

Automatisiertes Manövrieren – der Schlüssel zur autonomen Schifffahrt

GALILEOnautic Das Projekt GALILEOnautic, das im Oktober 2018 in die zweite Phase gegangen ist, verfolgt den Ansatz, autonomes Navigieren und optimiertes Manövrieren von kooperierenden Schiffen in sicherheitskritischen Bereichen zu realisieren. Bei den Bereichen handelt es sich um Seegebiete wie Fahrrinnen, Hafen- oder Flachwassergebiete, in denen unter heutigen rechtlichen und technologischen Bedingungen nur manuell manövriert werden darf und kann.

Dr.-Ing. Agnes U. Schubert, Dr.-Ing. Michael Gluch, Dr.-Ing. Michael Baldauf, Prof. Dr.-Ing. Olaf Simanski, Martin Kurowski, Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch

Wenn von autonomer Schifffahrt die Rede ist, entstehen sofort Bilder im Kopf, in denen futuristische Fahrzeuge ohne Brücke den Horizont kreuzen. Die Bilder stammen aus visionären Projektstudien renommierter Hersteller wie Rolls Royce [1] oder Kongsberg [8]. Innerhalb weniger Jahre soll dabei der Prototyp eines autonomen Schiffs entwickelt werden, das tendenziell mit allen Funktionalitäten ausgestattet ist, um sich autonom zu bewegen. Einen Moment später zerplatzen diese Visionen an realitätsnahen Fragen wie dem Handling und der Instandhaltung solcher autonomer Transportsysteme und die Ingenieure beginnen eine nicht enden wollende Auflistung der nötigen Voraussetzungen, um autonome Schifffahrt zu etablieren. Neben den erweiterten Technologien auf dem Fahrzeug selbst ist das vor allem die zusätzliche Ausstattung der digitalen Infrastruktur zur Kommunikation mit den Institutionen an Land oder anderen Fahrzeugen. Viele der bisher initiierten Projekte zu autonomer Schifffahrt konzentrierten sich auf eine Lösung von Begegnungssituationen auf offener See, wobei zumindest

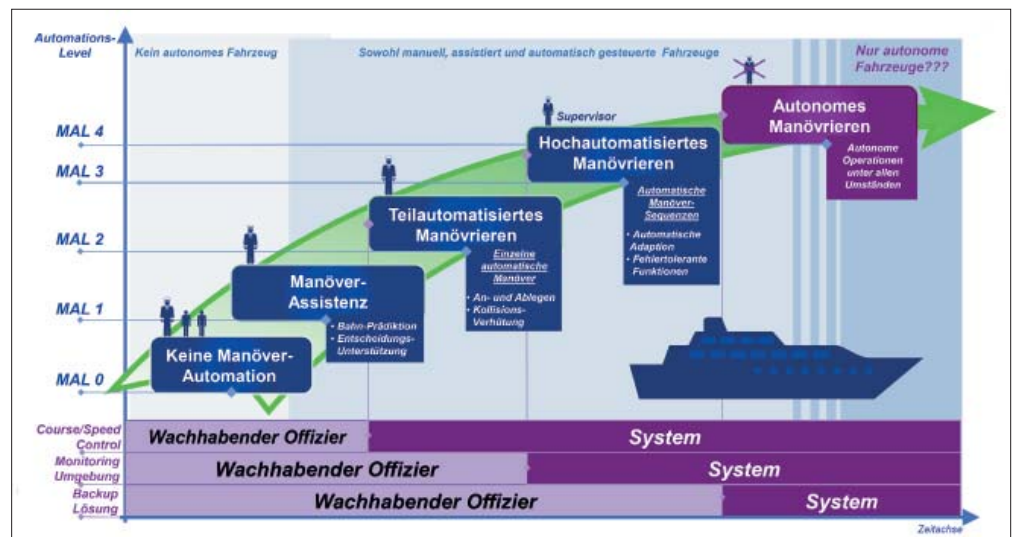


Abb. 1: Klassifizierung der Manöverautomation

ein Teil der Kollisionsverhütungsregeln (KVR) beachtet wird. Das automatische Manövrieren in küstennahen Gebieten oder zur Hafenansteuerung war bislang hingegen kaum Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Das Projekt GALILEOnautic ist im Oktober 2018 in die zweite Phase gegangen und verfolgt eben diesen Ansatz, autonomes Navigieren und optimiertes Manövrieren von kooperierenden Schiffen in sicherheitskritischen Bereichen zu realisieren. Bei diesen

Bereichen handelt es sich um Seegebiete wie Fahrrinnen, Hafen- oder Flachwassergebiete, in denen unter heutigen rechtlichen und technologischen Bedingungen nur manuell manövriert werden darf und kann. Dieser bewusst gesetzte Fokus beruht auf der Hypothese, dass die eigentliche Herausforderung für die autonome Schifffahrt die automatische Lösung für diese bis heute manuell ausgeführte Manöverfahrt ist. Beteiligte Projektpartner seit der ersten Phase sind neben der Universität Rostock und

der Hochschule Wismar die RWTH Aachen, die Universität Bremen sowie die SCISYS Deutschland GmbH. Ab Phase 2 sind weitere Industrieanwendungen dazugekommen. Anders als auf offener See, wo Auto- oder Trackpiloten Anwendung finden können, müssen in sicherheitskritischen Seegebieten zahlreiche weitere Restriktionen beim Manövrieren beachtet werden. Das beginnt mit dem aufgrund von Topologie, Seezeichen, Bauwerken oder Schutzgebieten begrenzten Manöverraum, der

durch höheres Verkehrsaufkommen weiter limitiert sein kann. Eine weitere Einschränkung stellt die in Hafengebieten erlaubte Geschwindigkeit dar, die je nach Aktuatorik Einfluss auf die Manövrierfähigkeit des Schiffes hat. Hinzu kommt, dass die Schiffsdynamik bei geringen Geschwindigkeiten oder gar bei einem Wechsel in die Rückwärtsfahrt nur unzureichend beschrieben ist, sodass die modelltheoretische Basis für die Automatisierung fehlt. Lage und Bebauung des Hafens entscheiden zudem darüber, welche zusätzlichen Effekte aus der Umgebung für die Schiffsbewegung wie berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören u.a. Windabschattungen, Strömungen, Banking- und Flachwassereffekte.

Wird beispielsweise ein lotsenbefreites Schiff manuell vom wachhabenden Offizier in den Hafen gesteuert, sind die Präzision der Manöver und deren Dauer sehr stark von den Erfahrungen des Offiziers und seinem mentalen Modell der Schiffsbewegung abhängig. Er wird dabei meist von weiteren Personen mit Informationen unterstützt, die er von seinem Standort nicht sehen kann oder die mit größerer Genauigkeit angesagt werden, wie etwa der Abstand des Hecks zur Pier. Unter moderaten Wetter- und Verkehrsbedingungen ist die Navigation im Hafen in der Regel keine große Herausforderung. Die Schwierigkeiten beginnen mit schlechten Sichtverhältnissen oder extremen Wetterbedingungen, für die es kaum Erfahrungswerte gibt.

Im Projekt GALILEO-nautic wurde die schrittweise Automation eines in Betrieb befindlichen Schiffes konzipiert. Dieser Ansatz hat neben der erheblichen Entzerrung der Finanzierung eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Ziel, ad hoc einen autonomen Prototypen zu entwickeln. Die Komplexität der Gesamtauf-

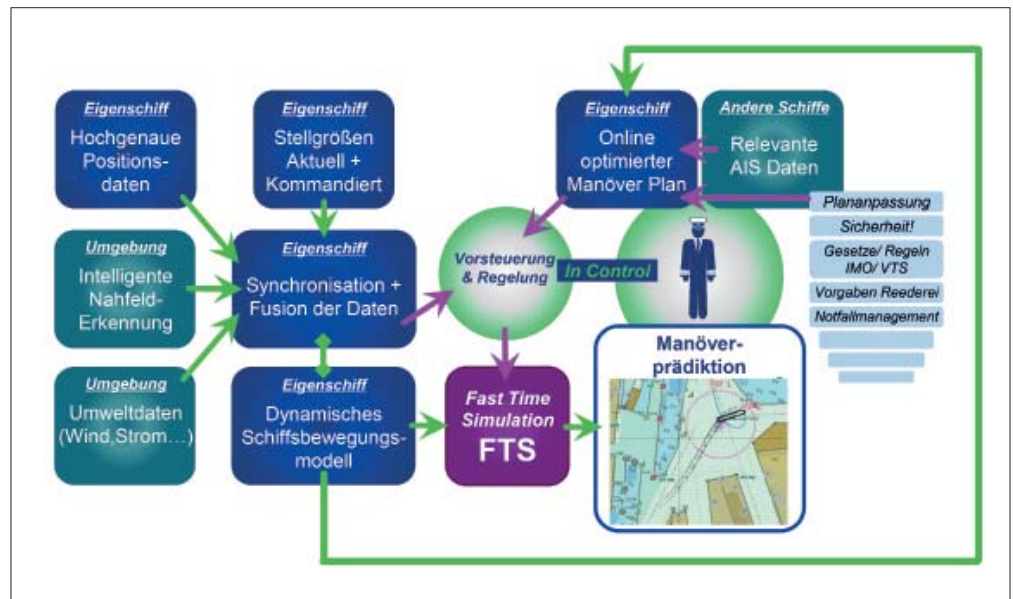


Abb. 2: Systemstruktur in Manöver-Automation-Level 2

gabe wird in überschaubare Teilfunktionalitäten gesplittet, die in aktuell rechtlich und technologisch realisierbaren Nahzielen manifestiert werden können. Die Automation beginnt, wie in Abb. 1 dargestellt ist, mit der Manöverassistenz in MAL1 (Manoeuvre Automation Level), geht über zu einzelnen automatisierten Manövern (MAL2) bis hin zu vollständigen Manöversequenzen (MAL3), die der wachhabende Offizier als Supervisor initialisiert und beendet. Bereits etablierte Automationsfunktionen dienen als sichere Rückfallebene für die nächste Erweiterung des automatischen Systems. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die nautischen Offiziere die Anwendung der neuen Tools bereits ab der ersten Ausbaustufe, der Manöverassistenz, trainieren. Gleichzeitig kann aus der praktischen Applikation abgeleitet werden, wie die ÜbergabeprozEDUREN zwischen manueller und automatisierter Funktionsweise ablaufen sollten. Das visionäre Ziel „Autonomes Manövrieren“ (MAL4) bedeutet, dass alle Manöver unter allen Umständen ohne einen nautischen Offizier weder an Bord noch an

Land automatisch sicher und effektiv absolviert werden.

Analyse auf Scandlines-Fähre

Die Konzeptentwicklung begann im Projekt mit der Analyse des manuellen Manövrierens auf einer Fähre der kooperierenden Reederei Scandlines. Mittels eines Fragebogens wurde festgestellt, welche individuellen Unterschiede es dabei gibt, welche Messgrößen wie häufig verwendet, welche Werte beim Blick aus dem Fenster geschätzt werden oder welche Informationen fehlen. Außerdem wurde nach der Aufbereitung der

Informationen gefragt, welche Genauigkeit erforderlich ist oder ob 2D- oder 3D-Darstellungen für die Schiffsbewegung bevorzugt werden. Durch diese Untersuchung fließt das Expertenwissen der Nautiker direkt in die Gestaltung des Assistenzsystems ein und die Prioritäten in der Entwicklung können klarer strukturiert werden.

Erste Konsequenz aus der Analyse ist deshalb die Konzeption eines personalisierbaren Manöverassistenzsystems (MAS). Die Manöverassistenz (MAL1) ist in erster Linie durch zusätzliche, manöverspezifische Infor-

SEIL HERING

- Drahtseile • Tauwerk • Festmacher
- CASAR Bordkranselle • Anschlagmittel
- Prüflasttest bis 1.000 t
- Segelmacherei • Takelerei • Montage

Walter Hering KG
Porgesing 25
22113 Hamburg

Telefon: 040 - 73 61 72 - 0
eMail: info@seil-hering.de
www.seil-hering.de

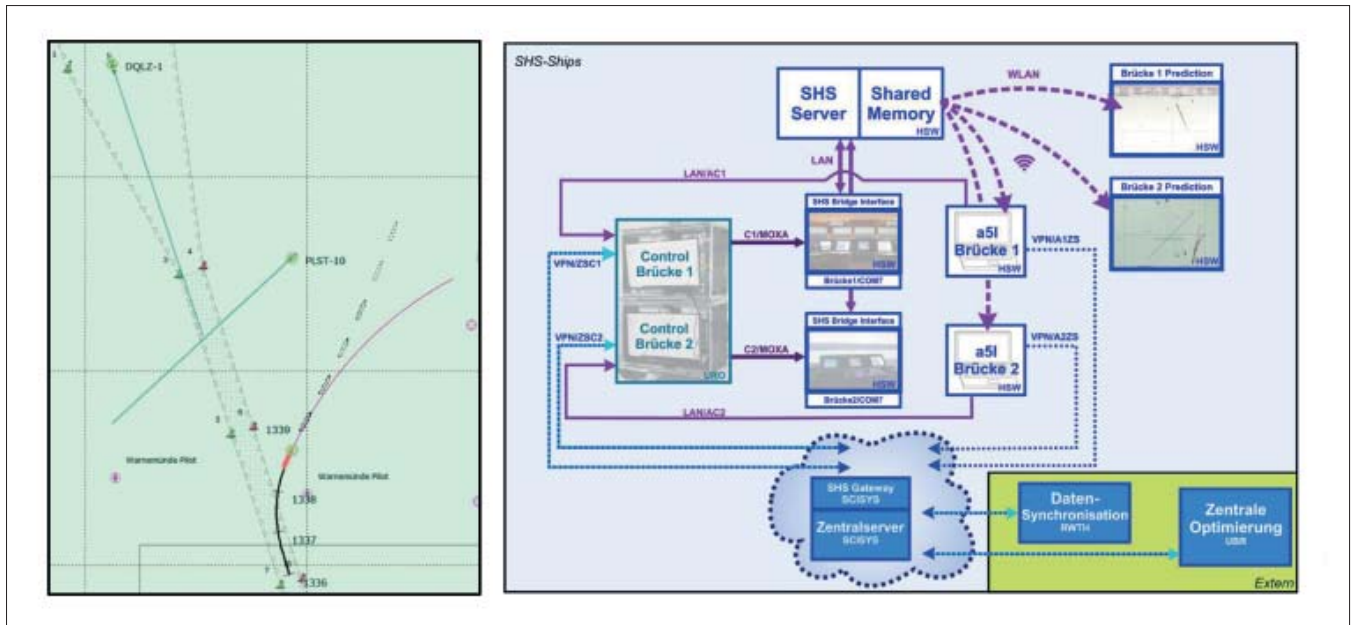


Abb. 3: SHS-Szenario – ECDIS-Ansicht und Kommunikationsstruktur zur Demonstration der kooperativen automatisierten Bahnführung

mationen charakterisiert, die den wachhabenden Offizier beim manuellen Manövrieren unterstützen. Zentrales Werkzeug des MAS ist die Manöverprädiktion basierend auf Fast-Time-Simulation (FTS) des Schiffsdynamikmodells. In einem zwischen 1-24 Minuten wählbaren Zeithorizont wird in der ECDIS die zukünftige Bewegung des Schiffes visualisiert, die aus den aktuellen händischen Stellgrößen für die Antriebs- und Steuerorgane, den Zustandsgrößen sowie den Einflusskräften aus der Umgebung resultiert [2]. Diese Prädiktion – visualisiert mittels eingblendeter Schiffskonturen – zeigt dem wachhabenden Offizier, ob die kommandierten Werte in der aktuellen Situation ausreichen. Im Falle einer Abweichung von dem mentalen Manöverziel können frühzeitig Korrekturen vorgenommen werden. Durch den zielgerichteten Einsatz der Stellgrößen (Ruderlage, EOT usw.) bzw. das konsequente Einhalten geplanter Manöverpunkte kann die Effektivität wesentlich erhöht werden. Die Prädiktion setzt ein schiffsspezifisches Bewegungsmodell sowie die On-

line-Verfügbarkeit der benötigten Messgrößen für Schiff und Umgebung mit zuverlässiger Genauigkeit als Grundpfeiler für die Automation voraus. Deshalb muss bereits für die Manöverassistenz das Sensornetzwerk eines Schiffes erheblich erweitert werden. Die Genauigkeit des Kartenmaterials und der herkömmlichen Sensoren an Bord eignet sich für das automatisierte Manövrieren in sicherheitskritischen Bereichen nur bedingt. Standardmäßig wird hier auf Sicht gefahren. Um sich in einer Hafenumgebung sicher automatisch bewegen zu können, ist zusätzliche Sensorik insbesondere für das Nahfeld erforderlich. Rund um das Schiff müssen die Abstände zu den Hafenanlagen oder anderen Fahrzeugen auch bei schwierigen Wetterbedingungen gemessen werden, um dem Nautiker vertrauenswürdige Informationen zu liefern. Dafür kommen verschiedene Technologien in Frage, wie sie zum Teil aus der Autoindustrie bekannt sind. Die auf vielen Schiffen bereits vorhandenen Kameras können durch Lidar- und Radarsensoren oder auch

spezielle Kameras für den Infrarotbereich ergänzt werden. In der ersten Phase von GALILEOnautic wurde ein kombiniertes Sensorsystem aus Lidar- und Radar-Komponenten für ein kleines Unmanned Surface Vehicle (USV) entwickelt und erfolgreich getestet. In der zweiten Phase soll das System an die Größe einer Fähre adaptiert werden, sodass Objekte im Umkreis von 40 m mit einer Genauigkeit von 5 cm um das Schiff detektiert werden. Im Abgleich mit Karten- und AIS-Daten können die gemessenen Punktwolken fixen und beweglichen Objekten mittels Datenfusion zugeordnet werden. Die erkannten Objekte werden zur Optimierung der geplanten Bahn benutzt, die ebenfalls im MAS visualisiert wird. Zur Manöverassistenz gehören neben der Bewegungsprädiktion auch Funktionen, die eine Analyse des eigenen Fahrverhaltens und eine Offline-Optimierung ermöglichen. In Zusammenarbeit mit dem Projekt MEmBran, das sich der Modellierung der Maschinenprozesse widmet, entsteht ein Softwaresystem, das eine effiziente Schiffsführung

mit umweltverträglichem Manöverbetrieb ermöglicht [3]. In MAL 2, dem teilautomatisierten Manövrieren, wird die reine Assistenz um automatische Fahrfunktionen erweitert. Das heißt im Wesentlichen, dass die hochgenau gemessene Ist-Position kontinuierlich mit der geplanten Soll-Bahn verglichen wird und ein Regler die Abweichung automatisch minimiert. Im Rahmen von GALILEOnautic wurde für die Reglersynthese ein generisches Modell entwickelt, das einfache Strukturen aufweist und die komplexen, schiffsspezifischen Nichtlinearitäten mit Kennfeldern abbildet [6]. Aufgrund seiner simplen Struktur kann es implizit in einem Steuerungsentwurf berücksichtigt werden, sodass die Aufgabe des Reglers vorrangig darauf abzielt, die Abweichungen durch Störungen und Modellungenauigkeiten zu reduzieren. Die Wirksamkeit der Vorsteuerung richtet sich folglich nach der Güte des Modells. Für das Reglermodul kommt eine hybride Struktur zum Einsatz, die nach Operationsmodi in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und den klassifizierten Umgebungsbe-

dingungen unterscheidet. Für Schiffe ohne dynamisches Positioniersystem sind die grundlegenden Bereiche Transitfahrt und Manöverfahrt interessant. Die Manöverfahrt im Hafen ist durch kleine Geschwindigkeiten mit Rückwärtsfahrt, Drehen des Schiffs oder gegebenenfalls das Traversieren unter Einsatz aller Antriebs- und Steuermodule gekennzeichnet. Aufgrund des beschränkten Manöverraums muss die Regelung für die Manöverfahrt gutes Folgeverhalten und besondere Robustheit gegenüber Störungen verbinden.

Die fusionierten Sensorwerte werden neben der Regelung auch der modellbasierten Bahnoptimierung zur Verfügung gestellt (Abb. 2). Zusätzlich zu den Daten für die Schiffsbewegung sowie aller Einflussgrößen aus der Umgebung werden in der Optimierung auch die AIS-Daten anderer Verkehrsteilnehmer, die lokalen Regularien und Karteninformationen verarbeitet, sodass die vorab digital geplanten Manöver der aktuellen Situation angepasst werden. Diese automatische Optimierung modifiziert die Vorsteuerung. Die Ausgangsgrößen des Reglers bzw. der Allokation werden wie die manuellen Stellgrößen bei der Manöverassistenz für die Prädiktion der zukünftigen Schiffsbewegung genutzt, sodass der nautische Offizier die Regelung überwachen kann und gegebenenfalls manuell interveniert. Beispiele für teilautomatisiertes Manövrieren in MAL2 sind einzelne automatische Manöver wie automatisches An- und Ablegen oder Ausweichmanöver zur Kollisionsverhütung.

Die Ausbaustufe MAL2 wurde im Projekt GALILEONautic mit allen aufgeführten Komponenten mit zwei Szenarien demonstriert: Zum einen im Ship-Handling-Simulator (SHS) der Hochschule Wismar, wobei sich zwei Fähren in der Fahrrinne zum Hafen Rostock

begegnen (Abb. 3). Die Bahnen beider Schiffe werden kooperierend geregelt. Die Begegnung wird durch ein weiteres Schiff gestört, das von Nordost in die Fahrrinne einfährt. Die auslaufende Fähre mit ausreichender Wassertiefe leitet ein automatisches Ausweichmanöver ein, bei dem sowohl die AIS-Daten der zwei anderen Schiffe und die resultierenden CPA und TCPA als auch die Tonnenpositionen beachtet werden [4]. Das zweite Szenario wurde mit zwei USVs (Unmanned Surface Vehicle) im Rostocker Hafen demonstriert, die koordiniert

automatisch einem störenden Schlauchboot ausweichen, wie in Abb. 4 dargestellt [5] (siehe auch Schiff&Hafen, September-Ausgabe 2018).

Wesentlicher Bestandteil der Manöverautomatisierung ist die Überwachung der Funktionstüchtigkeit aller Module in Aktorik und Sensorik, die an der Bewegungssteuerung beteiligt sind, sowie alternative Konzepte für den Fehlerfall. Um das automatisierte Gesamtsystem in den Hauptkomponenten zu beschreiben, bedient man sich deshalb der ingenieurtechnischen Begriffe, wie sie primär

aus der Raumfahrt bekannt sind: Guidance (Führung), Navigation und Control (Regelung) – GNC. Unter Guidance fallen die Komponenten, über die das geplante Ziel bzw. die geplante Bahn an das System übergeben wird sowie definierte Methoden, um das Fahrzeug mit seinen Bewegungsgrößen auf dieser Bahn zu halten. Für ein autonomes Fahrzeug muss die geplante Bahn kontinuierlich entsprechend der aktuellen Umgebungsbedingungen optimiert werden. Zur Navigation beim automatischen Abfahren einer Bahn bedarf es vor allem hochgenauer Sensorik, um Position, Lage und Abstände zu anderen Objekten im Zentimeter-Bereich zu erfassen. Weiterhin müssen die Umgebungsbedingungen mit Einfluss auf die Schiffsbewegung an ausreichend vielen Angriffspunkten gemessen oder modellbasiert geschätzt werden. Die heterogenen Sensordaten sind vor der Nutzung im System zu synchronisieren und zu fusionieren. Die Regelung ist dafür verantwortlich, die durch Störungen hervorgerufene Differenz zwischen optimierter Soll- und aktueller Ist-Bahn zu minimieren sowie die Bewegung stabil zu halten. Die Ausgangsgrößen des Reglers, Kräfte und Momente werden über die Allokation auf die Antriebs- und Steuerorgane verteilt.

In den höheren Automationsstufen müssen Systemfehler oder Leistungsabfälle automatisch erkannt und wenn möglich ausgeglichen werden, um das aktuelle Manöver dennoch sicher auszuführen [7]. Alternative Konzepte beruhen deshalb auf einer Redundanz in der Aktorik, sodass die erforderlichen Kräfte und Momente durch andere Module aufgebracht werden können. Ähnlich, wenn auch weniger aufwendig, erfolgt eine automatische Fehlerbehandlung bei einem Sensordefekt. Die Messwerte werden bei der Datenfusion kontinuier-

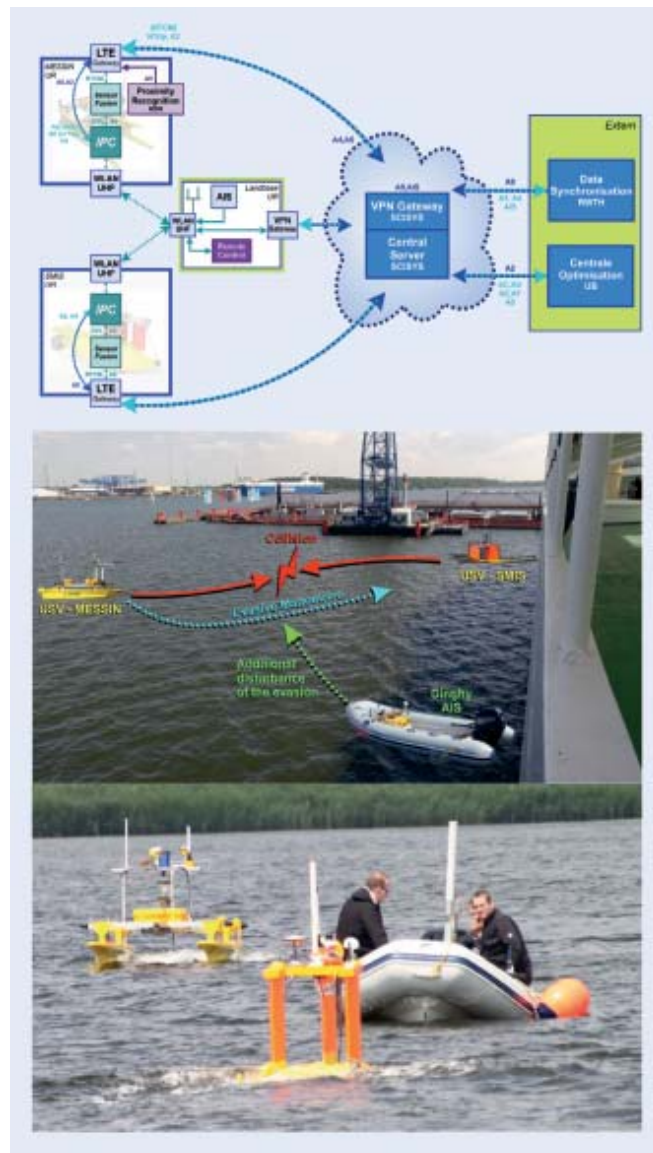


Abb. 4: USV-Szenario – Konzeption und Kommunikationsstruktur zur Demonstration der kooperativen automatisierten Bahnführung

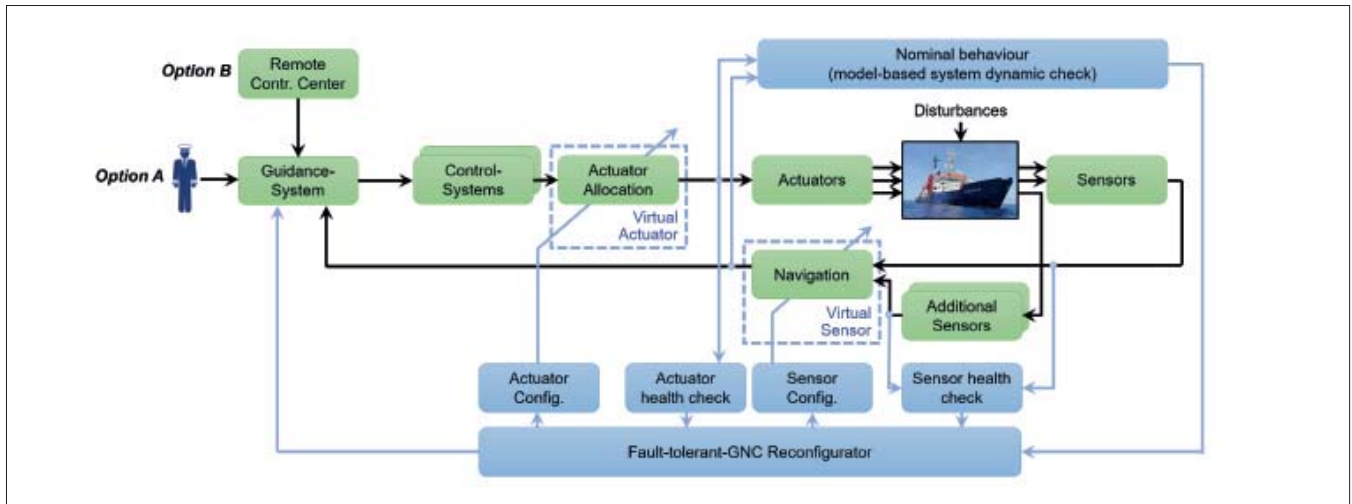


Abb. 5: Fehlertoleranter Guidance-Navigation-Control (GNC) Reconfigurator

lich auf Plausibilität überprüft, sodass unwahrscheinliche Werte z.B. für die Position durch eine niedrige Gewichtung nicht berücksichtigt werden. Außerdem können verschiedene Sensorwerte aus anderen deduziert werden, wie etwa die Geschwindigkeit über Grund aus der Positionsänderung. Für die höheren Automatisierungsstufen kann dieses fehlertolerante GNC-System in einem Reconfigurator umgesetzt werden. Aktoren, Sensoren sowie das Systemverhalten werden kontinuierlich überwacht. Bei atypischem Systemverhalten wird die applizierte Konfiguration automatisch verändert, um das ursprünglich geplante Ziel des Manövers dennoch zu erreichen. Im Extremfall, wenn das System so stark gestört ist, dass der ursprüngliche Plan nicht mehr realisiert werden kann, muss das Manöverziel automatisch über Schiffsführung (Guidance) soweit reduziert werden, dass ein stabiler Ruhezustand des Systems hergestellt wird.

Die Automationsstufe MAL3, hochautomatisiertes Manövrieren, stellt die unmittelbare Vorstufe zum Autonomen Manövrieren (MAL4) dar. Der einzige Unterschied zwischen MAL3 und 4 besteht darin, dass sich noch ein Super-

visor an Bord befindet bzw. in einer weiteren Ausbaustufe an Land in einem Remote Operation Center. Die primär geplanten Manöversequenzen sollen nach nautischen Algorithmen, entsprechend der KVR und der lokalen Vorschriften in der aktuellen Situation optimiert werden. Dabei ist es sinnvoll, diese Automationsstufe zunächst auf ein definiertes geografisches Gebiet zu beschränken, in dem alle Gegebenheiten bekannt und modelliert sind. Naheliegendes Beispiel ist deshalb eine Fährverbindung. Die geplante Route mit den angesteuerten Häfen ändert sich nicht, muss aber an die aktuellen Wetterbedingungen und das Verkehrsaufkommen angepasst werden. Die Optimierung kann anhand von definierten Kriterien erfolgen, die sich nach erhöhter Sicherheit, minimierten Energieverbrauch oder Emission oder auch der vorgegebenen Ankunftszeit richten können. Der Supervisor überwacht die automatische Fahrt und muss intervenieren, wenn das System eine Situation nicht umsetzen kann. Dabei stehen ihm die etablierten Funktionalitäten aus den unteren Automationsstufen zur Verfügung, die er sicher beherrschen muss. Die manuelle Schiffsführung sollte die letzte Option sein.

Der kurze Abriss der aufeinander folgenden Entwicklungsschritte verdeutlicht die umfangreichen konzeptionellen und technologischen Innovationen, die nicht nur für die autonome Schifffahrt, sondern bereits für einzelne automatische Manöverfunktionen nötig sind. Die schrittweise Automation geht daher vermutlich in einem konservativen Tempo, aber mit großem Respekt für die anspruchsvolle Profession des nautischen Offiziers einher. Offensichtlich ist auch, dass ein hochautomatisiertes Fahrzeug nicht in exklusiven Gebieten operiert, sondern sich in einem Kontext mit Fahrzeugen unterschiedlichster technischer Ausstattung bewegt. Demnach muss es nach den gleichen Regeln manövrieren und sowohl mit den anderen Verkehrsteilnehmern als auch mit den Institutionen an Land verständlich kommunizieren. Automation in der Schifffahrt ist eine große Herausforderung, die nur in einer engen Zusammenarbeit von Ingenieuren und nautischen Experten zu meistern ist. Aber auch wenn es ein sehr visionäres Fernziel ist, kann die Schifffahrt schon heute von den schrittweisen Innovationen auf dem Weg dorthin profitieren, weil sie dadurch sicherer, sauberer und effizienter werden kann.

Literatur

[1] AAWA, Remote and autonomous ships: the next steps. London: Rolls-Royce, 2016
 [2] Baldauf, M.; Benedict, K.; Simulations for Ship Handling, Port & Technology International, Henley Media Group, London, Edition 77, Spring 2018
 [3] Baldauf M, Mehdi R., Schaub M, Benedict K, Milbradt G, Finger G, Fischer S Simulation-based Support to Minimize Emissions and Improve Energy Efficiency of Ship Operations. In: Ölcer A et al (eds) Trends and Challenges in Maritime Energy Management. Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-74576-3_2018
 [4] Fischer, S.; Gluch, M.; Benedict, K.; Klaes, S.; Krüger, C.; Baldauf, M.: Application of Fast Time Manoeuvring Simulation for Training of Challenging Situations in Voyage Planning at Arrival & Departure and for Collision Avoidance. 20th International Navigation Simulator Lecturers' Conference; Auckland (New Zealand), September 10-13, 2018
 [5] Kurowski M., Damerius R., Jeinsch T.: "Generic Navigation and Control Methods for Classes of Unmanned Surface Vehicles", MTS/IEEE OCEANS'18 Conference, Kobe, Japan, May 28-31, 2018
 [6] Kurowski M., Schubert A.U., Jeinsch T., Generic Control Strategy for Future Autonomous Ship Operations. 16th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), Cardiff/ UK, pp. 401-412, 2017
 [7] Schubert A.U., Kurowski M., Gluch M., Simanski O., Jeinsch T., Manoeuvring Automation towards Autonomous Shipping, 14th International Naval Engineering Conference INEC, Glasgow/ UK, October 2-4, 2018
 [8] YARA Birkeland Kongsberg project facts <https://www.km.kongsberg.com>, 2017

Die Autoren:

Dr.-Ing. Agnes U. Schubert, Dr.-Ing. Michael Gluch, Dr.-Ing. Michael Baldauf, Prof. Dr.-Ing. Olaf Simanski, Hochschule Wismar, und Dipl.-Ing. Martin Kurowski, Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch, Universität Rostock

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie beim Projektträger DLR für die Förderung und Unterstützung des Projektes GALILEOnautic unter dem Kennzeichen FKZ 50NA1612. Ein besonderer Dank gilt zudem der Scandlines Deutschland GmbH für die profunde Unterstützung.