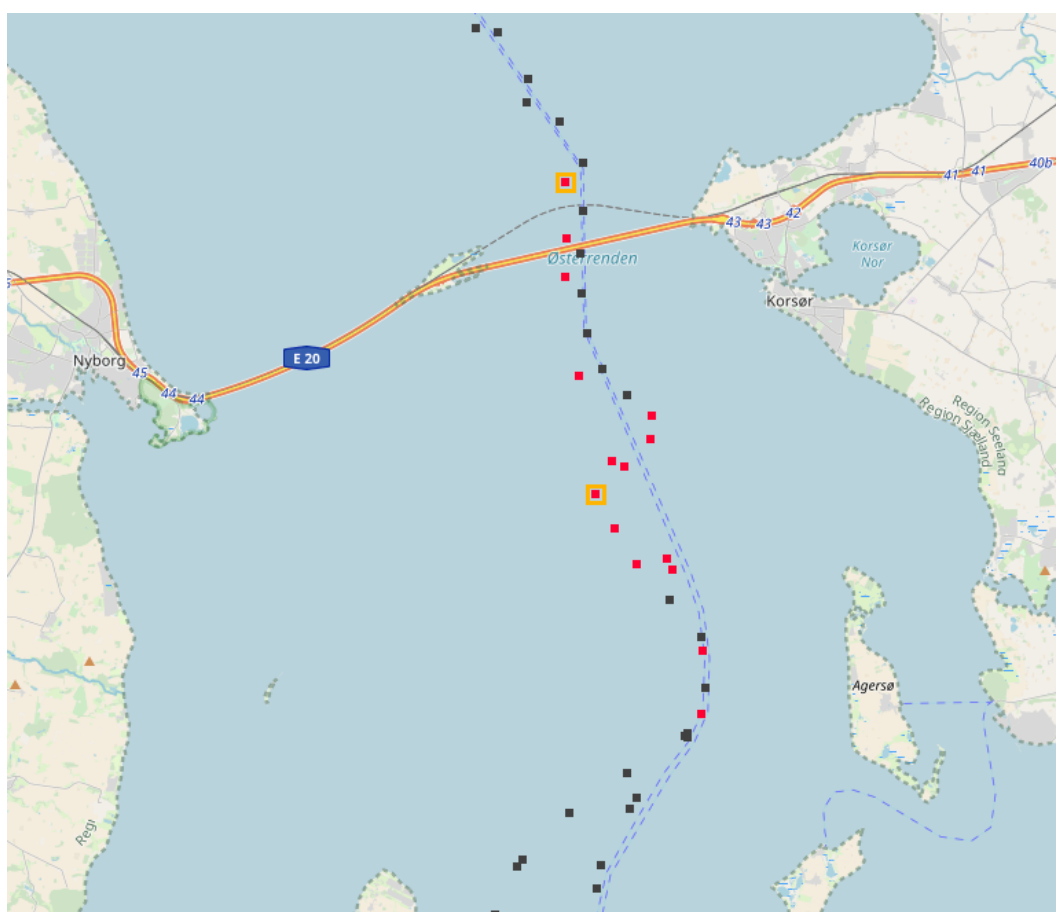


Abbildung 62: Beinahekollision vor Dänemark

Die zweite Begegnung mit Manöver-des-letzten-Augenblicks ist eine Situation in der zwei Schiffe aus einer Flussmündung in den Niederlanden ausfahren und das eine Schiff von dem anderen überholt wird. Dabei lässt sich kurz vor dem Überholvorgang selbstredend ein Manöver erkennen. Zur Information sie hier erwähnt, das in den Expertengesprächen mit den Lotsen angemerkt wurde, dass gerade Überholvorgänge als kritisch einzustufen sind, da eine Bewegung des zu überholenden Schiffes zu einer drastischen Distanzreduktion führt (bei Schiffsmanövern schlägt das Heck zuerst aus), was auch in dieser Begegnung sichtbar wird, da dies die Situation aus dem Boxplot mit einer geschätzten DCPA von 276m und einer realen Distanz von 194m ist (Situation mit der geringsten Distanz in diesem Datensatz). Das eine Schiff weist hierbei eine Distanz von 183 m auf, das andere von 50 m.

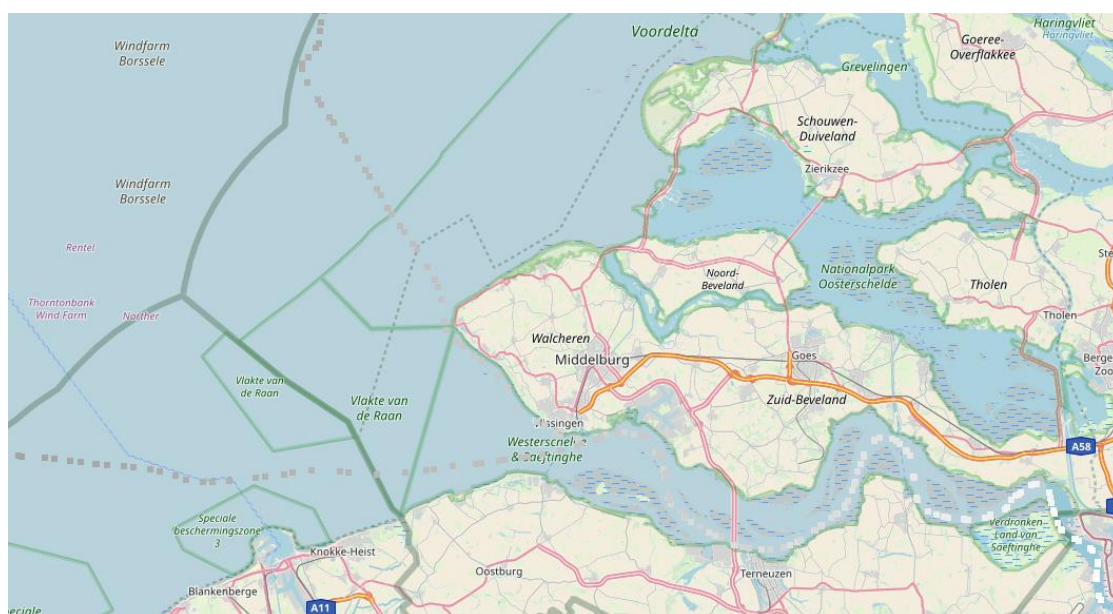


Abbildung 63: Überholvorgang in den Niederlanden (normalisierter, zeitlicher Verlauf der Trajektorien von hell zu dunkel)

Abschließend sei die letzte Begegnung dargestellt, bei der das eine Schiff durch deutliche Manöveränderungen auffällt (vgl. Abbildung 64), was eine Abschätzung der Situation schwierig macht, wodurch die Situation keiner Begegnungsart zugeordnet werden konnte. Das Schiff mit dem auffälligen Verhalten weist eine Länge von 40 m auf. Das Schiff, welches gekreuzt wird, weist eine Länge von 100 m auf.

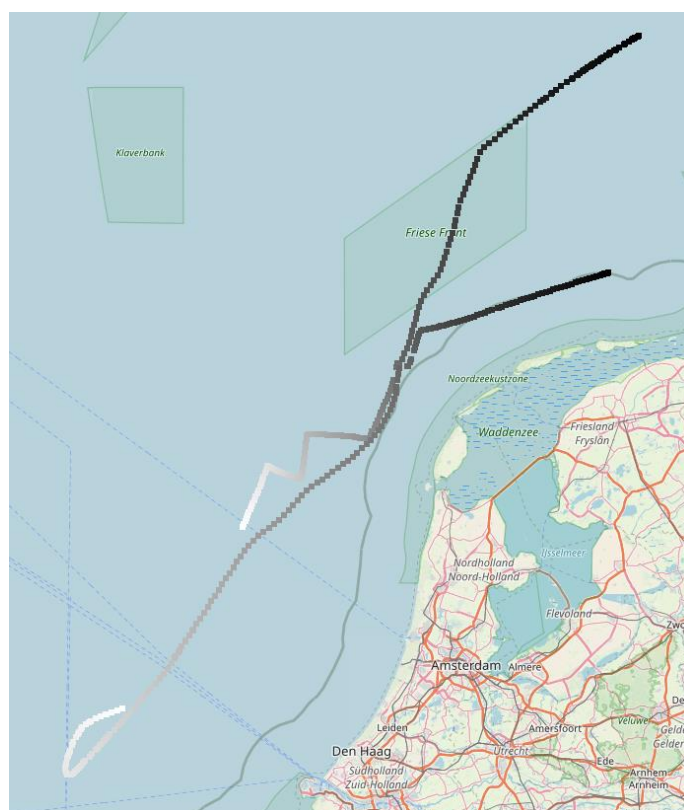


Abbildung 64: Kreuzungssituation vor den Niederlanden (normalisierter, zeitlicher Verlauf der Trajektorien von hell zu dunkel)

Man kann also abschließend sagen, dass durch einfache automatisierte Selektion bereits bei der Verarbeitung eines Tagessatzes mehrere Begegnungen als Beinahekollisionen identifiziert werden können. Gerade Situationen mit vielen Manövern und geringen Distanzen machen eine Einteilung und genaue Abschätzung des geplanten Verhaltens schwer kalkulierbar. Aus diesem Grund sind vor allem die Situationen spannend, die von den gängigen Verfahren zu Einteilung von Begegnungsarten nicht klassifiziert werden können. Auch die Durchführung von deutlichen Manövern während oder kurz vor der geringsten Distanz kann ein klarer Indikator für kritische Begegnungen sein.

6.5. Klassifikation von Beinahekollisionen

Nun folgt eine abschließende Evaluation des Gesamtsystems. Nachdem die einzelnen Komponenten die für die Detektion von Beinahekollisionen im Einzelnen evaluiert wurden, soll nun der Gesamtprozess untersucht werden. Hierfür wurden Verkehrsdaten vom 09.11.2016 bis zum 13.01.2018 analysiert. Dabei sind 785.826 Schiff-zu-Schiff Begegnungen erkannt wurden. 14.649 Begegnungen wurden mit dem vorgestellten Ansatz als potenzielle Kollisionssituationen erkannt. Dabei wurden alle Begegnungen als Beinahekollisionen definiert, die mindestens zwei der vier Indikatoren im Abstand für das Manöver-des-letzten-Augenblicks (LMM Distanz) aufwiesen. Dies entspricht in etwa 1,86% aller

Begegnungen. Vergleicht man diesen Wert mit der Aussage von van Iperen [Vani12] das 1-2% aller Situationen auf See potenziell kritisch sind, ist dieser Wert hinreichend plausibel. Genauere Betrachtung der potenziellen Kollisionssituationen zeigt aber auch, dass viele der Beinahekollisionen sich auf Reede vor der Elbmündung und vor dem Containerterminal Bremerhaven abspielen. Weitere Prüfungen der Begegnungen zeigen, dass es sich bei den Situationen vermehrt um Lotsenboote und Schlepper handelt, die in der Tat viele Manöver fahren und sich den (zumeist) Containerschiffen, beispielsweise zum Überstieg des Lotsenden, deutlich annähern. Zwar wurden aufgrund der Tatsache, dass in diesem Gebiet Schlepper und Lotsenboote unterwegs sind, bereits alle Begegnungen mit einer Distanz von 0 herausgefiltert, aber dennoch wiesen einige dieser Situationen eine größere Distanz auf, was mehrere Ursachen haben kann:

1. Die Antennenposition für die GPS-Positionierung auf den Schiffen, in den AIS-Nachrichten ist nicht korrekt angegeben.
2. Die zeitlichen Abstände der AIS-Nachrichten haben den Zeitpunkt mit einer Distanz von 0 verfehlt.
3. Ungenauigkeiten bei der Abstands- und/oder Positionsmessung.

Filtert man Schlepper und Lotsenboote zur Probe heraus sind noch 8.635 Begegnungen verfügbar. Somit beläuft sich der prozentuale Anteil an potenziellen Beinahekollisionen auf ca. 1,1%. Schlepper und Lotsenboote wurden aufgrund der Tatsache, dass eine Differenzierung im Konzept nicht erfolgt ist, auch bei der Befragung der Expertin mitberücksichtigt. Aus diesen 14.649 ursprünglichen Begegnungen wurden zufällig 40 Begegnungen ausgewählt und einer Expertin vorgestellt (vgl. Anlage 36). Auch hier traten bei 17 der 40 Situationen Lotsen- oder Schlepperbegegnung auf, was mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit von 42,5% auch den 41% aus der vorab beschriebenen Feststellung entspricht. Die Expertin hat von den übrigen 23 Begegnungen 11 eindeutig als Beinahekollision bewertet. Bei 12 Begegnungen handelt es sich laut Einschätzung der Expertin nicht um Beinahekollisionen. Schaut man sich die 12 Begegnungen im Detail an, so handelt es sich bei vier Fällen um Situationen mit jeweils zwei Fähren, bei welchen von einer Absprache miteinander oder eingespieltem Reagieren aufeinander ausgegangen werden kann. Bei den anderen Situationen konnte die Expertin bestätigen, dass alle Situationen durchaus Konzentration erfordern und bei versäumten eingreifen oder handeln der Navigierenden eine Kollision nicht ausgeschlossen werden kann. Die Erfahrung und auch das Verhalten zeigen der Expertin, dass eine Absprache über Sprechfunk im Vorfeld in diesen Situationen, die nicht als potenzielle Kollisionssituation wahrgenommen wurden, stattgefunden haben muss, da die Trajektorien ansonsten ein anderes Bild gezeigt hätten. Auch wenn in der Theorie die Navigierenden angehalten sind den

Sprechfunk nicht für die Kollisionsvermeidung zu verwenden, so ist es in der Realität dennoch gängige Praxis [Inte98b]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Situationen in denen neben Kurs- und Geschwindigkeitsänderungen auch eine Regelmissachtung detektiert wurde, dies auch von der Expertin in der Regel als potenzielle Kollisionssituation aufgefasst wurde. Auch bei Erkennung von Unsicherheiten wurde dies verstärkt als Beinahekollision aufgefasst. Bei Situationen wie in Beispiel Nr. 30 oder 32 ist die Expertin davon ausgegangen, dass die Schiffe sich obwohl die Situation deutliche Aufmerksamkeit erfordert, schon frühzeitig in Sicht hatten und die Situation demnach zu jeder Zeit kontrollierbar war. Es wird also auch in diesem Experteninterview erneut deutlich, dass die Beurteilung einer Beinahekollision subjektiv und sehr stark von den eigenen Erfahrungen geprägt ist. Da die Expertin in ihrer nautischen Laufbahn auf vielen Schiffen in der Nordsee unterwegs war und mit dem Lotsenbetrieb und der Kommunikation auf See demnach gut vertraut ist, fließt auch dieses Wissen in die Beurteilungen der Situationen mit ein. Ob über UKW Kommunikationen stattgefunden haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht untersucht.

6.6. Zusammenfassung und Anforderungserfüllung

Wie bereits in den Abschnitten 4.5 und 5.4 beschrieben wurden die Anforderungen die die TF1 und TF3 adressieren durch das Konzept- und Implementierungskapitel bereits erfüllt. Das Evaluationskapitel dient zur Prüfung der Anforderungen die sich der umfangreichen TF2 zuordnen lassen. Das Evaluationskapitel wurde so aufgebaut, dass zunächst die Artefakte Begegnungsklassifikation, Risikobewertung und die Aufdeckung von Manövern und Unsicherheiten separat betrachtet wurden. Anschließend wurde der Gesamtprozess zusammengeführt und das Ergebnis durch eine Expertinbefragung untersucht. Die Evaluation hat gezeigt, dass die Anforderungen die von den verwandten Arbeiten und damit von der TF2 aufgestellt wurden, von dem vorgeschlagenen Konzept und der darauffolgenden Implementierung adressiert und erfüllt werden konnten. Durch die Berücksichtigung von Wetter- und Kontextinformationen (ENCs), konnte eine Übereinstimmung der Risikobeurteilung eines Experten gezeigt werden, was die automatisierte Beurteilung von Begegnungen unterstützt. Somit konnte die Erfüllung der Anforderungen 11, 14, 16 und 19 durch den Abschnitt 6.2 gezeigt werden. Die Anwendung der KVRs wurden zum einen in Abschnitt 6.1 und zum anderen in Abschnitt 6.5 berücksichtigt, weshalb auch die Anforderungen 12, 13, 15, 17 und 20 im Rahmen der Evaluation betrachtet und die Erfüllung gezeigt werden konnte. Durch die Evaluation der Manövererkennung mittels CUSUM und der Evaluation des Manövernetzes wurden die Anforderungen 18, 21, 22 und 23 adressiert, und durch die abschließende Evaluation in Abschnitt 6.5 berücksichtigt. Somit erfüllt der vorgeschlagene Prozess zur Erkennung von Beinahekollisionen alle im Vorfeld definierten Anforderungen an die TF2 wodurch die Erfüllung der TF2 abschließend bestätigt werden kann. Da die TF1 und TF3

bereits durch die Implementierung beantwortet wurden, und auch durch die direkte Nutzung des Traffic Data Warehouses in der Evaluation auch nochmal zusätzlich die Anforderungen 1-10 und 24+25 final validiert werden konnten, kann die Eingangs identifizierte Forschungsfrage: „Wie lassen sich validierungsrelevante Beinahekollisionssituationen aus historischen Verkehrsdaten detektieren und als Ground Truth nutzen?“ (vgl. Abschnitt 1.3) zum Teil beantwortet werden. Der Teil zum Nutzen der relevanten Beinahekollisionen wird für den Ausblick und das Fazit offengehalten. Durch die Bereitstellung im eMIR Testfeld welches für verschiedenste Anwendungsfälle genutzt wird, kann aber vorweggenommen werden das auch diese Nutzung erfüllt ist.

7. Fazit und Ausblick

Sicherheit für Mensch und Umwelt im Verkehr, ist eines der wesentlichen Ziele die mit der Automatisierung von Fahrzeugen und der Entwicklung von Assistenzsystemen erreicht werden soll. Die existierenden Lösungen assistieren der fahrzeugführenden Person, übernehmen die Aufgaben der Situationsbeurteilung und Handlungsentscheidung jedoch (noch) nicht. Sicherzustellen, dass ein System Konfliktsituationen besser bewältigt als der Mensch, ist eines von vielen Forschungsthemen der Mobilität. Um also Systeme zu entwickeln die in Zukunft Aufgaben des Menschen übernehmen können, müssen die Systeme zunächst in einer gesicherten Umgebung entwickelt und betrieben werden. Da die Menge an Szenarien die in der Realität auftreten können, aufgrund der unzähligen Parameter die es zu berücksichtigen gilt, nicht greifbar ist, können klassische Verfahren der Software- und Systementwicklung für die Evaluation und Realisierung dieser Systeme nicht mehr herangezogen werden. Selbstlernende Verfahren bieten sich als Kern dieser Systeme an, haben jedoch den Nachteil, dass das Gelernte nicht oder nur schwer extrahierbar und demnach beurteilbar ist. Auch benötigen die meisten dieser Verfahren eine Datenbasis über das Einsatzgebiet und die zu bewältigenden Situationen, die ausreichend groß ist, um zukünftige Situationen sicher bewältigen zu können. Simulationen und auch die künstliche Generierung von Daten haben den Nachteil, dass sie die Realität nur zu einem bestimmten Grad abbilden können. Auch die Entwicklungsumgebungen können nur bedingt die Vollständigkeit und Validität der Systeme untersuchen. Da durch die existierenden Assistenzsysteme der Mensch dennoch immer weiter entlastet wird und auch immer neue Rahmenbedingungen entstehen um den Verkehr sicherer zu machen, kommt es immer seltener zu Unfällen. Da die Unfälle aber nur die Spitze des metaphorischen Eisbergs darstellen, bleiben viele konfliktreiche Gefahrensituationen unter dem Radar, was eine Beurteilung der aktuellen Probleme des Verkehrssystems entsprechend schwieriger macht. In anderen Bereichen wie etwa der Produktion ist man deshalb dazu übergegangen auch Vorfälle die zu potenziellen Unfällen führen könnten, zu dokumentieren und Maßnahmen zur Vorbeugung zu ergreifen. Die subjektive Wahrnehmung und Beurteilung von Situationen macht es jedoch schwer von außen zu bewerten, welche Situation als sicherheitskritisch und somit relevant erachtet werden kann und welche nicht. Für die Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen bedeutet das, dass ein subjektives Bias bei der Szenariengenerierung mitschwingen kann, der sich auch in einem Trainingsdatensatz niederschlägt. Aus diesem Grund ist eine objektive Beurteilung von Situationen und auch die Nutzung von Realdaten, die wie FOT und NDS zeigen, hilfreich bei der Beurteilung und Ableitung von Handlungsempfehlungen sein können.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde daher ein Verfahren hergeleitet, um aus der Realität zunächst Begegnungen zu erfassen, mit Kontextinformationen anzureichern und anschließend daraus potenzielle Beinahekollisionen automatisiert zu extrahieren. In den Grundlagen in Kapitel 2 wurden für ein Verständnis von Kollisionshergängen zunächst der aktuelle Stand der Technik aufgezeigt, der darin besteht Unfalldatenbanken mit realen Verkehrsunfällen aufzubauen, um aus diesen Rückschlüsse für die Verbesserung der Sicherheit zu ziehen. Anschließend wurde sich der regulatorische Stand zur Vermeidung von Kollisionen im Seeverkehr angeschaut, um die Entstehung von Kollisionen besser zu verstehen. Die verschiedenen existierenden Ship Domain Ansätze haben gezeigt, dass der Anwendungsfall einen großen Einfluss auf die Interpretation von Gefahrensituationen hat. Die Untersuchung der aktuellen Forschungslandschaft in Abschnitt 3.2 hat gezeigt, dass die existierenden Lösungen aufgrund der fehlenden Betrachtung von Kontextinformationen die für eine Situationsbeurteilung essenziell sind, den Handlungsbedarf nicht ausreichend abdecken. Darüber hinaus findet keine Objektivierung und Aufdeckung der Wahrnehmung der involvierten Verkehrsteilnehmenden statt, welche aber durch fahrerreaktionsbasierte Identifikationsansätze mitberücksichtigt werden kann. In Kapitel 4 wurde demnach zunächst eine Möglichkeit zur Instrumentierung und Beobachtung des Seeverkehrs vorgestellt und wie sich die Verkehrsbeobachtungen aufbereiten und die daraus resultierenden Begegnungen für weitere Untersuchungen persistieren lassen. Anschließend wurden verschiedene Artefakte vorgestellt, die in ihrer Gesamtheit zur automatisierten Detektion von Beinahekollisionen eingesetzt werden können. Hier drunter fallen wissenschaftliche Beiträge zur Klassifikation von Begegnungen, ein Ansatz zur Risikobewertung von Begegnungen, sowie ein Verfahren zur Detektion von Manövern und ein Prozess zur Generierung eines Normalmodells zur Beschreibung von Manövrierverhalten in Seegebieten, dem Manövernetz.

Diese Konzepte wurden in Kapitel 5 umgesetzt und in die bestehende maritime Testfeldinfrastruktur eMIR integriert, um für die Entwicklung und Evaluation von Schiffsführungssystemen genutzt werden zu können. Zur Darstellung der Erfüllung der hergeleiteten Anforderungen, die sich aus den Forschungsfragen und Zielen dieser Arbeit ergeben haben, wurden in Kapitel 6 zunächst die einzelnen Artefakte separat evaluiert und anschließend zu einem Gesamtprozess zusammengefügt und einer Expertinbefragung unterzogen. Die Evaluation konnte die generelle Zweckmäßigkeit des hier entwickelten Forschungsgegenstandes zeigen. Es wurde aber auch klar, dass der Prozess zur Detektion von Beinahekollisionen Raum für Optimierungen bietet, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Anschließend wird ein Ausblick der weiteren Ausbaumöglichkeiten und Einsatzgebiete der Beinahekollisionsdatenbank gegeben.

Klassifikation von Begegnungen. Zur Klassifikation von Begegnungen wurden zwei Ansätze vorgestellt. Neben der Einteilung von Begegnungen, basierend auf ihrer Peilung und dem Ausrichtungswinkel, wurde ein Ansatz zur Ähnlichkeitsanalyse von Begegnungen vorgestellt. In der Evaluation wurde gezeigt, dass die gemäß der KVRs existierenden Begegnungsarten nicht eindeutig einer Klasse zugeordnet werden konnten, sondern diese Unterklassen lieferten. Interessant wäre hier weiter zu untersuchen, ob diese Klassen wirklich signifikante Unterschiede aufweisen, oder ob hier die berücksichtigten Faktoren die für den Ähnlichkeitsvergleich herangezogen wurden nicht geeignet sind, oder ob noch andere Faktoren berücksichtigt werden müssen. Auch wäre interessant, Was sich hinter den Klassen verbirgt, die keiner der KVR Begegnungsart zugeordnet werden konnten. Vielleicht würde die feingranularere Aufteilung von Begegnungsarten einen Mehrwert bei der Risikobewertung von Begegnungen liefern. Dies könnte ein Ausgangspunkt für künftige Untersuchungen sein.

Risikobewertung durch kNN Regression. Da durch die Komplexität der berücksichtigten Einflussfaktoren eine herkömmliche Klassifikation nicht möglich war, wurde auf die Berücksichtigung von Nachbarschaftsmengen mittels kNN Regression zurückgegriffen. Dies kann mitunter aber sehr rechenintensiv sein. Ein Startpunkt für weitere Forschung wäre demnach ein Verfahren zu nutzen, dass mit der Klassifikation von Begegnungen mit vielen Einflussfaktoren umgehen kann und ähnlich gut performt wie das hier vorgestellte Konzept.

Manöverbetrachtung. Die Manövererkennung wurde im Rahmen dieser Arbeit vor allem dafür genutzt, Manöver lediglich aufzudecken. Spannend wäre es, wie in der verwandten Arbeiten vom DNV angesprochen, die Deutlichkeit mit der ein Manöver durchgeführt wurde zu bewerten, um dieses im Vergleich mit anderen Manövern zu beurteilen [MeTC16]. Vielleicht gäbe es dadurch die Möglichkeit, Ausweichmanöver von echten Manövern des letzten Augenblicks zu unterscheiden und die Vermutung liegt nahe, dass stärkere Manöver ein Indikator für kritische Situationen sein können. Diese Manöver könnten verglichen mit anderen Manövern durch eine ungewöhnliche und deutliche kinematische Veränderung des Schiffszustandes erkennbar sein. Folgende Hypothesen für ein die Detektion von Manövern des letzten Augenblicks mithilfe von CUSUM könnten untersucht werden:

1. Der Kurvenverlauf bei einem Manöver des letzten Augenblicks ist gestauchter und deutlicher als bei anderen Manövern.
2. Das Verhalten lässt sich in einem kurzen Abstand zum Punkt der dichtesten Annäherung identifizieren (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Auch wäre es Interessant die Time-to-X Metriken aus dem Automobilbereich anzuwenden und zu schauen, ob sich die angesprochenen U-Turns auch in kritischen maritimen Situationen aufdecken und finden lassen.

Manövernetz. Das hier entwickelte Manövernetz konnte wie in der Evaluation gezeigt, bereits für verschiedene, außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Forschungsarbeit liegende Anwendungsfälle, als Normalmodell genutzt werden. Eine interessante Untersuchung wäre es, mithilfe von Ansätzen zur Ähnlichkeitsanalyse von Graphen zu schauen inwieweit sich das Manövernetz und damit der zugrundeliegende Verkehr über die Zeit verändert, um Veränderungen des Fahrverhaltens frühzeitig aufdecken zu können. Die Qualität des Manövernetzes hängt verständlicherweise stark von den zur Generierung verwendeten Trajektorien ab, sowie der Qualität der Trajektorien für welches das Manövernetz erzeugt werden soll. Daher wäre es Interessant inwieweit eine Ähnlichkeitsanalyse der zugrundeliegenden Trajektorien mithilfe von Ansätzen aus der Gestensteuerung, wie etwa dem Dynamic Time Warping, einen Beitrag zur Verbesserung der Manövernetze leisten könnte.

Traffic Situation Data Warehouse. Die aufgezeichneten Begegnungen fanden während der Bearbeitung des Forschungsthemas aufgrund der Integration in das Testfeld eMIR bereits Anwendung für verschiedene andere Forschungsarbeiten. Zum einen wurden die Begegnungen genutzt, um daraus mittels Parametervariationen möglichst unähnliche Situationen zu erzeugen, die sich so in den beobachteten Begegnungen nicht finden ließen. Zum anderen wurde mithilfe der Daten ein Verfahren zur Vorhersage von Schiffsverhalten entwickelt. Diese beiden Anwendungsfälle zeigen abschließend, dass sich der eingangs definierte Zweck der Beinahekollisionsdatenbank, sehr gut in die aktuellen Forschungsarbeiten einfügt und demnach ein Nutzen des hier entwickelten Artefakts ersichtlich ist. Die weitere Verwendung des Datenbestands und der geschaffenen Infrastruktur ermöglichen eine stetige Weiterentwicklung und Optimierung der Forschungsarbeiten und liefert somit den erhofften Beitrag für die Entwicklung, den Betrieb und die Evaluation künftiger hochautomatisierter Systeme. Somit wurde auch der letzte offene Teil der Forschungsfrage zur Nutzung der Datenbank als Ground Truth beantwortet.

Literaturverzeichnis

- [AbNI18] ABBASIFARD, MOHAMMAD REZA ; NADERI, HASSAN ; ISFAHANI ALAMDARI, OMID: Efficient Indexing For Past and Current Position of Moving Objects on Road Networks. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 19 (2018), Nr. 9, S. 2789–2800
- [Abs03] ABS: *Guide for risk evaluations for the classification of marine-related facilities* : American Bureau of Shipping Houston, TX, 2003
- [ABXP08] ANGELOV, PLAMEN ; BOCANIALA, COSMIN DANUT ; XIDEAS, COSTAS ; PATCHETT, CHARLES ; ANSELL, DAREN ; EVERETT, MICHAEL ; LENG, GANG: A Passive Approach to Autonomous Collision Detection and Avoidance. In: *Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (uksim 2008)*. Cambridge, UK : IEEE, 2008 — ISBN 978-0-7695-3114-4, S. 64–69
- [AmHy77] AMUNDSEN, F ; HYDEN, C: The Swedish traffic conflict technique. In: *Proceedings of First Workshop on Traffic Conflicts, Institute of Transport Economics, Oslo, 1977*, S. 1–5
- [AnDe10] ANDERSON, MARTIN ; DENKL, MICHAEL: The Heinrich Accident Triangle—Too Simplistic A Model for HSE Management in the 21st Century? In: *All Days*. Rio de Janeiro, Brazil : SPE, 2010, S. SPE-126661-MS
- [Asse09] ASSENMACHER, S: simTD: field operational test for determining the effectiveness of cooperative systems. In: *Proceedings 16th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2009*
- [BaBl93] BAKKER, G.J. ; BLOM, H.A.P.: Air traffic collision risk modelling. In: *Proceedings of 32nd IEEE Conference on Decision and Control*. San Antonio, TX, USA : IEEE, 1993 — ISBN 978-0-7803-1298-2, S. 1464–1469
- [BaNO93] BASSEVILLE, MICHÈLE ; NIKIFOROV, IGOR V. ; OTHERS: *Detection of abrupt changes: theory and application*. Bd. 104 : Prentice Hall Englewood Cliffs, 1993
- [BaWa03] BAUER, MANFRED ; WANNINGER, LAMBERT: *Vermessung und Ortung mit Satelliten: GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg : Wichmann, 2003 — ISBN 978-3-87907-360-3
- [BDFM12] BENGLER, KLAUS ; DIETMAYER, KLAUS ; FÄRBER, BERTHOLD ; MAURER, MARKUS ; STILLER, CHRISTOPH ; WINNER, HERMANN: Die Zukunft der Fahrerassistenz.
- [BeCu04] BENJAMIN, M.R. ; CURCIO, J.A.: COLREGS-based navigation of autonomous marine vehicles. In: *2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (IEEE Cat. No.04CH37578)*. Sebasco, ME, USA : IEEE, 2004 — ISBN 978-0-7803-8543-6, S. 32–39
- [BéHa09] BÉDARD, YVAN ; HAN, JIAWEI: Fundamentals of Spatial Data Warehousing for Geographic Knowledge Discovery. In: MILLER, H. ; HAN, J. (Hrsg.): *Geographic Data Mining and Knowledge Discovery, Second Edition*. Bd. 20092275 : CRC Press, 2009 — ISBN 978-1-4200-7397-3, S. 45–68

-
- [BeHu16] BERKING, BERNHARD ; HUTH, WERNER: *Navigatorische Schiffsführung, Handbuch Nautik. 2.*, komplett überarbeitete Auflage. Hamburg : Seehafen Verlag, 2016 — ISBN 978-3-96245-048-9
- [Benm15] BENMIMOUN, MOHAMED: *Automatisierte Klassifikation von Fahrsituationen auf Basis von Feldversuchsdaten, Schriftenreihe Automobiltechnik*. Aachen : fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2015 — ISBN 978-3-940374-93-6
- [Benz04] BENZ, STEFAN: *Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil*, Universität Karlsruhe, PhD Thesis, 2004
- [BeRa18] BEINE, MICHAEL ; RASCHE, RAINER: Datenmanagement für das szenariobasierte Testen. In: *ATZextra* Bd. 23 (2018), S. 20–25
- [BMRM17] BAGSCHICK, GERRIT ; MENZEL, TILL ; RESCHKA, ANDREAS ; MAURER, MARKUS: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen.
- [Borc14] BORCHERT, HEIKO: Maritime Sicherheit in Gefahr: Entwicklungstrends und Handlungsfelder. In: JOPP, H. D. (Hrsg.): *Maritime Sicherheit im 21. Jahrhundert* : Nomos, 2014 — ISBN 978-3-8452-5975-8, S. 51–74
- [Bosc19] BOSCH: 20 Jahre GIDAS –Erkenntnisse und Erfahrungen aus fahrzeugtechnischer Sicht.
- [Bott02] BOTTS, MIKE: *Sensor Model Language (SensorML) for Insitu and Remote Sensors*. OGC, 2002
- [BoWN14] BOLE, A. G. ; WALL, ALAN ; NORRIS, ANDY: *Radar and ARPA manual: radar, AIS and target tracking for marine radar users*. 3rd edition. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014 — ISBN 978-0-08-097752-2
- [BPRD08] BOTTS, MIKE ; PERCIVALL, GEORGE ; REED, CARL ; DAVIDSON, JOHN: OGC@ Sensor Web Enablement: Overview and High Level Architecture. In: NITTEL, S. ; LABRINIDIS, A. ; STEFANIDIS, A. (Hrsg.): *GeoSensor Networks, Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 4540. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008 — ISBN 978-3-540-79995-5, S. 175–190
- [BrHa17] BRINKMANN, MARIUS ; HAHN, AXEL: Testbed architecture for maritime cyber physical systems. In: *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Emden : IEEE, 2017 — ISBN 978-1-5386-0837-1, S. 923–928
- [Brin13] BRINKHOFF, THOMAS: *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis: Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Wichmann, 2013 — ISBN 978-3-87907-513-3
- [Brin17] BRINKMANN, A.; BJØRN ÅGE HJØLLO, M.; HAHN: Physical Testbed for Highly Automated and Autonomous Vessels. In: BERTRAM, V. (Hrsg.): *16th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries COMPIT 2017*: Technische

- Universität Hamburg-Harburg Industries, 2017 — ISBN 978-3-89220-701-6
- [Brin18] BRINKMANN, MARIUS: *Physikalische Testfeld-Architektur für die Unterstützung der Entwicklung von automatisierten Schiffsführungssystemen*, Carl von Ossietzky Universität, Fakultät II für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, Department für Informatik, PhD Thesis, 2018
- [Brow02] BROWN, A.J.: Collision scenarios and probabilistic collision damage. In: *Marine Structures* Bd. 15 (2002), Nr. 4–5, S. 335–364
- [Bsu00a] BSU: *Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung - Geschichte der deutschen Seeunfalluntersuchung*. URL http://www.bsu-bund.de/DE/dieBSU/Geschichte/Geschichte_node.html. - abgerufen am 2017-05-26
- [Bsu00b] BSU: *Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung - BSU heute*. URL http://www.bsu-bund.de/DE/dieBSU/BSUheute/BSUheute_node.html. - abgerufen am 2017-05-26
- [BuBC88] BURNS, R.S. ; BLACKWELL, G. ; CALVERT, S.: An automatic guidance, navigation and collision avoidance system for ships at sea. In: *IEE Colloquium on Control in the Marine Industry*, 1988, S. 3/1-3/3
- [BuMo09] BURG, H. ; MOSER, A. (Hrsg.): *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation ; mit 152 Tabellen, Praxis ATZ/MTZ-Fachbuch*. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009 — ISBN 978-3-8348-0546-1
- [Bund17] Studie über Annäherungen und Kollisionen von Luftfahrzeugen im deutschen Luftraum 2010 - 2015, BUNDESSTELLE FÜR FLUGUNFALLUNTERSUCHUNGEN (Hrsg.).
- [Bund20] BUNDESSTELLE FÜR SEEUNFALLUNTERSUCHUNGEN: Jahresbericht 2019.
- [Bund22] BUNDESSTELLE FÜR SEEUNFALLUNTERSUCHUNGEN: Jahresbericht 2021.
- [Bund98] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: Seeschiffverkehrsstraßen-Ordnung (1971), 1998
- [BuNN15] BUZA, KRISZTIAN ; NANOPOULOS, ALEXANDROS ; NAGY, GÁBOR: Nearest neighbor regression in the presence of bad hubs. In: *Knowledge-Based Systems* Bd. 86 (2015), S. 250–260
- [ChCG00] CHERNIAVSKY, JOHN C ; CONSTABLE, ROBERT ; GALLIER, JEAN: *Interpolating Cubic Splines*. Boston : Birkhäuser Boston, 2000 — ISBN 978-1-4612-1320-8
- [CiRe87] CIGLER, JOHANN ; REICHEL, HANS-CHRISTIAN: *Topologie: eine Grundvorlesung, BI-Hochschultaschenbücher*. 2., überarb. Aufl. Mannheim : Bibliograph. Institut, 1987 — ISBN 978-3-411-05121-2
- [Clef15] CLEFF, THOMAS: *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2015 — ISBN 978-3-8349-4747-5
- [CoDö13] COTTIN, CLAUDIA ; DÖHLER, SEBASTIAN: *Risikoanalyse*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 — ISBN 978-3-658-00829-1

-
- [Cold83] COLDWELL, T. G.: Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. In: *Journal of Navigation* Bd. 36 (1983), Nr. 3, S. 430–444
- [Cox11] COX, SIMON JONATHAN DAVID: *ISO 19156:2011 - Geographic information -- Observations and measurements* : International Organization for Standardization, 2011
- [DaDS82] DAVIS, P. V. ; DOVE, M. J. ; STOCKEL, C. T.: A Computer Simulation of Multi-Ship Encounters. In: *Journal of Navigation* Bd. 35 (1982), Nr. 2, S. 347–352
- [DaGa18] DAMM, WERNER ; GALBAS, ROLAND: Exploiting learning and scenario-based specification languages for the verification and validation of highly automated driving. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for AI in Autonomous Systems - SEFAIS '18*. Gothenburg, Sweden : ACM Press, 2018 — ISBN 978-1-4503-5739-5, S. 39–46
- [DaJo03] DASU, TAMRAPARNI ; JOHNSON, THEODORE: *Exploratory data mining and data cleaning, Wiley series in probability and statistics*. New York : Wiley-Interscience, 2003 — ISBN 978-0-471-26851-2
- [DaKa17] DAMM, WERNER ; KALMAR, RALF: Autonome Systeme: Fähigkeiten und Anforderungen. In: *Informatik-Spektrum* Bd. 40 (2017), Nr. 5, S. 400–408
- [DaSp06] DAMIANI, MARIA LUISA ; SPACCAPIETRA, STEFANO: Spatial Data Warehouse Modelling. In: *Processing and Managing Complex Data for Decision Support* (2006)
- [DeCh10] DEBNATH, ASHIM KUMAR ; CHIN, HOONG CHOR: Navigational Traffic Conflict Technique: A Proactive Approach to Quantitative Measurement of Collision Risks in Port Waters. In: *Journal of Navigation* Bd. 63 (2010), Nr. 01, S. 137
- [DiIm16] DINH, GIA HUY ; IM, NAM-KYUN: The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area. In: *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* Bd. 4 (2016), S. 97–108
- [DKNP06] DINGUS, THOMAS A. ; KLAUER, S. G. ; NEALE, VICKI L. (VICKI LEWIS) ; PETERSEN, A. ; LEE, S. E. ; SUDWEEKS, J. ; PEREZ, M. A. ; HANKEY, J. ; U. A.: The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment. In: VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY. TRANSPORTATION INSTITUTE (Hrsg.) (2006), Nr. DOT-HS-810-593
- [Dnvg18] DNV GL AS: *Autonomous and remotely operated ships* (Class Guideline Nr. DNVGL-CG-0264), 2018
- [DoLW12] DODGE, SOMAYEH ; LAUBE, PATRICK ; WEIBEL, ROBERT: Movement similarity assessment using symbolic representation of trajectories. In: *International Journal of Geographical Information Science* Bd. 26 (2012), Nr. 9, S. 1563–1588
- [Dong82] DONGES, EDMUND: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *AUTOMOB-IND* Bd. 27 (1982), Nr. 2

- [DoNR09] DOW, JOHN M. ; NEILAN, R. E. ; RIZOS, C.: The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. In: *Journal of Geodesy* Bd. 83 (2009), Nr. 3–4, S. 191–198
- [DoPe73] DOUGLAS, DAVID H ; PEUCKER, THOMAS K: ALGORITHMS FOR THE REDUCTION OF THE NUMBER OF POINTS REQUIRED TO REPRESENT A DIGITIZED LINE OR ITS CARICATURE. In: *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* Bd. 10 (1973), Nr. 2, S. 112–122
- [Drös99] DRÖSCHEL, WOLFGANG: *Das V-Modell 97.*: De Gruyter, 1999 — ISBN 978-3-486-80026-5
- [DYGL15] DING, ZHIMING ; YANG, BIN ; GUTING, RALF HARTMUT ; LI, YAGUANG: Network-Matched Trajectory-Based Moving-Object Database: Models and Applications. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 16 (2015), Nr. 4, S. 1918–1928
- [EGSV99] ERWIG, MARTIN ; GÜTING, RALF HARTMUT ; SCHNEIDER, MARKUS ; VAZIRGIANNIS, MICHALIS: Spatio-Temporal Data Types: An Approach to Modeling and Querying Moving Objects in Databases. In: *GeoInformatica* Bd. 3 (1999), Nr. 3, S. 269–296
- [EKSX96] ESTER, MARTIN ; KRIEGEL, HANS-PETER ; SANDER, JÖRG ; XU, XIAOWEI ; OTHERS: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: *Kdd.* Bd. 96, 1996, S. 226–231
- [Emsa16] EMSA: Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2016.
- [Emsa17] EMSA: Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2017.
- [Emsa19] EMSA: Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2018.
- [Epp17] EPP, ANDRÉ: Das ökosystemische Entwicklungsmodell als theoretisches Sensibilisierungs- und Betrachtungsraster für empirische Phänomene. In: *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research* Bd. Vol 19, Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research (2017), S. No 1 (2018)
- [ErHa08] ERBSMEHL, CHRISTIAN ; HANNAWALD, L: Simulation realer Unfälle in laufszenarien der German In-Depth Accident Study (GIDAS). Erstellung und Nutzen von "pre crash scatter plots". In: *VDI-Berichte* (2008), Nr. 2048
- [ESWH05] ESTEBAN, JAIME ; STARR, ANDREW ; WILLETTS, ROBERT ; HANNAH, PAUL ; BRYANSTON-CROSS, PETER: A Review of data fusion models and architectures: towards engineering guidelines. In: *Neural Computing and Applications* Bd. 14 (2005), Nr. 4, S. 273–281
- [Euro09] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: Directive 2009/18/EC.
- [Euro17] EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY: *Marine Casualties and Incidents - Summary Overview 2011-2015, 2017*
- [Fark11] FARKISCH, KIUMARS: *Data-Warehouse-Systeme kompakt, Xpert.press.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011 — ISBN 978-3-642-21532-2

-
- [FeJa12] FELSKI, ANDRZEJ ; JASKÓLSKI, KRZYSZTOF: Analysis of AIS availability. In: *European Journal of Navigation* Bd. 10 (2012), Nr. 1, S. 39–43
- [FiRa11] FISHER, KENNETH A ; RAQUET, JOHN F: *Precision position, navigation, and timing without the global positioning system* : AIR UNIV MAXWELL AFB AL AIR FORCE RESEARCH INST, 2011
- [Fotn16a] FOT-NET DATA CONSORTIUM: FESTA Handbook - Version 6.
- [Fotn16b] FOT-NET DATA CONSORTIUM: Annex C to FESTA Handbook - Version 5.
- [FrRE08] FRIIS-HANSEN, PETER ; RAVN, ES ; ENGBERG, PC: Basic modelling principles for prediction of collision and grounding frequencies. In: *IWRAP Mark II Working Document* (2008), S. 1–59
- [FuSh71] FUJII, YAHEI ; SHIOBARA, REIJIRO: The analysis of traffic accidents. In: *The Journal of Navigation* Bd. 24 (1971), Nr. 4, S. 534–543
- [FWSM20] FILIPIAK, DOMINIK ; WĘCEL, KRZYSZTOF ; STRÓŻYNA, MILENA ; MICHALAK, MICHAŁ ; ABRAMOWICZ, WITOLD: Extracting Maritime Traffic Networks from AIS Data Using Evolutionary Algorithm. In: *Business & Information Systems Engineering* Bd. 62 (2020), Nr. 5, S. 435–450
- [Gese00] Sicherheits-Untersuchungs-Gesetz – SUG — Gesetz zur Verbesserung der Sicherheit der Seefahrt durch die Untersuchung von Seeunfällen und anderen Vorkommnissen
- [Gese98] Flugunfall-Untersuchungs- Gesetz - FIUUG — Gesetz über die Untersuchung von Unfällen und Störungen bei dem Betrieb ziviler Luftfahrzeuge, 1998
- [Gida19] GIDAS: *GIDAS Fallbeispiel*. URL <https://www.gidas.org/gidas-fallstudien/>. — Fallbeispiel
- [GKHD10] GUO, FENG ; KLAUER, SHEILA G. ; HANKEY, JONATHAN M. ; DINGUS, THOMAS A.: Near Crashes as Crash Surrogate for Naturalistic Driving Studies. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Bd. 2147 (2010), Nr. 1, S. 66–74
- [GMLK12] GOERLANDT, FLORIS ; MONTEWKA, JAKUB ; LAMMI, HEIKKI ; KUJALA, PENTTI: Analysis of near collisions in the Gulf of Finland. In: *Advances in safety, reliability and risk management proceedings of the European safety and reliability conference, ESREL 2011, Troyes, France, 18-22 september 2011*. London : Taylor & Francis, 2012 — ISBN 978-0-415-68379-1, S. 2880–2886
- [GoKu11] GOERLANDT, FLORIS ; KUJALA, PENTTI: Traffic simulation based ship collision probability modeling. In: *Reliability Engineering & System Safety* Bd. 96 (2011), Nr. 1, S. 91–107
- [Gold08] GOLDBECK-LÖWE, HARALD: Radarnavigation in der Seeschifffahrt. In: WOLFSCHMIDT, G. (Hrsg.): „*Navigare necesse est*“: *Geschichte der Navigation: Begleitbuch zur Ausstellung in Hamburg und Nürnberg, Nuncius Hamburgensis*. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2008 — ISBN 978-3-8370-3260-4
- [Good75] GOODWIN, ELISABETH M: A statistical study of ship domains. In: *The Journal of navigation* Bd. 28 (1975), Nr. 3, S. 328–344

- [GüSc05] GÜTING, RALF HARTMUT ; SCHNEIDER, MARKUS: *Moving objects databases, Morgan Kaufmann series in data management systems*. Amsterdam : Boston : Morgan Kaufmann, 2005 — ISBN 978-0-12-088799-6
- [GYHM11] GHIL, M. ; YIOU, P. ; HALLEGATTE, S. ; MALAMUD, B. D. ; NAVEAU, P. ; SOLOVIEV, A. ; FRIEDERICHS, P. ; KEILIS-BOROK, V. ; U. A.: Extreme events: dynamics, statistics and prediction. In: *Nonlinear Processes in Geophysics* Bd. 18 (2011), Nr. 3, S. 295–350
- [HaLl97] HALL, D.L. ; LLINAS, J.: An introduction to multisensor data fusion. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 85 (1997), Nr. 1, S. 6–23
- [Hayw72] HAYWARD, JOHN C: Near miss determination through use of a scale of danger (1972)
- [Hech99] HECHT, H. (Hrsg.): *Die elektronische Seekarte: Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen eines neuen Navigationssystems*. Heidelberg : Wichmann, 1999 — ISBN 978-3-87907-303-0
- [HeOt41] HEINRICH, HERBERT WILLIAM ; OTHERS: Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach. In: *Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach*. (1941), Nr. Second Edition
- [HiBa97] HILGERT, HELMUT ; BALDAUF, MICHAEL: A common risk model for the assessment of encounter situations on board ships. In: *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* Bd. 49 (1997), Nr. 4, S. 531–542
- [Hill12] HILLENBRAND, MARTIN: *Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen, Steinbuch series on advances in information technology*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012 — ISBN 978-3-86644-803-2
- [Hist00] *History of IMO*. URL <http://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>. - abgerufen am 2017-05-22
- [HKYF16] HUANG, WULING ; KUNFENG WANG ; YISHENG LV ; FENGHUA ZHU: Autonomous vehicles testing methods review. In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Rio de Janeiro, Brazil : IEEE, 2016 — ISBN 978-1-5090-1889-5, S. 163–168
- [Holt01] HOLTHUIS, JAN: *Der Aufbau von Data Warehouse-Systemen: Konzeption, Datenmodellierung, Vorgehen, Gabler-Edition Wissenschaft. 2., überarb. und aktualisierte Aufl., Nachdr.* Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl. [u.a.], 2001 — ISBN 978-3-8244-6959-8
- [Huan14] HUANG, YUAN-KO: Indexing and querying moving objects with uncertain speed and direction in spatiotemporal databases. In: *Journal of Geographical Systems* Bd. 16 (2014), Nr. 2, S. 139–160
- [HuBe07] HUGEMANN, W. ; BENECKE, M. (Hrsg.): *Unfallrekonstruktion*. Münster : Verl. Autorenteam, 2007 — ISBN 978-3-00-019419-1
- [HydÉ87] HYDÉN, CHRISTER: The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. In: *Bulletin Lund Institute of Technology, Department* (1987), Nr. 70

-
- [HyLi84] HYDÉN, C. ; LINDERHOLM, L.: The Swedish Traffic-Conflicts Technique. In: ASMUSSEN, E. (Hrsg.): *International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1984 — ISBN 978-3-642-82111-0, S. 133–139
- [Iala16] IALA: *VTS Manual*. 6. Aufl. Saint Germain en Laye : International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, 2016
- [Iho10] IHO: *S-100 - Universal Hydrographic Data Model - Edition 1.0.0* (IHO Recommendation). Monaco : International Hydrographic Organization, 2010
- [Ihou17] IHO UNIVERSAL: Much more than just Nautical Charts.
- [Imo06] IMO: Amendments To The International Convention For The Safety Of Life At Sea, 1974, As Amended.
- [Imo07] IMO: *MSC 83/28/Add.3 Annex 30 - Resolution MSC.252(83) - Adoption of the revised performance standards for integrated navigation systems.pdf*: International Maritime Organization, 2007. — 00000
- [Imo08] IMO: *Guidance on Near-Miss Reporting*, 2008
- [Inma15] INMARSAT: FleetBroadband coverage.
- [Inst11] INSTRUMENTS, MTL: An introduction to Functional Safety and IEC 61508. In: *AN9025*, Available at: www.mtl-inst.com/product/mtl_safety_related_sr_series_isolators (2011)
- [Inte00a] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO): *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974*. URL [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx). - abgerufen am 2017-05-22
- [Inte00b] INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION: *About IHO*. URL https://www.iho.int/srv1/index.php?option=com_content&view=article&id=298&Itemid=297&lang=en. - abgerufen am 2017-07-06
- [Inte04] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU): Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service.
- [Inte05] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 17894:2005 - Ships and marine technology - Computer applications - General Principles for the Development and Use of Programmable Electronic Systems in Marine Applications.
- [Inte09] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 31000:2009 - Risk management -- Principles and guidelines.
- [Inte12] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU): Characteristics of a digital system, named Navigational Data for broadcasting maritime safety and security related information from shore-to-ship in the 500 kHz band.
- [Inte16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO/IEC 13249-3:2016 Information technology -- Database languages -- SQL multimedia and application packages -- Part 3: Spatial.

- [Inte77] Anlage zu § 1 der Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See (Kollisionsverhütungsregeln - KVR) — Internationale Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See, 1977
- [Inte98a] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO): ANNEX 12 - RESOLUTION MSC.74(69) - ADOPTION OF NEW AND AMENDED PERFORMANCE STANDARDS.
- [Inte98b] INTERNATIONAL CHAMBER OF SHIPPING (ICS): *Bridge Procedure Guide*. 3. Aufl., 1998
- [Iper15] VAN IPEREN, ERWIN: Classifying Ship Encounters to Monitor Traffic Safety on the North Sea from AIS Data. In: *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* Bd. 9 (2015), Nr. 1, S. 51–58
- [JBKW18] JUNIETZ, PHILIPP ; BONAKDAR, FARID ; KLAMANN, BJORN ; WINNER, HERMANN: Criticality Metric for the Safety Validation of Automated Driving using Model Predictive Trajectory Optimization. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Maui, HI : IEEE, 2018 — ISBN 978-1-72810-321-1, S. 60–65
- [JiZF93] JINGSONG, ZHAO ; ZHAOLIN, WU ; FENGCHEN, WANG: Comments on ship domains. In: *The Journal of Navigation* Bd. 46 (1993), Nr. 3, S. 422–436
- [JoOl13] JONAS, MATHIAS ; OLTMANN, J.-H.: IMO e-Navigation Implementation Strategy – Challenge for Data Modelling. In: *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* Bd. 7 (2013), Nr. 2, S. 45–49. — 00000
- [Jopp14] JOPP, HEINZ DIETER: Einführung in die Problemstellung maritimer Sicherheit. In: JOPP, H. D. (Hrsg.): *Maritime Sicherheit im 21. Jahrhundert* : Nomos, 2014 — ISBN 978-3-8452-5975-8, S. 11–23
- [Jung00] JUNG, R. (Hrsg.): *Data-Warehousing-Strategie: Erfahrungen, Methoden, Visionen, Business-Engineering*. Berlin Heidelberg : Springer, 2000 — ISBN 978-3-540-67308-8
- [Juni19] JUNIETZ, PHILIPP MATTHIAS: Microscopic and Macroscopic Risk Metrics for the Safety Validation of Automated Driving, UNSPECIFIED (2019)
- [JuSW17] JUNIETZ, PHILIPP ; SCHNEIDER, JAN ; WINNER, HERMANN: Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien. In: . Walting, Germany, 2017, S. 149–160
- [KaSt15] KAZIMIERSKI, WITOLD ; STATECZNY, ANDRZEJ: Radar and Automatic Identification System Track Fusion in an Electronic Chart Display and Information System. In: *Journal of Navigation* Bd. 68 (2015), Nr. 06, S. 1141–1154
- [KHDW22] KIM, GENE ; HUMBLE, JEZ ; DEBOIS, PATRICK ; WILLIS, JOHN ; FORSGREN, NICOLE ; DEMMIG, T. (Übers.): *Das DevOps-Handbuch: Teams, Tools und Infrastrukturen erfolgreich umgestalten*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Heidelberg : O'Reilly, 2022 — ISBN 978-3-96009-199-8

-
- [Kiri02] KIRIANAKI, NIKOLAĬ VLADIMIROVICH: *Data acquisition and signal processing for smart sensors*. New York : J. Wiley, 2002 — ISBN 978-0-470-85236-1
- [KiRo02] KIMBALL, RALPH ; ROSS, MARGY: *The data warehouse toolkit: the complete guide to dimensional modeling*. 2nd ed. New York : Wiley, 2002 — ISBN 978-0-471-20024-6
- [Klau99] KLAUS, FERDINAND: Einführung in Techniken und Methoden der Multisensor-Datenfusion (1999)
- [Komp19] KOMPAS, K.: GIDAS QUO VADIS. Unfall- und Verkehrsforschung der Zukunft.
- [KoSo98] KOTONYA, GERALD ; SOMMERVILLE, IAN: *Requirements engineering: processes and techniques, Worldwide series in computer science*. Chichester ; New York : J. Wiley, 1998 — ISBN 978-0-471-97208-2
- [KWZH14] KUWATA, YOSHIKI ; WOLF, MICHAEL T ; ZARZHITSKY, DIMITRI ; HUNTSBERGER, TERRANCE L: Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* Bd. 39 (2014), Nr. 1, S. 110–119
- [KYCR21] KIM, HYO-GON ; YUN, SUNG-JO ; CHOI, YOUNG-HO ; RYU, JAE-KWAN ; SUH, JIN-HO: Collision Avoidance Algorithm Based on COLREGs for Unmanned Surface Vehicle. In: *Journal of Marine Science and Engineering* Bd. 9 (2021), Nr. 8, S. 863
- [LaGS18] LAUX, HELMUT ; GILLENKIRCH, ROBERT M. ; SCHENK-MATHES, HEIKE Y.: *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-57817-9
- [LaHa17] LAMM, ARNE ; HAHN, AXEL: Detecting maneuvers in maritime observation data with CUSUM. In: *2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*. Bilbao : IEEE, 2017 — ISBN 978-1-5386-4662-5, S. 122–127
- [LaHa19] LAMM, ARNE ; HAHN, AXEL: Statistical Maneuver Net Generation for Anomaly Detection in Navigational Waterways. In: *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Paris, France : IEEE, 2019 — ISBN 978-1-72810-521-5, S. 1438–1443
- [Lang13] LANGE, NORBERT DE: *Geoinformatik: in Theorie und Praxis, Lehrbuch*. 3., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Berlin : Springer Spektrum, 2013 — ISBN 978-3-642-34807-5
- [LeSj10] LEE, JANETTE ; SOUTH, ANDY B. ; JENNINGS, SIMON: Developing reliable, repeatable, and accessible methods to provide high-resolution estimates of fishing-effort distributions from vessel monitoring system (VMS) data. In: *ICES Journal of Marine Science* Bd. 67 (2010), Nr. 6, S. 1260–1271
- [Leve65] LEVENSHTAIN, VLADIMIR I.: Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In: *Soviet physics. Doklady* Bd. 10 (1965), S. 707–710

- [LiHu06] LIN, BIN ; HUANG, CHIH-HAO: Comparison between ARPA radar and AIS characteristics for vessel traffic services. In: *Journal of marine science and technology* Bd. 14 (2006), Nr. 3, S. 182–189
- [LLH09] LLINAS, JAMES ; LIGGINS, MARTIN E. ; HALL, DAVID L.: *Handbook of Multisensor data fusion: theory and practice* : Taylor & Francis, 2009 — ISBN 1-4200-5308-6
- [Losh01] LOSHIN, DAVID: *Enterprise knowledge management: the data quality approach*. San Diego : Morgan Kaufmann, 2001 — ISBN 978-0-12-455840-3
- [LRWC19] LÁZARO, FRANCISCO ; RAULEFS, RONALD ; WANG, WEI ; CLAZZER, FEDERICO ; PLASS, SIMON: VHF Data Exchange System (VDES): an enabling technology for maritime communications. In: *CEAS Space Journal* Bd. 11 (2019), Nr. 1, S. 55–63
- [LuWa18] LUPTON, BEN ; WARREN, RICHARD: Managing Without Blame? Insights from the Philosophy of Blame. In: *Journal of Business Ethics* Bd. 152 (2018), Nr. 1, S. 41–52
- [MaJu00] MARDIA, K. V. ; JUPP, PETER E.: *Directional statistics, Wiley series in probability and statistics*. Chichester ; New York : J. Wiley, 2000 — ISBN 978-0-471-95333-3
- [MaNK14] MASCARO, STEVEN ; NICHOLSO, ANN E. ; KORB, KEVIN B.: Anomaly detection in vessel tracks using Bayesian networks. In: *International Journal of Approximate Reasoning* Bd. 55 (2014), Nr. 1, S. 84–98
- [MaOc03] MAJUMDAR, ARNAB ; OCHIENG, WASHINGTON: A Trend Analysis of Air Traffic Occurrences in the UK Airspace. In: *Journal of Navigation* Bd. 56 (2003), Nr. 2, S. 211–229
- [MaSc16] MAZZEGA, JENS ; SCHÖNER, HANS-PETER: Wie PEGASUS die Lücke im Bereich Testen und Freigabe von automatisierten Fahrzeugen schließt.
- [MDJS20] MUNIM, ZIAUL HAQUE ; DUSHENKO, MARIIA ; JIMENEZ, VERONICA JARAMILLO ; SHAKIL, MOHAMMAD HASSAN ; IMSET, MARIUS: Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions. In: *Maritime Policy & Management* Bd. 47 (2020), Nr. 5, S. 577–597
- [MeDX14] MENG, XIAOFENG ; DING, ZHIMING ; XU, JIAJIE: *Moving objects management: models, techniques and applications*. 2nd edition. Beijing : Beijing : Tsinghua University Press, 2014 — ISBN 3-642-38275-4
- [MeTC16] MESTL, THOMAS ; TALLAKSTAD, KEN TORE ; CASTBERG, R.: Identifying and Analyzing Safety Critical Maneuvers from High Resolution AIS Data. In: *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* Bd. 10 (2016), Nr. 1, S. 69–77
- [MGLW15] MAURER, M. ; GERDES, J. C. ; LENZ, B. ; WINNER, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015 — ISBN 978-3-662-45853-2
- [MHKM10] MONTEWKA, JAKUB ; HINZ, TOMASZ ; KUJALA, PENTTI ; MATUSIAK, JERZY: Probability modelling of vessel collisions. In: *Reliability Engineering & System Safety* Bd. 95 (2010), Nr. 5, S. 573–589

-
- [MoBa16a] MORIO, J. ; BALEDENT, M.: The formalism of rare event probability estimation in complex systems. In: *Estimation of Rare Event Probabilities in Complex Aerospace and Other Systems* : Elsevier, 2016 — ISBN 978-0-08-100091-5, S. 33–38
- [MoBa16b] MORIO, JÉRÔME ; BALEDENT, MATHIEU: *Estimation of rare event probabilities in complex aerospace and other systems: a practical approach*, Woodhead Publishing in mechanical engineering. Amsterdam Boston Cambridge : Elsevier/Woodhead Publishing, 2016 — ISBN 978-0-08-100091-5
- [MoGK12] MONTEWKA, JAKUB ; GOERLANDT, FLORIS ; KUJALA, PENTTI: Determination of collision criteria and causation factors appropriate to a model for estimating the probability of maritime accidents. In: *Ocean Engineering* Bd. 40 (2012), S. 50–61
- [MSME15] MAGDY, NEHAL ; SAKR, MAHMOUD A. ; MOSTAFA, TAMER ; EL-BAHNASY, KHALED: Review on trajectory similarity measures. In: *2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS)*. Cairo, Abbassia, Egypt : IEEE, 2015 — ISBN 978-1-5090-1949-6, S. 613–619
- [NEEH12] NARINS, MITCH ; ELDREDGE, LEO ; ENGE, PER ; HARRISON, MIKE ; KENAGY, RANDY ; LO, SHERMAN: Alternative Position, Navigation, and Timing—The Need for Robust Radionavigation. In: *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering* : The National Academies Press, 2012, S. 119–36
- [NKKD02] NEALE, V.L. ; KLAUER, S.G. ; KNIPLING, R.R. ; DINGUS, T.A. ; HOLBROOK, G.T. ; PETERSEN, A.: *The 100 Car Naturalistic Driving Study, Phase I - Experimental Design* (Interim Report Nr. DOT HS 809 536). Washington D.C. : National Highway Traffic Safety Admin. (NHTSA), 2002
- [NUWW18] NAFZGER, HANS-JÖRG ; UNRUH, WERNER VON ; WANDEL, RALF ; WICHMANN, GÜNTER ; BENEDICT, K. ; WAND, C. (Hrsg.): *Technische und betriebliche Schiffsführung, Handbuch Nautik*. 2. Auflage. Bingen Hamburg : PMC Media House GmbH, 2018 — ISBN 978-3-96245-157-8
- [NWBB21] NEUROHR, CHRISTIAN ; WESTHOFEN, LUKAS ; BUTZ, MARTIN ; BOLLMANN, MARTIN HERBERT ; EBERLE, ULRICH ; GALBAS, ROLAND: Criticality Analysis for the Verification and Validation of Automated Vehicles. In: *IEEE Access* Bd. 9 (2021), S. 18016–18041
- [Oltm15] OLTMANN, JAN-HENDRIK: ACCSEAS North Sea Region Route Topology Model (NSR-RTM).
- [Outl16] *Outlier analysis*. 2nd edition. New York, NY : Springer Science+Business Media, 2016 — ISBN 978-3-319-47577-6
- [OvBa16] OVERSCHMIDT, HEINZ ; BARK, AXEL: *Sportbootführerschein See: mit amtlichem Fragenkatalog*. 34., aktualisierte Auflage. Bielefeld : Delius Klasing Verlag, 2016 — ISBN 978-3-7688-3484-1

- [Page57] PAGE, E. S.: On problems in which a change in a parameter occurs at an unknown point. In: *Biometrika* Bd. 44 (1957), Nr. 1–2, S. 248–252
- [PaVB13] PALLOTTA, GIULIANA ; VESPE, MICHELE ; BRYAN, KARNA: Vessel Pattern Knowledge Discovery from AIS Data: A Framework for Anomaly Detection and Route Prediction. In: *Entropy* Bd. 15 (2013), Nr. 12, S. 2218–2245
- [PCBK09] PEREZ, HEATHER M. ; CHANG, ROGER ; BILLINGS, RICHARD ; KOSUB, THEODORE L.: Automatic identification systems (AIS) data use in marine vessel emission estimation. In: *18th Annual International Emission Inventory Conference*. Bd. 14, 2009, S. e17
- [PeSo11] PERERA, LOKUKALUGE PW ; SOARES, C GUEDES M: Detections of potential collision situations by relative motions of vessels under parameter uncertainties. In: *Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. Bd. 705 : ROUTLEDGE in association with GSE Research, 2011, S. 705–713
- [Pfos02] PFOSER, DIETER: Indexing the Trajectories of Moving Objects. In: *IEEE Data Eng. Bull.* Bd. 25 (2002), Nr. 2, S. 3–9
- [PHLS00] PRANDINI, M. ; HU, J. ; LYGEROS, J. ; SASTRY, S.: A probabilistic approach to aircraft conflict detection. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 1 (2000), Nr. 4, S. 199–220
- [Piet08] PIETRZYKOWSKI, ZBIGNIEW: Ship's Fuzzy Domain – a Criterion for Navigational Safety in Narrow Fairways. In: *Journal of Navigation* Bd. 61 (2008), Nr. 03, S. 499–514
- [PüZK17] PÜTZ, ANDREAS ; ZLOCKI, ADRIAN ; KÜFEN, JÖRG: Database Approach for the Sign-Off Process of Highly Automated Vehicle. In: *Proceedings of 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. Detroit, 2017
- [PZBE17] PÜTZ, ANDREAS ; ZLOCKI, ADRIAN ; BOCK, JULIAN ; ECKSTEIN, LUTZ: System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios. In: . Strasbourg, 2017
- [QTZS10] QUINLAN, M ; TSZ-CHIU AU ; ZHU, J ; STIURCA, N ; STONE, P: Bringing simulation to life: A mixed reality autonomous intersection. In: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Taipei : IEEE, 2010 — ISBN 978-1-4244-6674-0, S. 6083–6088
- [Reas90] REASON, J.: The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* Bd. 327 (1990), Nr. 1241, S. 475–484
- [RiWo19] RICHTER, JAN-ARWED ; WOLF, CHRISTIAN: *JACDEC - Your Center for Aviation Safety Information*. URL <https://www2.jacdec.de/about-jacdec/>. — About JACDEC
- [Roth00] ROTHBLUM, ANITA M: Human error and marine safety. In: *National Safety Council Congress and Expo, Orlando, FL, 2000*, S. 7

-
- [Roth02] ROTHBLUM, ANITA M: Keys to successful incident inquiry. In: *Human Factors in Incident Investigation and Analysis, 2nd International Workshop on Human Factors in Offshore Operations (HFW2002)*, Houston, TX, 2002
- [RüLH19] RÜSSMEIER, N ; LAMM, A ; HAHN, A: A generic testbed for simulation and physical-based testing of maritime cyber-physical system of systems. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 1357 (2019), S. 012025
- [RWGT12] REGAN, MA ; WILLIAMSON, A ; GRZEBIETA, R ; TAO, L: Naturalistic driving studies: literature review and planning for the Australian naturalistic driving study. In: *Australasian college of road safety conference 2012, Sydney, New South Wales, Australia*, 2012
- [ScOn13] SCHUTT, RACHEL ; O'NEIL, CATHY: *Doing data science*, 2013 — ISBN 978-1-4493-6389-5
- [ScZu16] SCHÄUFFELE, JÖRG ; ZURAWKA, THOMAS: *Automotive Software Engineering*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016 — ISBN 978-3-658-11814-3
- [ShKi02] SHORROCK, STEVEN T. ; KIRWAN, BARRY: Development and application of a human error identification tool for air traffic control. In: *Applied Ergonomics* Bd. 33 (2002), Nr. 4, S. 319–336
- [ShLa90] SHETH, AMIT P ; LARSON, JAMES A: Federated database systems for managing distributed, heterogeneous, and autonomous databases. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* Bd. 22, ACM New York, NY, USA (1990), Nr. 3, S. 183–236
- [SLFH19] STEIDEL, MATTHIAS ; LAMM, ARNE ; FEUERSTACK, SEBASTIAN ; HAHN, AXEL: Correcting the Destination Information in Automatic Identification System Messages. In: ABRAMOWICZ, W. ; CORCHUELO, R. (Hrsg.): *Business Information Systems Workshops*. Bd. 373. Cham : Springer International Publishing, 2019 — ISBN 978-3-030-36690-2, S. 496–507
- [Smie00] SMIERZCHALSKI, R: Ships' domains as a collision risk at sea in the evolutionary trajectory planning. In: BREBBIA, C. A. ; WESSEX INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Hrsg.): *Risk analysis II, Management information systems*. Southampton [England] ; Boston : WIT, 2000 — ISBN 978-1-85312-830-1, S. 43–52
- [StET12] STORGARD, JENNI ; ERDOGAN, ILKNUR ; TAPANINEN, ULLA: *Incident reporting in shipping: experiences and best practices for the Baltic Sea, Turun Yliopiston Merenkulkualan Koulutus- ja Tutkimuskeskuksen julkaisu A*. Turku : Turun Yliopiston, 2012 — ISBN 978-951-29-4913-7
- [Stev87] STEVEN, M. D.: Ground truth An underview †. In: *International Journal of Remote Sensing* Bd. 8 (1987), Nr. 7, S. 1033–1038
- [StHM08] STATHEROS, THOMAS ; HOWELLS, GARETH ; MAIER, KLAUS McDONALD: Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. In: *Journal of Navigation* Bd. 61 (2008), Nr. 1, S. 129–142

- [Stol03] STOLZE, KNUT: SQL/MM Spatial: The Standard to Manage Spatial Data in Relational Database Systems. In: *BTW* (2003), S. 247–264
- [StRA08] STANKOVIC, STÉPHANIE ; RAUFASTE, ÉRIC ; AVERTY, PHILIPPE: Determinants of Conflict Detection: A Model of Risk Judgments in Air Traffic Control. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 50 (2008), Nr. 1, S. 121–134
- [Sull15] SULLIVAN, T. J.: *Introduction to Uncertainty Quantification, Texts in Applied Mathematics*. 1st ed. 2015. Cham : Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2015 — ISBN 978-3-319-23395-6
- [TaBu10] TAM, CHEEKUANG ; BUCKNALL, RICHARD: Collision risk assessment for ships. In: *Journal of Marine Science and Technology* Bd. 15 (2010), Nr. 3, S. 257–270
- [Thom94] THOM, TREVOR: *The air pilot's manual. Vol. 2: Aviation law, flight rules and procedures, meteorology, exercises & answers for vols. 2, 3 & 4*. 3. ed., reprinted with amendments. Shrewsbury : Airlife, 1994 — ISBN 978-1-85310-015-4
- [Tsou16] TSOU, MING-CHENG: Online analysis process on Automatic Identification System data warehouse for application in vessel traffic service. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* Bd. 230 (2016), Nr. 1, S. 199–215
- [UMRS15] ULBRICH, S ; MENZEL, T ; RESCHKA, A ; SCHULDT, F ; MAURER, M: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In: *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS*, 2015, S. 105
- [Vani12] VAN IPEREN, ERWIN: Detection of hazardous encounters at the North Sea from AIS data. In: *The international Workshop on Next Generation of Nautical Traffic Model, Shanghai*, 2012
- [Vere18] V-Modell XT - Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte, VEREIN ZUR WEITERENTWICKLUNG DES V-MODELL XT E.V. (WEIT E.V.) (Hrsg.).
- [Vmfo19] VM-FOREN.DE: *Die Beaufort- und Petersen-Skala, Zusammenhänge zwischen Wind und Wellen*. URL <http://vierte-flottille.de/hp/wind/wind.html>
- [VOBO21] VAGALE, ANETE ; OUCHEIKH, RACHID ; BYE, ROBIN T. ; OSEN, OTTAR L. ; FOSSEN, THOR I.: Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: a review. In: *Journal of Marine Science and Technology* Bd. 26 (2021), Nr. 4, S. 1292–1306
- [WaCh16] WANG, YUEYING ; CHIN, HOONG-CHOR: An Empirically-Calibrated Ship Domain as a Safety Criterion for Navigation in Confined Waters. In: *Journal of Navigation* Bd. 69 (2016), Nr. 02, S. 257–276
- [Wang12] WANG, XIANKUN: Several experience of ship collision avoidance. In: *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*. Yichang, China : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4577-1415-3, S. 2838–2841

-
- [WBNL19] WOERNER, KYLE ; BENJAMIN, MICHAEL R. ; NOVITZKY, MICHAEL ; LEONARD, JOHN J.: Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance: Toward establishing COLREGS compliance metrics. In: *Autonomous Robots* Bd. 43 (2019), Nr. 4, S. 967–991
- [WeEl17] VAN WESTRENNEN, FULKO ; ELLERBROEK, JOOST: The Effect of Traffic Complexity on the Development of Near Misses on the North Sea. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* Bd. 47 (2017), Nr. 3, S. 432–440
- [Wein09] WEINTRIT, ADAM: *The Electronic Chart Display and Information System (ECDIS): an operational handbook*. Boca Raton : CRC Press, 2009 — ISBN 978-0-415-48246-2
- [Whit91] WHITE, FRANKLIN E: *Data fusion lexicon* : Joint Directors of Labs Washington DC, 1991
- [Winn12] WINNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen, Praxis ATZ/MTZ-Fachbuch. 2., korrigierte Aufl.* Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012 — ISBN 978-3-8348-1457-9
- [Wisc19] WISCH, MARCUS: 20 Jahre GIDAS GIDAS quo vadis – Sichtweise einer behördlichen Forschungseinrichtung auf die Unfall- und Verkehrsforschung der Zukunft.
- [WiW]17] WINNER, HERMANN ; WACHENFELD, WALTHER ; JUNIETZ, PHILIPP: Safety Assurance for Highly Automated Driving - The PEGASUS Approach.
- [Wolk16] WOLKE, THOMAS: *Risikomanagement. 3., vollständig überarbeitete, erweiterte und aktualisierte Auflage.* Berlin Boston : De Gruyter Oldenbourg, 2016 — ISBN 978-3-11-035387-7
- [WYLL18] WANG, YANLONG ; YU, XUEMIN ; LIANG, XU ; LI, BAOAN: A COLREGS-based obstacle avoidance approach for unmanned surface vehicles. In: *Ocean Engineering* Bd. 169 (2018), S. 110–124
- [Xu03] XU, GUOCHANG: *GPS: theory, algorithms, and applications*. Berlin ; New York : Springer, 2003 — ISBN 978-3-540-67812-0
- [XuLH09] XUE, Y ; LEE, B S ; HAN, D: Automatic collision avoidance of ships. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* Bd. 223 (2009), Nr. 1, S. 33–46
- [XuWa14] XU, QINGYANG ; WANG, NING: A Survey on Ship Collision Risk Evaluation. In: *Promet-Traffic&Transportation* Bd. 26 (2014), Nr. 6, S. 475–486
- [XuZW14] XU, QINGYANG ; ZHANG, CHUANG ; WANG, NING: Multiobjective Optimization Based Vessel Collision Avoidance Strategy Optimization. In: *Mathematical Problems in Engineering* Bd. 2014 (2014), S. 1–9
- [ZGKW16] ZHANG, WEIBIN ; GOERLANDT, FLORIS ; KUJALA, PENTTI ; WANG, YINHAI: An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. In: *Ocean Engineering* Bd. 124 (2016), S. 141–156

- [ZGMK15] ZHANG, WEIBIN ; GOERLANDT, FLORIS ; MONTEWKA, JAKUB ; KUJALA, PENTTI: A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. In: *Ocean Engineering* Bd. 107 (2015), S. 60–69
- [ZHTM18] ZHANG, XIAOHAN ; HE, YIXIONG ; TANG, RUHONG ; MOU, JUNMIN ; GONG, SHUAI: A Novel Method for Reconstruct Ship Trajectory Using Raw AIS Data. In: *2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*. Singapore: IEEE, 2018 — ISBN 978-1-5386-7831-2, S. 192–198
- [ZHWW20] ZHOU, XIANG-YU ; HUANG, JIN-JING ; WANG, FENG-WU ; WU, ZHAO-LIN ; LIU, ZHENG-JIANG: A Study of the Application Barriers to the Use of Autonomous Ships Posed by the Good Seamanship Requirement of COLREGs. In: *Journal of Navigation* Bd. 73 (2020), Nr. 3, S. 710–725



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung Unfallursachen der von der Bundesstelle für Seeunfalluntersuchungen zu prüfenden Seeunfälle (Gesamt) in 2021 [Bund22, S.54 f.].....	3
Abbildung 2: Vorhersagemodell für die Bewegung von Verkehrsteilnehmern während eines Manövers [PHLS00].....	6
Abbildung 3: Anzahl der Vorfälle im Luftverkehr von 2011-2021	8
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit basierend auf dem empirischen Vorgehensmodell von [Clef15].....	16
Abbildung 5: Wesentliche Schritte zur Durchführung eines FOT [Fotn16a].....	19
Abbildung 6: FOT gegenüber NDS nach [Fotn16a].....	22
Abbildung 7: Einteilung von Testwerkzeugen für den Test von autonomen Fahrzeugen [MGLW15, S.460]	22
Abbildung 8: Fujiis Ship Domain Modelle nach [XuWa14, S.476 f.].....	27
Abbildung 9: Ship Domain nach [Good75].....	28
Abbildung 10: Davis et al. Ship Domain und Ship Arena Modell [XuWa14, S.478]	29
Abbildung 11: Ship Domain nach Coldwell (links für „meeting encounters“; rechts für „overtaking encounters“) [Cold83]	29
Abbildung 12: Ship fuzzy Domain nach [Piet08].....	30
Abbildung 13: Hexagonal geformte Ship Domain nach [Smie00].....	31
Abbildung 14: Ship Domain nach [WaCh16].....	32
Abbildung 15: Location Management Problematik [MeDX14, S.16]	42
Abbildung 16: Data Warehouse Architektur nach [Fark11, S.67]	46
Abbildung 17: Multidimensionaler Datacube für die Speicherung von Schiffstrajektorien [Tsou16]	47
Abbildung 18: Kernbereiche zur strukturierten Anforderungserhebung nach [KoSo98] ..	49
Abbildung 19: UseCase-Diagramm für eine Beinahekollisionsdatenbank	51
Abbildung 20: Anforderungsdiagramm mit Relationen zu den Teilforschungsfragen und Zielen.....	58
Abbildung 21: Bereichseinteilung zur Kategorisierung der Hindernisse [TaBu10].....	60
Abbildung 22: Ship Domain abhängig von der Geschwindigkeit [TaBu10]	61
Abbildung 23: Die Ermittlung der Ship Domain in einer Überholsituation durch die Perzentile [Vani12]	63
Abbildung 24: Zwei Schiffs-Kollisions-Situation [PeSo11].....	64
Abbildung 25: Darstellung der PDF von C'_{max} [DeCh10]	67
Abbildung 26: Grafische Darstellung der Konfliktgröße [WeEl17]	68
Abbildung 27: Kurvenverlauf des MDTC [ZGKW16].....	69

Abbildung 28: Der datenwissenschaftliche Prozess angelehnt an [ScOn13, S.41].....	75
Abbildung 29: Konzeptioneller Aufbau des Gesamtsystems zur Detektion von Beinahekollisionen aus Verkehrsdaten.....	78
Abbildung 30: Vereinfachte Darstellung eines Auszugs aus dem SensorML-Modell zur Beschreibung eines Sensorsystems nach [Bott02].....	80
Abbildung 31: Vereinfachte Darstellung eines Auszugs aus dem O&M-Modell zur Beschreibung einer Beobachtung nach [Cox11].....	81
Abbildung 32: Datenakquisitionssystem nach [Kiri02].....	82
Abbildung 33: Bottom-Up Datentransformationsprozess föderierter Systeme nach [ShLa90, S.217].....	83
Abbildung 34: Einsatz von SWE Services in einer Bus-Netzwerk Architektur.....	84
Abbildung 35: Data Warehouse Architektur zur Speicherung von Begegnungssituationen.....	85
Abbildung 36: ER-Modell der Beobachtungsdaten vereinfacht ohne Attribute.....	87
Abbildung 37: Prozessmodell zur Datenfusion nach [HaLl97, S.11].....	90
Abbildung 38: Verteilung der Signifikanz relevanter Einflussfaktoren bei der Bewertung des Kollisionspotenzials von Begegnungssituationen.....	94
Abbildung 39: Kategorisierung der Einflussfaktoren.....	96
Abbildung 40: Adaptive Shipdomain mit Perzentilen für die vier unterschiedlichen Begegnungen (Crossing (Give-Way und Stand-on), Overtaking, Head-On).....	104
Abbildung 41: Kreisbogen zur Bewertung der Verkehrsdichte.....	111
Abbildung 42: Grafische Darstellung der Transport- und Planungsaufgaben eines Nautikers nach [Dong82, Fotn16a].....	114
Abbildung 43: Beispielhafter Verlauf des Kurses eines Schiffes über die Zeit bei geplanten und ungeplanten Manövern.....	115
Abbildung 44: Unterteilung der Begrifflichkeiten Route, Wegpunkt, Manöverpunkt und Trajektorie.....	116
Abbildung 45: Prozess zur Manövernetzgenerierung.....	118
Abbildung 46: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Begegnungssituationen Frontal-, Kreuzungs- und Überholsituationen.....	120
Abbildung 47: Ähnlichkeitsmaße zur Mustererstellung nach [DoLW12, S.9].....	122
Abbildung 48: Kompositionsstrukturdiagramm der eingesetzten Sensorbox im Feld.....	129
Abbildung 49: Zusammensetzung und Aufbau der „referenceID“.....	130
Abbildung 50: Transaktionsorientierte Tabelle „tracks“ für AIS und Radardaten in der nbdatabase.....	131
Abbildung 51: Datenbankschema der analyseorientierten Datenbank.....	132

Abbildung 52: Prozess der Datenaufbereitung gemäß dem KNIME-Workflow	133
Abbildung 53: Prozess zur Begegnungssituationsbeurteilung gemäß dem KNIME-Workflow	135
Abbildung 54: Konfusionsmatrix der Klassifikationsverfahren zur Bestimmung von Begegnungen	140
Abbildung 55: Trajektorie eines Backbordmanövers mit 20° Rudereinschlag (Experiment 1).....	145
Abbildung 56: Kursverlauf und CUSUM-Entscheidungsfunktion des Experiment 1 über die Zeit	146
Abbildung 57: Geschwindigkeitsverlauf und CUSUM-Entscheidungsfunktion des Experiment 9 über die Zeit	147
Abbildung 58: Generiertes Manövernetz aus einem Datensatz der Deutschen Bucht	149
Abbildung 59: Anomaliedetektion mittels Manövernetz	149
Abbildung 60: Boxplot zum Vergleich von DCPA und realen Distanzen der gesammelten Begegnungen (Distanzen in m).....	151
Abbildung 61: Heatmap zur Darstellung und Verortung des zugrundeliegenden Datensatzes	151
Abbildung 62: Beinahekollision vor Dänemark	152
Abbildung 63: Überholvorgang in den Niederlanden (normalisierter, zeitlicher Verlauf der Trajektorien von hell zu dunkel).....	153
Abbildung 64: Kreuzungssituation vor den Niederlanden (normalisierter, zeitlicher Verlauf der Trajektorien von hell zu dunkel).....	154



Abkürzungsverzeichnis

A

AIRPROX · *Aircraft Proximity Hazard*

AIS · *Automatic Identification System*

AMQP · *Advanced Message Queuing Protocol*

ARPA · *Automatic Radar Plotting Aid*

B

BSH · *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*

BSU · *Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung*

C

CA · *centripetal acceleration*

CDM · *canonical data model*

COG · *course over ground*

CPA · *Closest Point of Approach*

CUSUM · *cumulated sum*

D

DBMS · *Datenbankmanagementsystem*

DBSCAN · *Density-based spatial clustering of applications with noise*

D CPA · *Distance at/to Closest Point of Approach*

DGPS · *Differential Global Positioning System*

DI · *Domain Intrusion*

DW · *Data Warehouse*

DWD · *Deutscher Wetterdienst*

E

ECDIS · *Electronic Chart Display and Information System*

EKF · *Extended Kalman Filter*

EMCIP · *European Marine Casualty Information Platform*

EMF · *Eclipse Modelling Framework*

eMIR · *e-Maritime Integrated Reference Platform*

EMSA · *European Maritime Safety Agency*
ENC · *Electronic Navigational Charts*
ETA · *estimated time of arrival*
ETL · *Extraktion-Transformation-Laden*
EVT · *extreme value theory*

F

FAA · *Federal Aviation Administration*
FDDBS · *Federated Database Systems*
FESTA · *field operational test support action*
FIUUG · *Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz*
FOT · *Field Operational Test*

G

GIDAS · *German In-Depth Accident Study*
GIS · *Geoinformationssystem*
GMDSS · *Global Maritime Distress and Safety System*
GMM · *Gaussian Mixture Model*
GNSS · *global navigation satellite system*
GPS · *Global Positioning System*
GTS · *Global Telecommunication System*

I

IALA · *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*
ICS · *das International Chamber of Shipping*
IEC · *International Electrotechnical Commission*
IHO · *International Hydrographic Organization*
IKT · *Informations- und Kommunikationsinfrastruktur*
IMO · *International Maritime Organization*
IMU · *Inertial Measurement Unit*
INS · *Integrated Navigation System*
IPC · *Industrie-PC*
ISO · *International Organization for Standardization*
ITU · *International Telecommunication Union*

J

J.A.C.D.E.C. · *Jet Airliner Crash Data Evaluation Centre*

JDL · *Joint Directors of Laboratories*

K

KI · *Künstliche Intelligenz*

L

LMM · *Last Minute Maneuver*

LRIT · *Long-Range Identification and Tracking*

M

MMSI · *Maritime Mobile Service Identity*

MOD · *Moving Objects in Databases*

MQTT · *Message Queuing Telemetry Transport*

MRCC · *Maritime Rescue Coordination Centers*

MSI · *Maritime Safety Information*

MW · *Mittelwelle*

N

NDS · *Naturalistic Driving Studies, Naturalistic Driving Studies*

NOK · *Nord-Ostsee-Kanal*

O

O&M · *Observation & Measurement*

OGC · *Open Geospatial Consortium*

OOW · *Officer of the Watch*

P

PDF · *probability density function*

PNT · *Position Navigation and Timing*

R

RTK · *Real-Time Kinematik*

S

SAA · *See and Avoid*

SaDiNe · *Sensor Data Distribution Node*

SDW · *Spatial Data Warehouses*

SeeSchStrO · *Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung*

SensorML · *Sensor Model Language*

SMA · *Simple Moving Average*

SOG · *speed over ground*

SOLAS · *International Convention for the Safety of Life at Sea*

SOS · *Sensor Observation Service*

SSU · *sehr schwerer Seeunfall*

STOMP · *Streaming Text Oriented Messaging Protocol*

SU · *schwerer Seeunfall*

SUG · *Seesicherheits-Untersuchungs-Gesetz*

SuT · *System under Test*

SWE · *Sensor Web Enablement*

T

TCAS · *Traffic Alert and Collision Avoidance System*

TCPA · *Time to Closest Point of Approach*

TMTC · *Time-Measured-to-Collision*

U

UKW · *Ultrakurzwellen*

US · *United States*

UTC · *Coordinated Universal Time*

V

VDE · *VHF Data Exchange*

VMS · *Vessel Monitoring System*

VTS · *Vessel Traffic Services*

W

WFS · *Web Feature Service*

WMS · *Web Map Service*

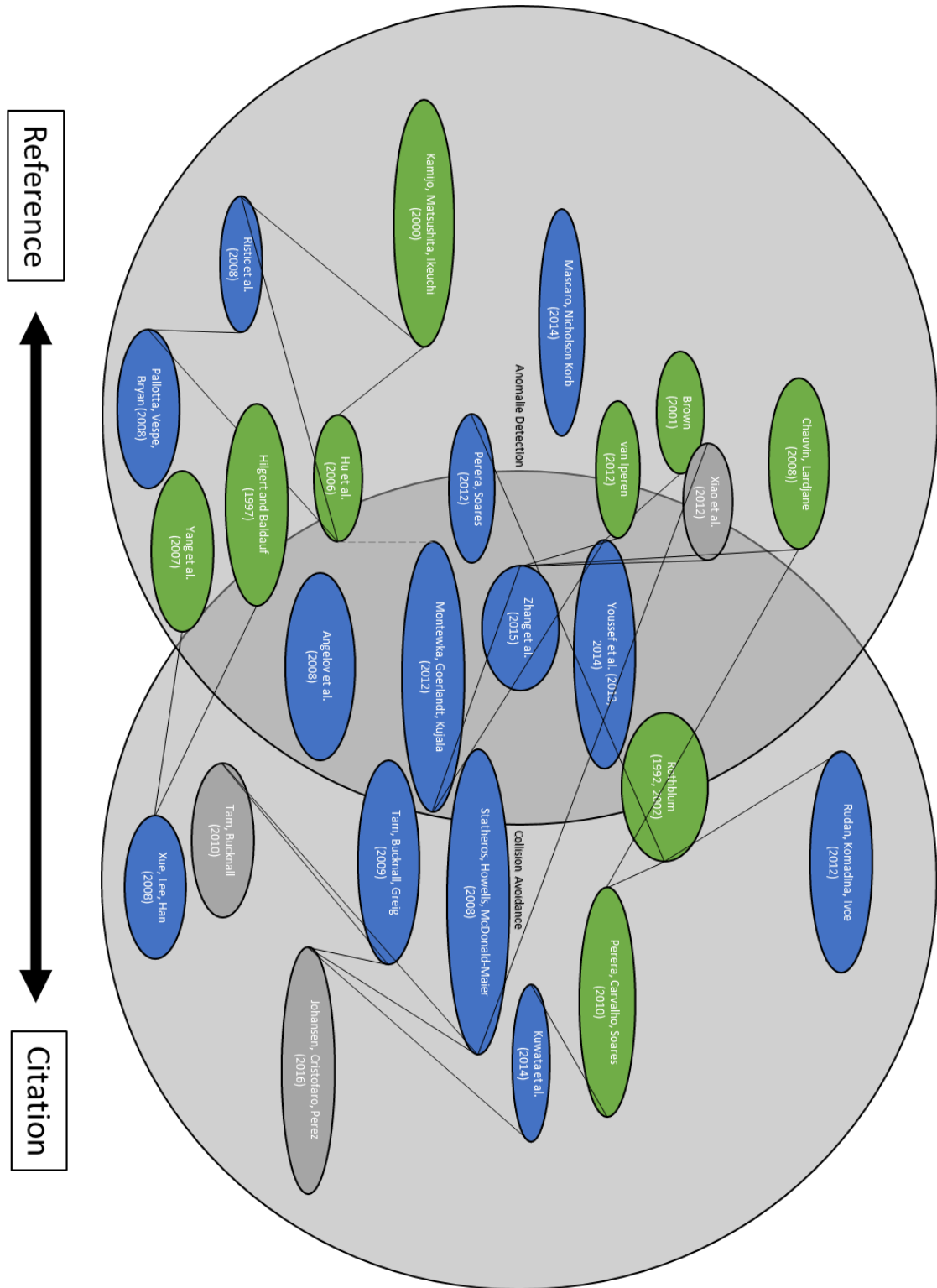
WSU · *weniger schwerer Seeunfall*

X

XML · Extensible Markup Language



Anhang



Anlage 1: Auflistung Verwandter Arbeiten

Ansätze	Anforderungen												
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ACCeSS	-	-	X	0	X	-	X	-	-	X	-	-	-
MARIN	-	-	0	-	-	-	X	-	-	X	-	-	0
CENTEC	X	-	0	-	X	0	-	X	-	X	-	0	-
DNV-GL	0	-	-	0	-	X	-	-	-	X	-	X	0
NTCT	X	0	0	-	X	-	0	-	-	X	-	-	0
TU Delft	0	-	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	-
VCRO	0	0	0	0	X	-	X	-	-	X	-	-	0

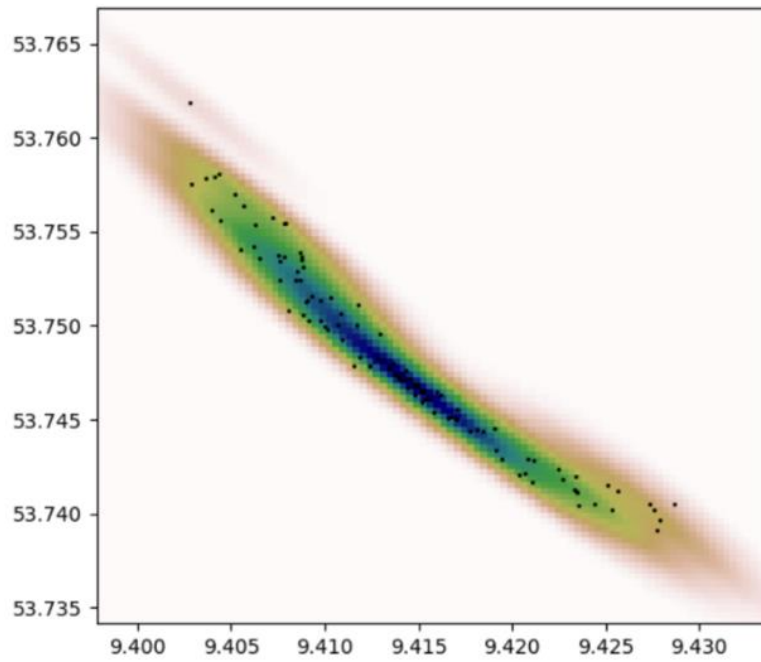
X = erfüllt; 0 = teilweise erfüllt (oder diskutiert); - = nicht erfüllt;

Anlage 2: Gegenüberstellung der Verwandten Arbeiten mit den Anforderungen zur TF2

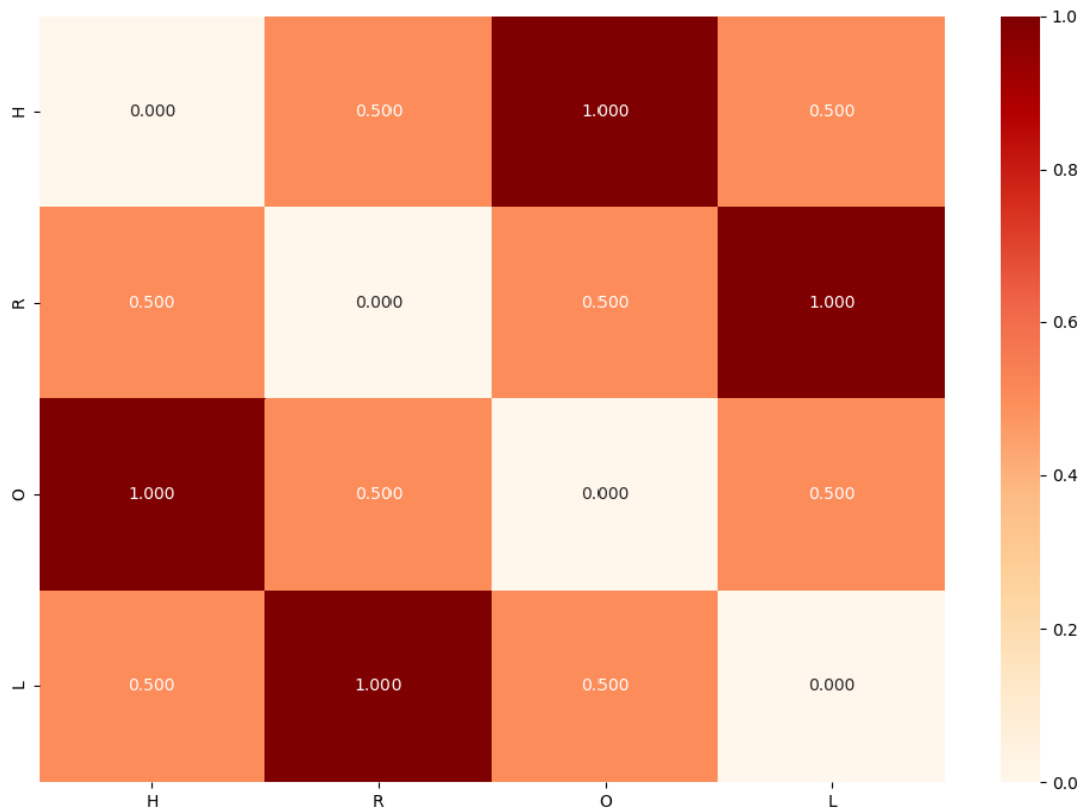
Feld	Mis-sing Values (X=1)	Incomplete Data (X=3)	Outliers (X=2)	Er-ror-code
Maritime Mobile Service Identity number (MMSI)	NULL	MMSI = 0 = 1	Länger oder kürzer als 9 Zeichen	1X01
AIS Navigational Status	NULL	ID = 15	ID < 0 oder ID > 15	2X01
Rate of Turn	NULL, -128	ROT = 127 oder ROT = -127	ROT > 720 oder ROT < -720	2X06
Speed over Ground	NULL, 1023	1022	Außerhalb des Konvidenzintervalls und kleiner als 0 und größer als 102	2X05
Position Coordinates	NULL	181° Longitude 91° Latitude	Außerhalb des Konvidenzintervalls	2X02
Course over Ground	NULL	360°	Außerhalb des Konvidenzintervalls und kleiner als 0° und größer als 360°	2X03

Heading	NULL	511°	Außerhalb des Konvidenzintervalls und kleiner als 0° und größer als 360°	2X04
International Maritime Organisation number	NULL	0	Kleiner als 1 und größer als 999999999	1X02
Call Sign	NULL	@@@@@@@	Mehr als 7 ASCII Zeichen	1X03
Name	NULL	@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@	Mehr als 20 ASCII Zeichen	1X04
Ship Type	NULL	0	Kleiner als 0 und größer als 99 oder 255	1X05
Dimension (reference for position)	NULL	A und C = 0 und B und D ungleich 0 A, B, C und D gleich 0 C und D gleich 63	A und B kleiner als 0 oder größer als 511 und c und D größer als 63 und kleiner als 0	1X06
Draught	NULL	0m oder 25,5m	Größer als 25,5 m und kleiner als 0 m	3X01
Destination	NULL	@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@	Mehr als 20 Zeichen oder entspricht nicht dem UN/LOCODE	3X02
ETA (estimated time of arrival)	NULL	Monat = 0, Tag = 0, Stunde = 24 und Minute = 60	Monat größer als 12 und kleiner als 0 Tag größer als 31 und kleiner als 0 Stunde größer als 24 und kleiner als 0 Minute größer als 60 und kleiner als 0	3X03

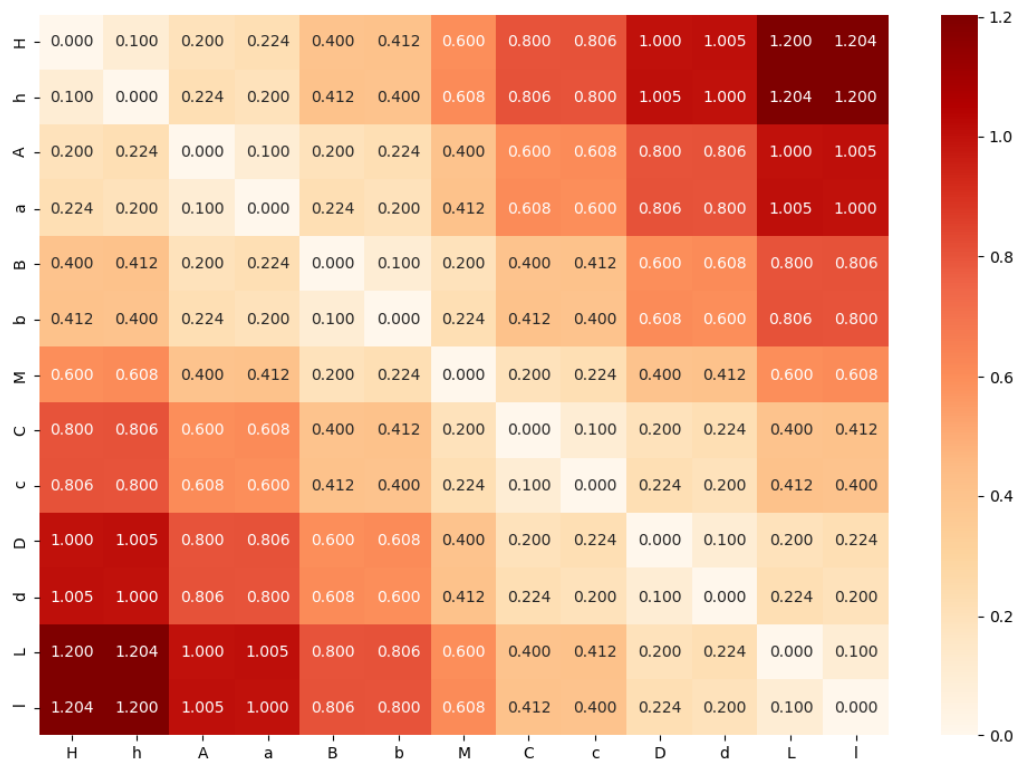
Anlage 3: Fehlercodes der existierenden AIS-Felder



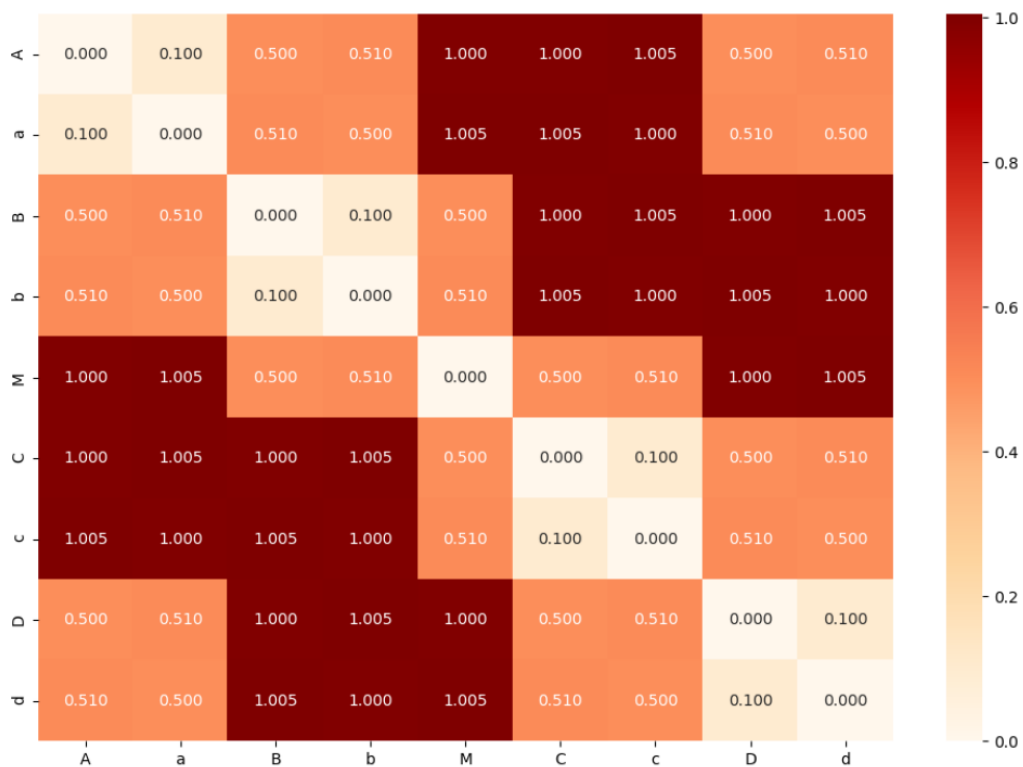
Anlage 4: Beispielhafte Darstellung eines Manöverclusters mit 2-dimensionaler Kerndichteschätzung



Anlage 5: NWED-Kostenmatrix (H, R, O, L)



Anlage 6: NWED-Erweiterte Kostenmatrix (H, h, A, a, B, b, M, C, c, D, d, L, l)



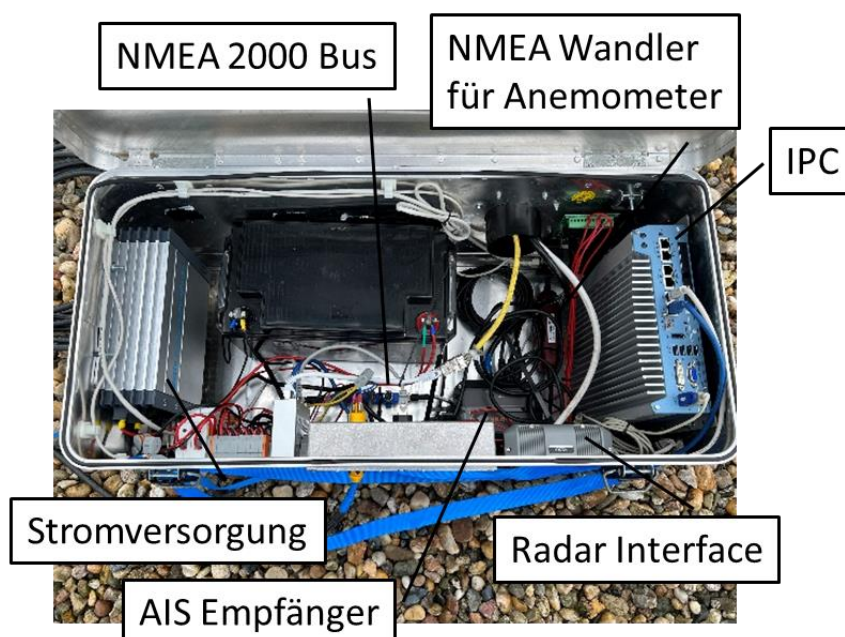
Anlage 7: NWED-Winkel-Kostenmatrix (A, a, B, b, M, C, c, D, d)

Art	Beschreibung	Gemessen in
Wasserstand	Die Höhe des Wasserstandes abhängig von einem definierten Referenzsystem.	Meter
Strömung	Die Strömung in einem Raster mit einer zusätzlichen Strömungsrichtung.	Meter pro Sekunde
Windgeschwindigkeit	Die Windgeschwindigkeit in einem Raster mit einer zusätzlichen Windrichtung.	Meter pro Sekunde und Grad (0-360)
Wellenhöhe	Die Höhe der Wellen nach einem definierten Referenzsystem.	Meter
Salzgehalt/potentielle Wassertemperatur	Der Salzgehalt des Wassers und die daraus resultierende potentielle Wassertemperatur.	??, Grad Celsius

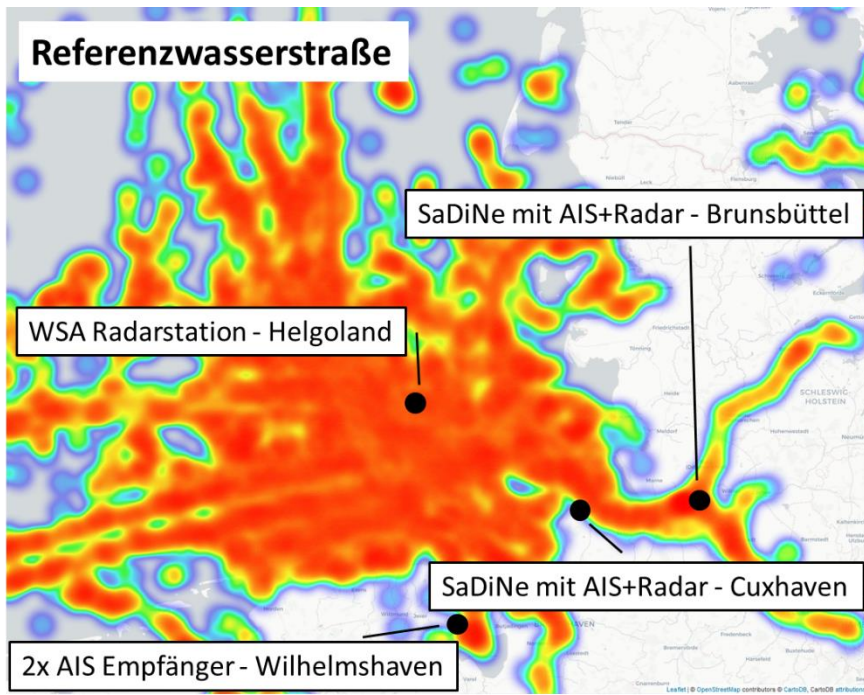
Anlage 8: Maritime Wetterdaten

Art	Beschreibung	Gemessen in
Lufttemperatur	Die Lufttemperatur in einem bestimmten Raster.	Grad Celsius
Luftdruck	Der Luftdruck in einem bestimmten Raster.	
Bodentemperatur	Die Bodentemperatur im Wasser.	Grad Celsius
Schneehöhe	Die bemessene Schneehöhe in einem Gebiet.	Meter
Solar	Messung der Solarstrahlung. Dauer und Strahlungsmessung.	
Niederschlag	Gemessene Wassermenge in einem Gebiet.	
Frost	Die Bodentemperatur und der gefrorene Anteil.	
Bodenfeuchte	Der Wassergehalt des Bodens.	
Transpiration und Wasserdampfgehalt	Die Summe der Verdunstung von Wasser im Gebiet.	
Bedeckungsgrad	Der Grad der Bewölkung.	

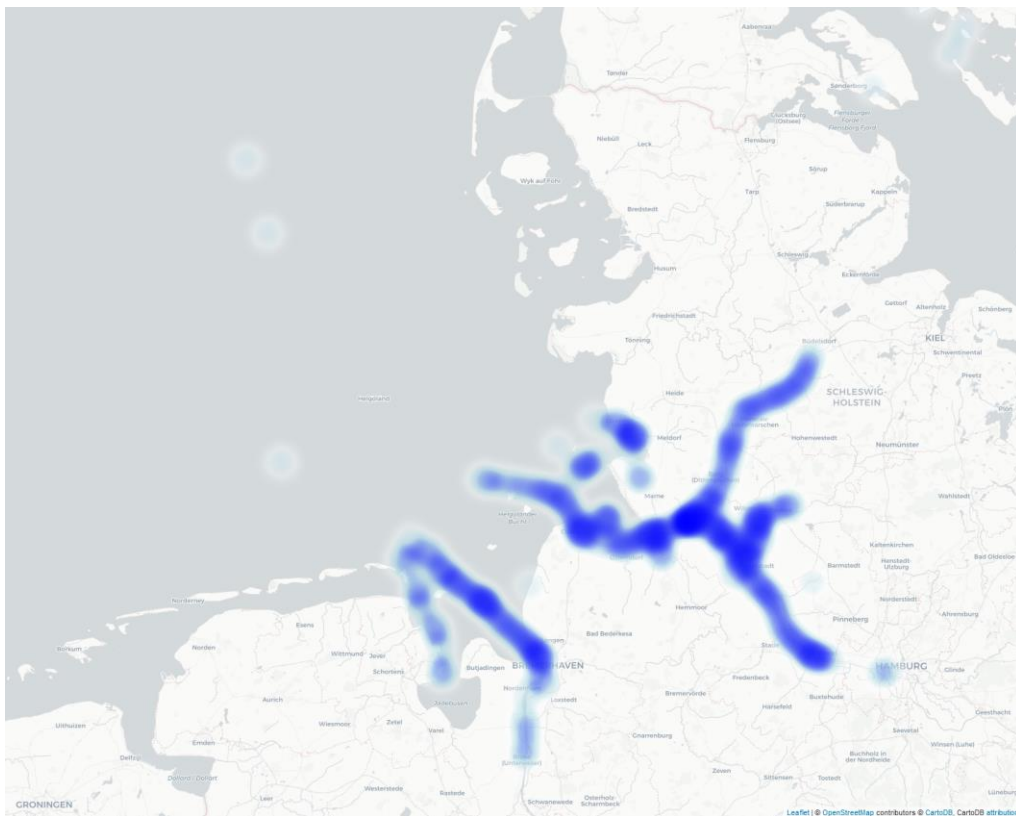
Anlage 9: allgemeine Wetterdaten



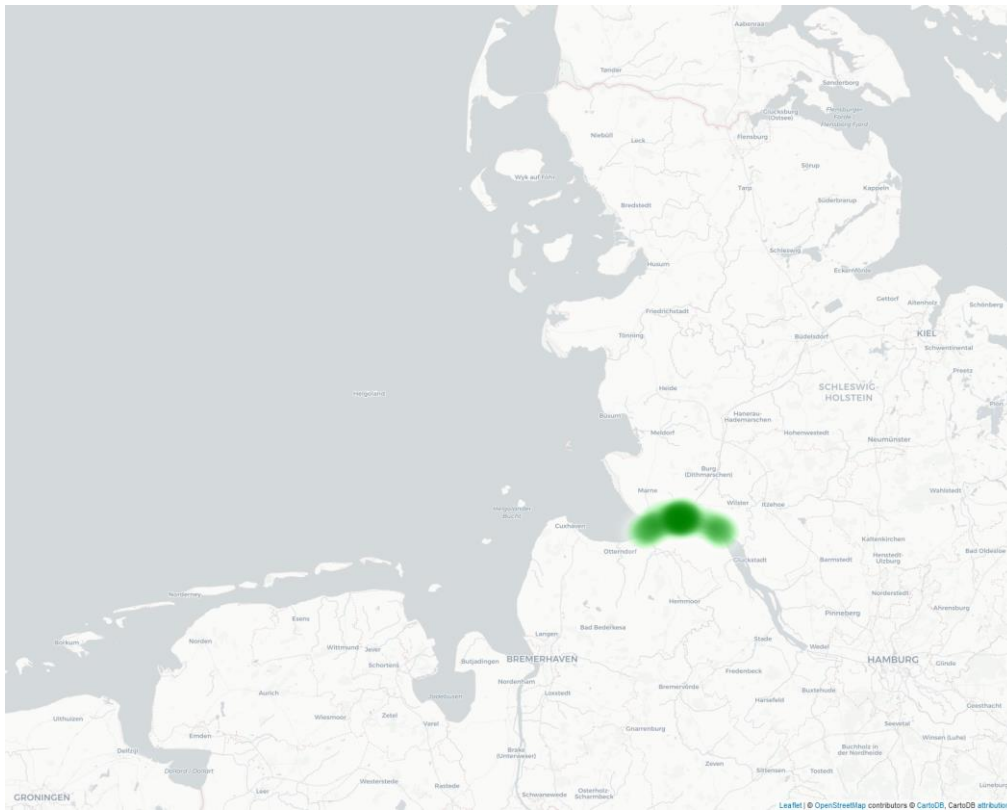
Anlage 10: Prototypischer Aufbau einer Sensorstation ohne Sensorantennen



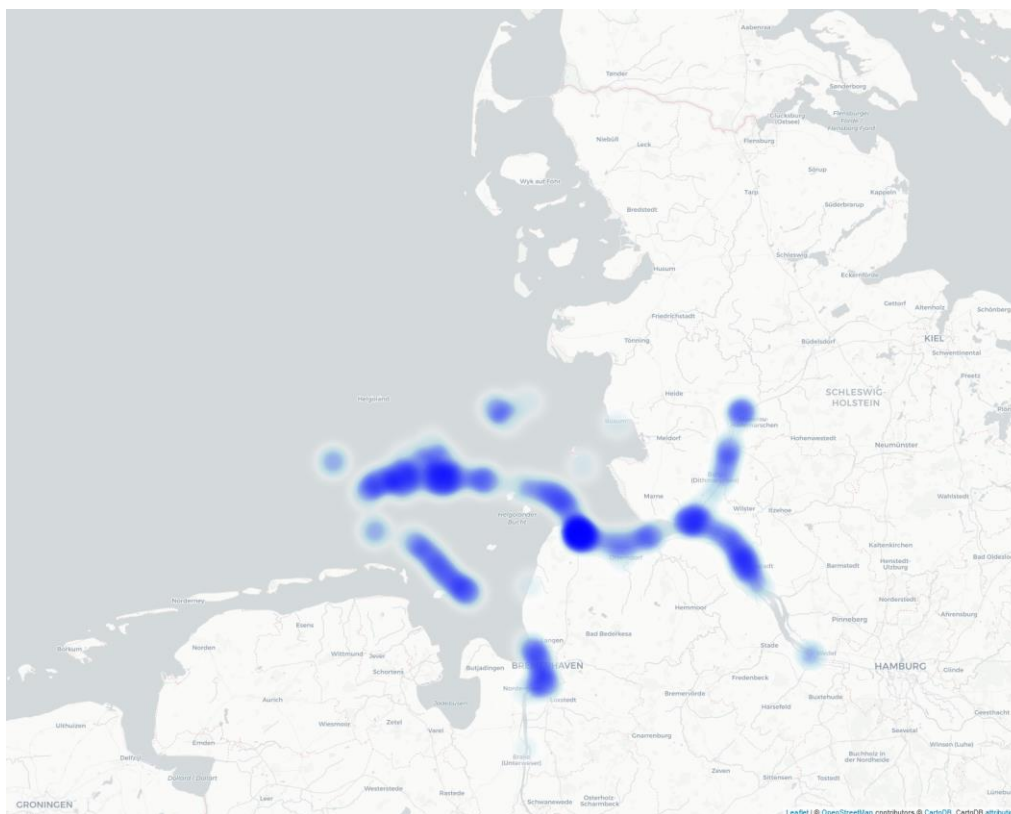
Anlage 11: Erfassungsgebiet des Sensoraufbaus (AIS+Radar)



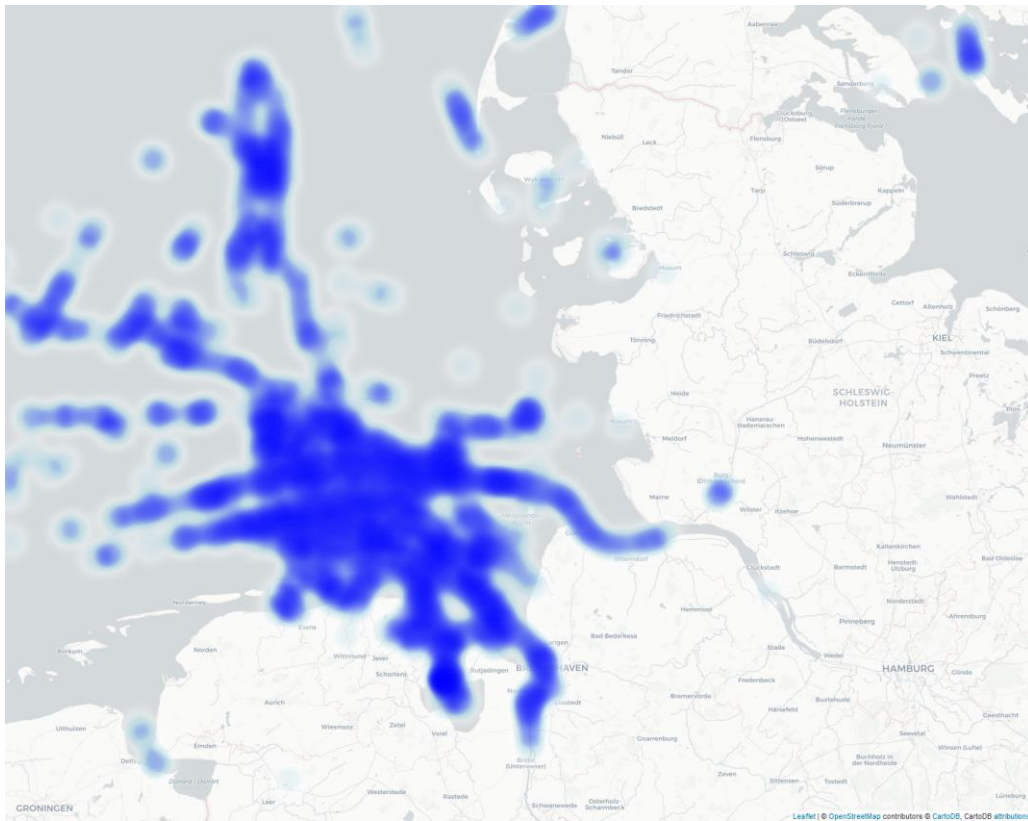
Anlage 12: Heatmap – AIS-Daten Brunsbüttel



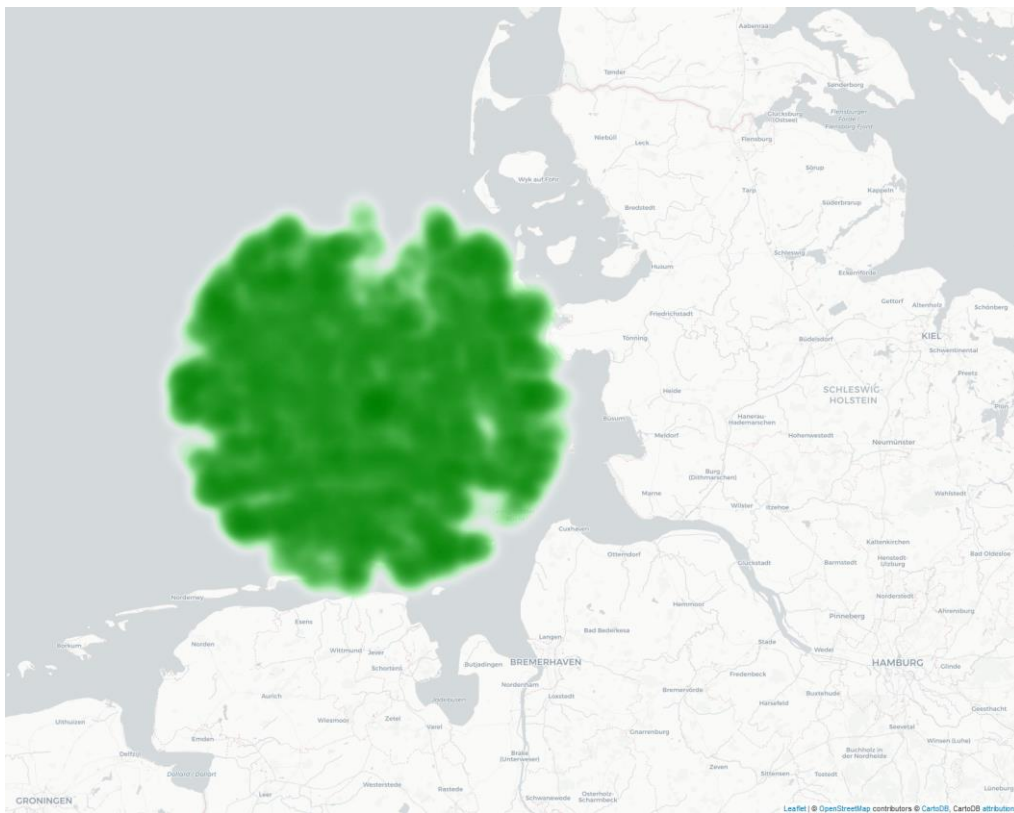
Anlage 13: Heatmap – Radardaten Brunsbüttel



Anlage 14: Heatmap – AIS-Daten Cuxhaven



Anlage 17: Heatmap – AIS Daten Wilhelmshaven 2



Anlage 18: Heatmap – Radardaten Helgoland

Station ID	name
0	Test
1	Brunsbüttel
2	Cuxhaven
3	Navibox Mobile
4	Navibox Josephine
5	Wilhelmshaven 1
6	Wilhelmshaven 2
7	WSV

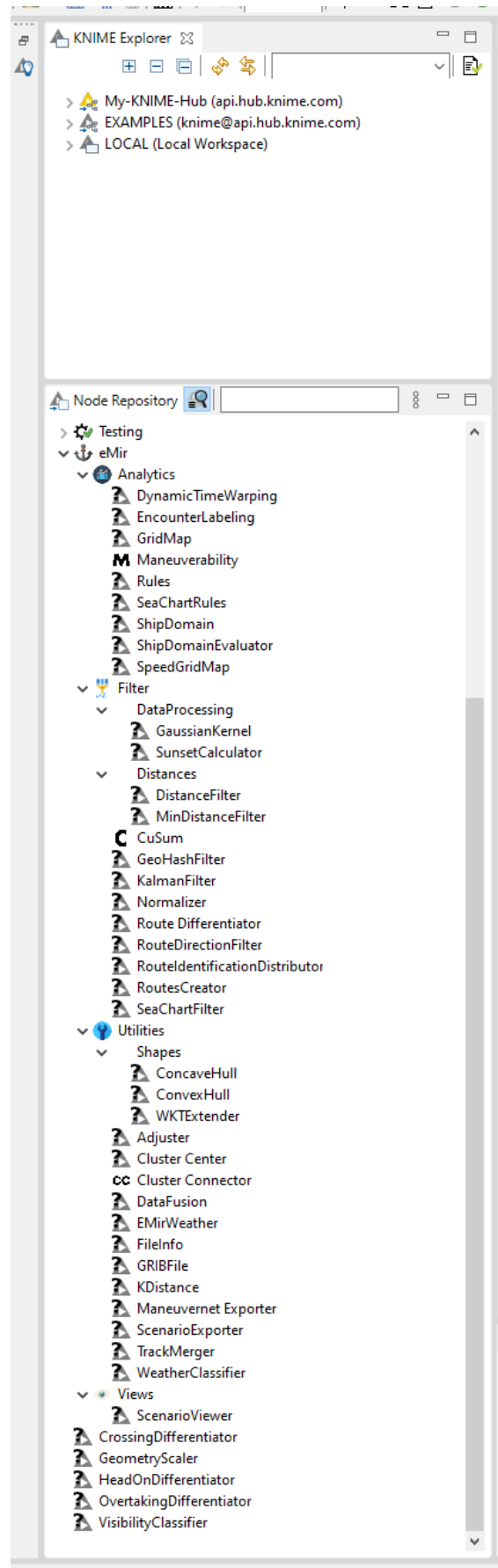
Anlage 19: Aufschlüsselung der Station ID Bytes der ReferenceID

Sensor ID	name
1	AIS
2	Radar
3	Windsensor
6	GPS
11	DGPS
4	DGPS Compass
5	Camera
7	ShipEngine
8	ShipEchoSpeed- Temp
9	ShipControl
10	IMU

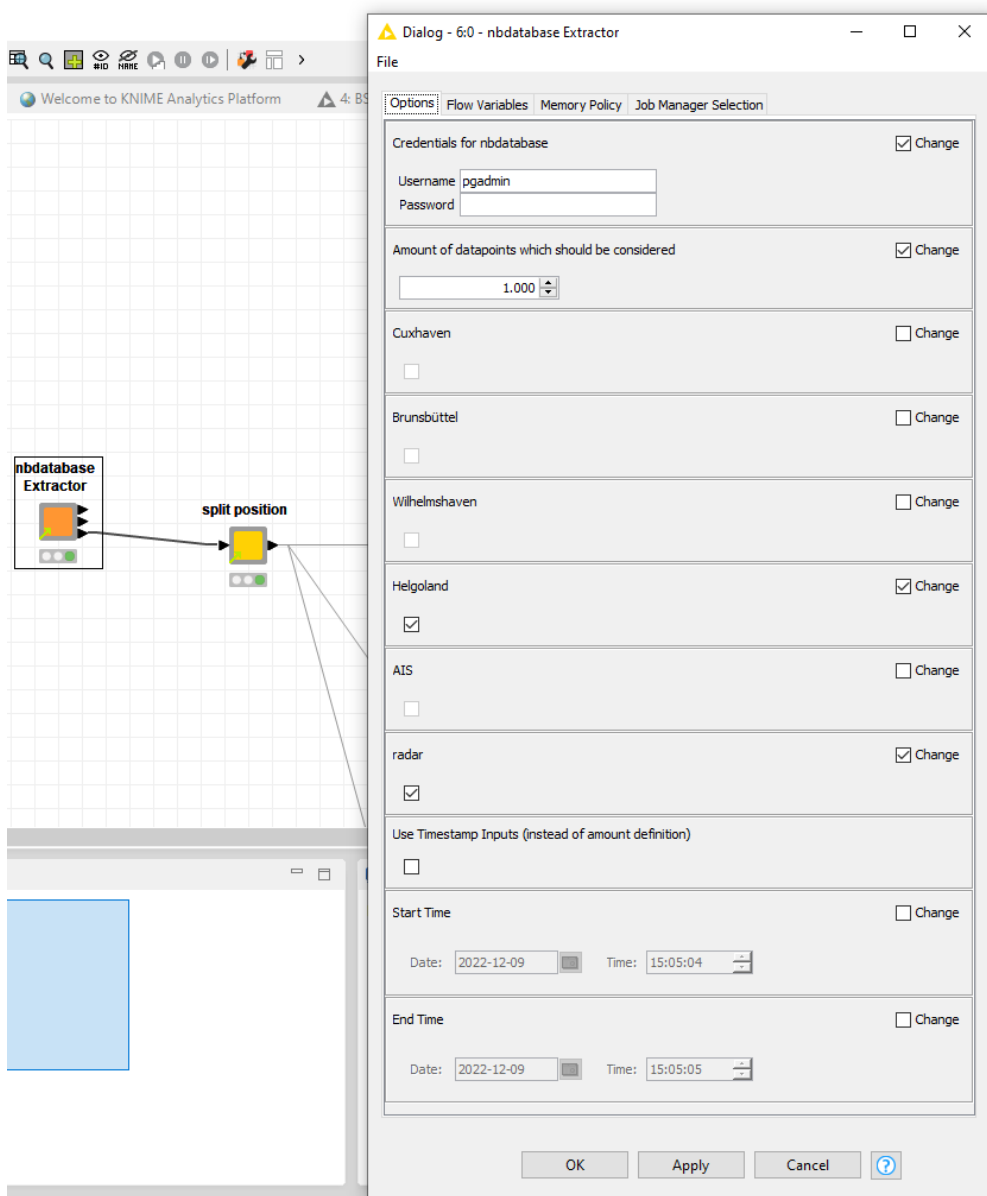
Anlage 20: Aufschlüsselung der Sensor ID Bytes der ReferenceID

SensorPort ID	name
1	LocationPort
2	OrientationPort
3	VelocityPort
4	RotationPort
5	TemperaturePort
6	DistancePort
7	ObjectPort
8	VideoPort
9	AccelerationPort
10	PressurePort
11	MagneticField- Port
12	EnergyPort
13	TimePort

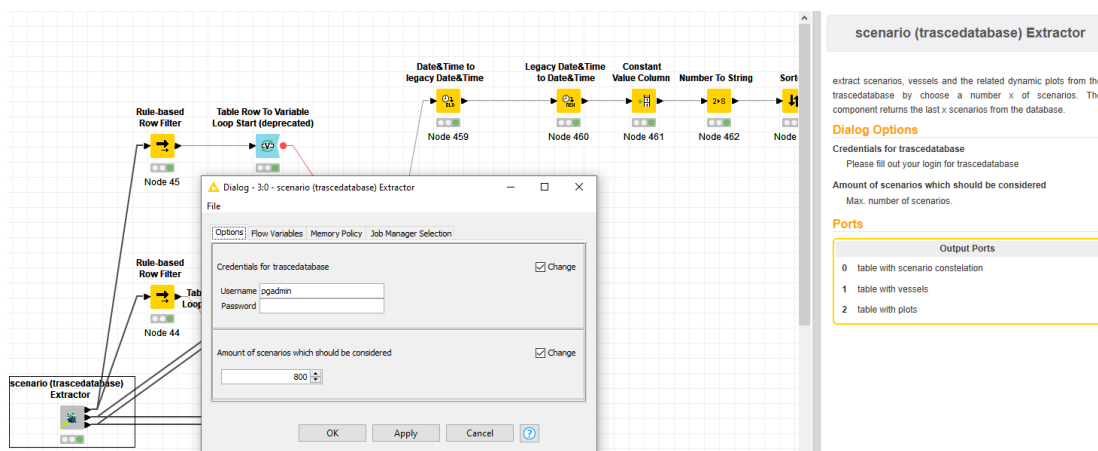
Anlage 21: Aufschlüsselung der SensorPort ID Bytes der ReferenceID



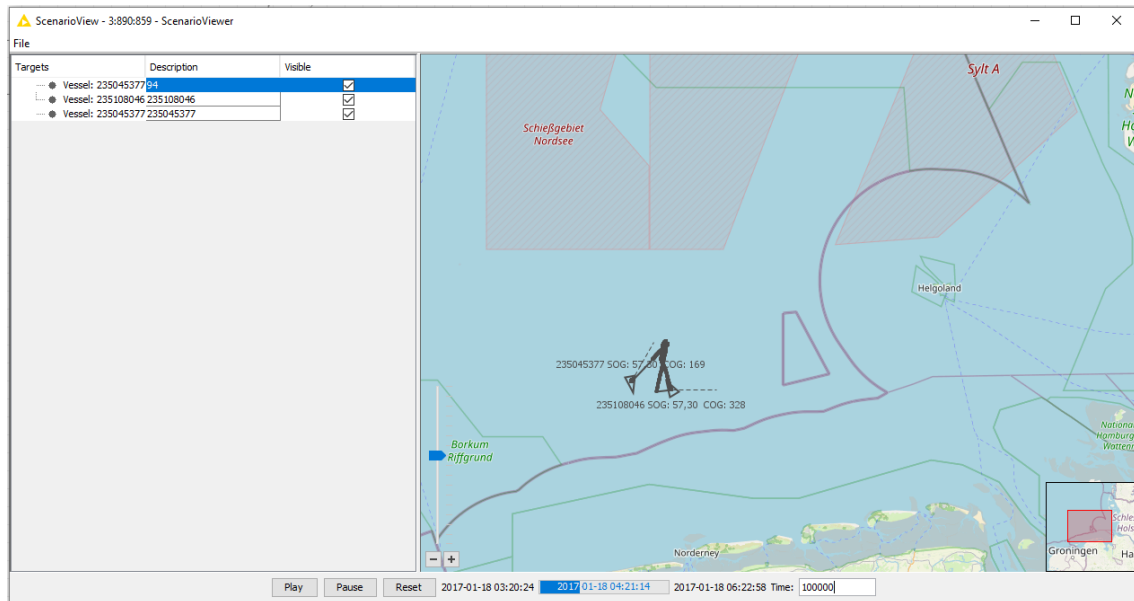
Anlage 23: Node Repository mit eMIR Nodes



Anlage 24: Dialogfenster für eigene Component-Knoten

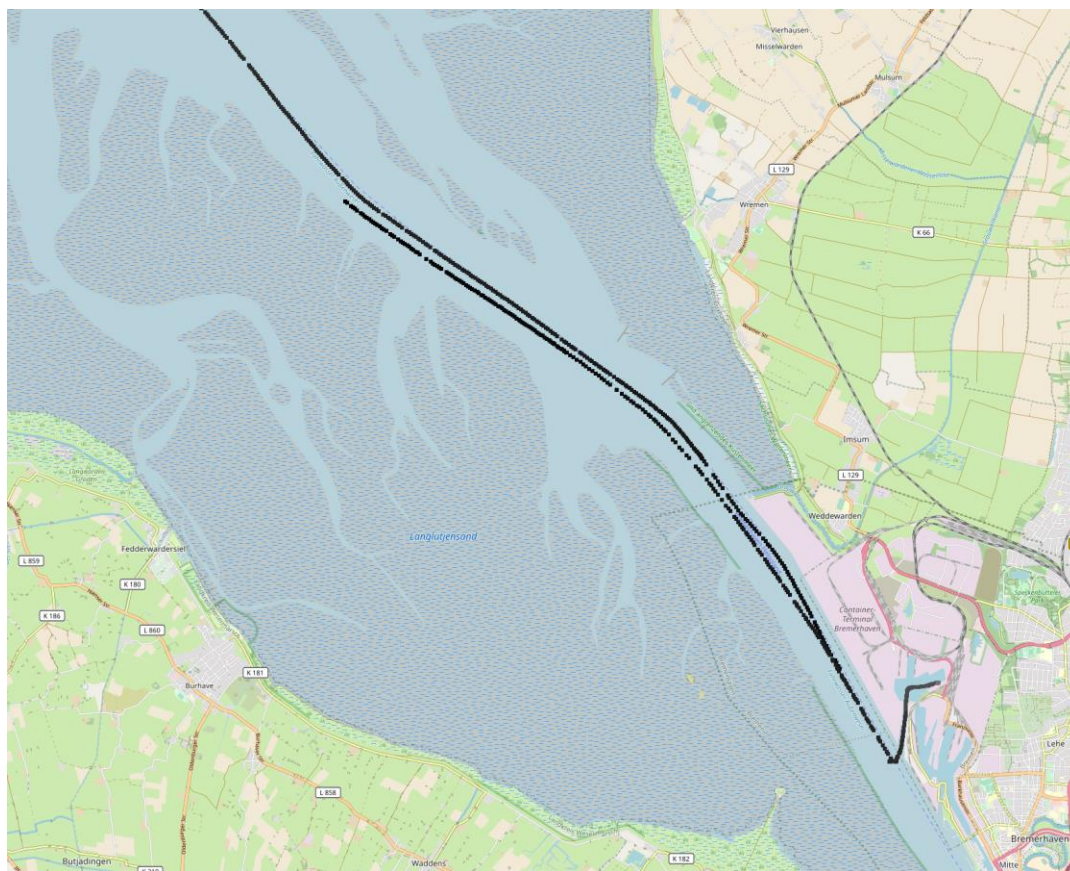


Anlage 25: eMIR Components zur Vereinheitlichung von Verarbeitungsschritten und Operationen der Datensätze und mit der Datenbank mit Beschreibung



Anlage 26: ScenarioViewer KNIME-Knoten zur Visualisierung und Reproduktion von Szenarien

Legende: Farbverlauf von Weiß (ältester Zeitstempel) zu Schwarz (neuster Zeitstempel)



Anlage 31: Passing-Szenario mit ID 95898

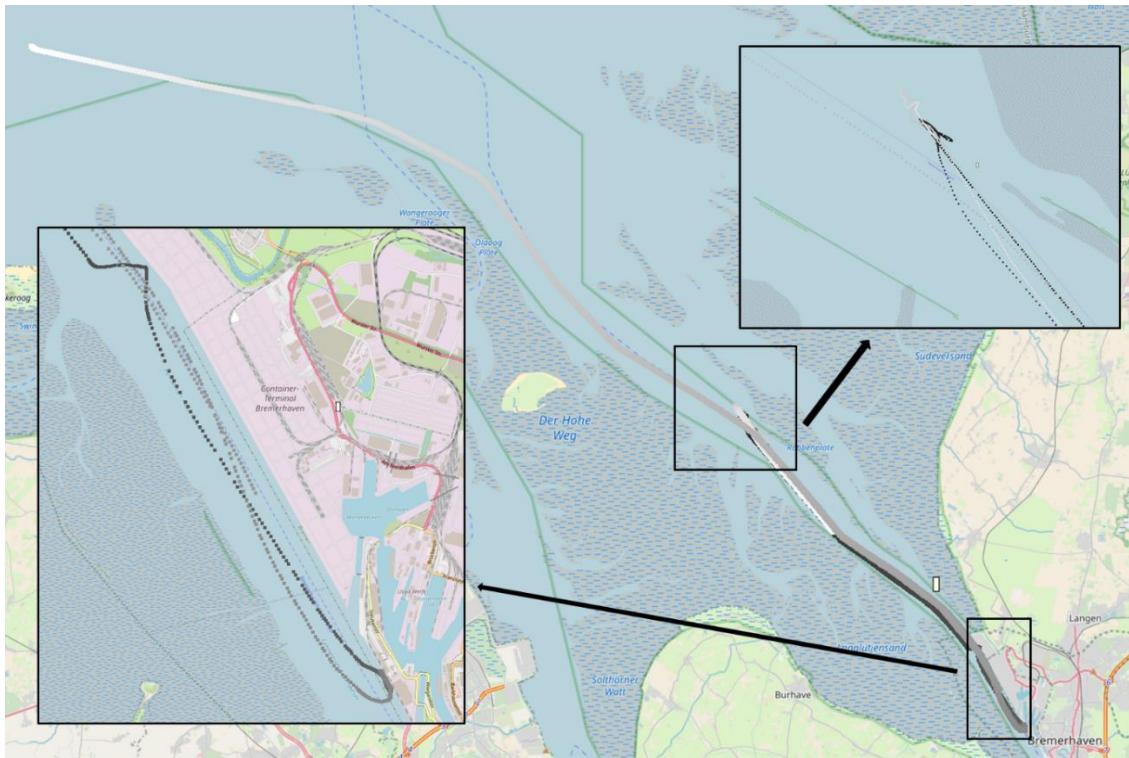
Legende: Farbverlauf von Weiß (ältester Zeitstempel) zu Schwarz (neuster Zeitstempel)



Anlage 32: Passing-Szenario mit ID 117075

Legende: Farbverlauf von Weiß (ältester Zeitstempel) zu Schwarz (neuster Zeitstempel)

pel)



Anlage 33: Overtaking-Situation mit ID 128557

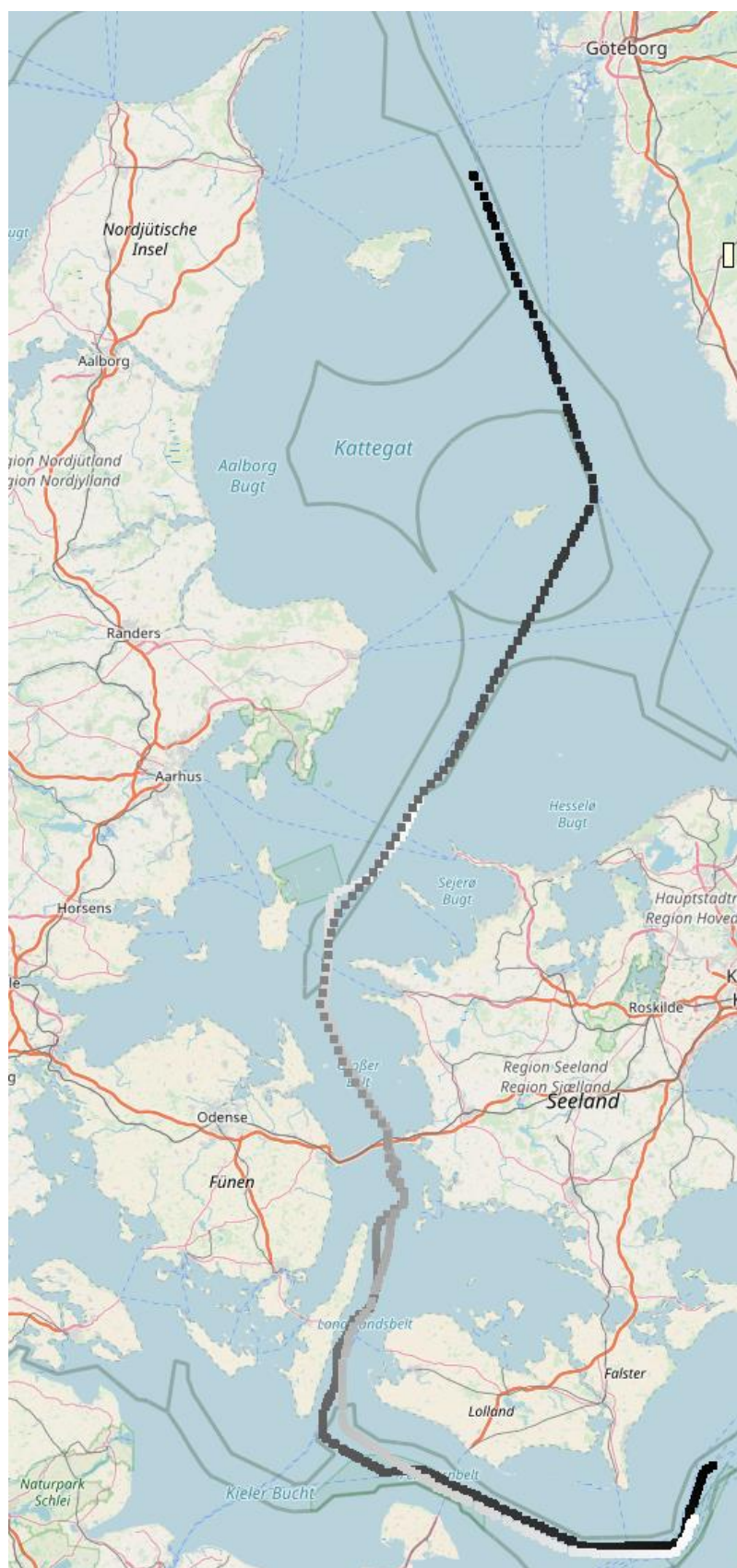
Legende: Farbverlauf von Weiß (ältester Zeitstempel) zu Schwarz (neuster Zeitstempel)

pel)



Anlage 34: Passing-Szenario mit ID 196226

Legende: Farbverlauf von Weiß (ältester Zeitstempel) zu Schwarz (neuster Zeitstempel)



Anlage 35: potenzielle Kollisionssituation mit ID 396

ID	Beinahekollision	Kursänderung	Geschwindigkeitsänderung	Regelmissachtung	LMW-Distanz (Risikobewertung)	Unsicherheit	Begegnungskategorie	Besonderheiten
1	Nein	X	X		X		Kreuzungssituation	Fähre
2	Nein	X	X		X		Passiersituation	Schlepper
3	Ja	X	X		X	X	Undefined	
4	Nein	X	X		X		Überholvorgang	Schlepper
5	Nein	X	X		X		Kreuzungssituation	Fähre
6	Ja	X	X	X	X	X	Überholvorgang	
7	Ja	X		X	X		Frontalsituation	
8	Nein	X	X		X		Verfolgung	Schlepper
9	Nein	X	X		X	X	Undefined	Lotse
10	Nein	X	X		X	X	Undefined	Lotse
11	Nein	X	X	X	X	X	Kreuzungssituation	Lotse
12	Nein	X		X	X		Frontalsituation	Fähre
13	Ja	X		X	X		Frontalsituation	
14	Nein	X		X	X	X	Passiersituation	Lotse
15	Nein	X	X	X	X		Überholvorgang	Schlepper
16	Nein	X	X		X		Kreuzungssituation	Fähre
17	Nein	X	X		X	X	Undefined	Lotse
18	Ja	X	X	X	X	X	Frontalsituation	
19	Nein	X	X		X	X	Passiersituation	
20	Ja	X	X	X	X		Frontalsituation	
21	Nein	X	X		X		Überholvorgang	Schlepper
22	Ja	X	X		X	X	Undefined	
23	Nein	X	X	X	X	X	Kreuzungssituation	Lotse
24	Ja	X	X	X	X		Überholvorgang	
25	Nein	X		X	X		Überholvorgang	Schlepper
26	Nein	X	X		X	X	Undefined	
27	Nein	X	X		X		Kreuzungssituation	
28	Nein	X	X	X	X		Überholvorgang	
29	Nein	X	X		X	X	Undefined	Lotse
30	Nein	X	X	X	X		Überholvorgang	
31	Nein		X	X	X		Überholvorgang	
32	Nein	X	X	X	X		Kreuzungssituation	
33	Nein	X	X		X	X	Undefined	Schlepper
34	Nein	X		X	X	X	Kreuzungssituation	Lotse

35	Ja	X		X	X	X	Frontalsituation	
36	Ja	X	X	X	X		Überholvorgang	
37	Nein	X	X		X	X	Undefined	Schlepper
38	Nein	X		X	X		Passiersituation	
39	Ja	X	X		X	X	Undefined	
40	Nein	X	X		X	X	Undefined	Lotse

Anlage 36: Auflistung der Beinahekollisionssituationen für Expertin-Befragung