

# Autonome Wasserfahrzeuge



Forschungskatamaran MS Wavelab  
(CAPTN/Bevis Nickel)

Technologiedossier

Nr.3 / Mai 2026

Dr. Filipe Mello Rose

# Abbildungsverzeichnis

S.1, 13, *Bild*: Forschungskatamaran MS Wavelab (CAPTN/Bevis Nickel)

S.6, *Abbildung 1*: Säulendiagramm zu den Erscheinungsjahren der Publikationen aus dem Scoping

S.7, *Abbildung 2*: Säulendiagramm zum Vorkommen der sozioökologischen Dimensionen in den Scoping-Ergebnissen

S.10, *Bild*: Taufe der MS „Wavelab“ im Februar 2023 (Ann-Christin Wimber/CAPTN Initiative)

S.15, *Bild*: CAPTN Vaiaro – Entwurf: Floating Platform (Vincent Steinhart-Besser, Simeon Ortmüller / Muthesius Kunsthochschule)

# Inhalt

**01**

**Einleitung in die  
Technologie**

S.5

**05**

**Akzeptanz und  
Konfliktpotenzial**

S.12

**02**

**Möglicher  
Klimaschutzbeitrag**

S.8

**06**

**Regulatorische  
Hebel und  
Steuerungsbedarfe**

S.14

**03**

**Wirtschaftliche  
Relevanz**

S.9

**07**

**Empfehlungen zur  
Forschungsagenda**

S.16

**04**

**Reifegrad und  
Skalierbarkeit**

S.11

**08**

**Referenzen**

S.20

# Zusammenfassung

Autonome Wasserfahrzeuge sind Teil eines umfassenden Transformationsprozesses in der maritimen und binnenschifffahrtsbezogenen Mobilität. Während zentrale technologische Komponenten wie Sensorik, Navigation und Steuerungssysteme bereits in fortgeschrittenen Demonstrationsprojekten erprobt werden, liegen die eigentlichen Herausforderungen im Übergang zu einem stabilen und skalierbaren Regelbetrieb.

Im Hinblick auf den Klimaschutz liegt ein mäßiges Potenzial autonomer Wasserfahrzeuge primär in der systemischen Integration in bestehende Mobilitätssysteme, die dadurch zuverlässiger und kostengünstiger werden können. Darüber hinaus kann Automatisierung durch optimierte Trajektorien, adaptive Geschwindigkeiten und bedarfsgerechte Betriebsmodelle zu Effizienzgewinnen führen. Die Standortrelevanz für Deutschland ergibt sich derzeit vor allem aus einer starken Forschungs- und Demonstrationslandschaft. Ein breiter Markthochlauf ist bislang nicht erkennbar, jedoch bestehen mittelfristige Potenziale für Wertschöpfung in den Bereichen Systemintegration, maritime Sensor- und Steuerungstechnologien sowie Logistiklösungen.

Der technologische Reifegrad ist durch eine fortgeschrittene Test- und Demonstrationsphase gekennzeichnet. Funktionsfähige Prototypen existieren, jedoch bestehen erhebliche Herausforderungen insbesondere in der zuverlässigen Wahrnehmung komplexer Umgebungen, der Datengenerierung sowie der Systemintegration unter realen Betriebsbedingungen. Der Reifegrad wird anhand der unterschiedlichen Anwendungsfälle deutlich. Einfache Flussquerungen bei geringem Durchgangsverkehr sind technologisch umsetzbar und können wichtige Betriebsdaten generieren. Im Gegensatz dazu sind komplexere Fahrten auf offenen oder stark frequentierten Gewässern noch weit von einem Regelbetrieb entfernt. Hier bestehen weiterhin Herausforderungen, etwa im Bereich der Kommunikation zwischen Menschen und Maschinen.

Die Konflikt- und Gerechtigkeitsintensität ist bislang vergleichsweise gering ausgeprägt. Die Forschung konzentriert sich vor allem auf Sicherheits- und Risikoakzeptanz. Gleichzeitig zeigen Interviews, dass insbesondere Fragen der Akzeptanz durch Personal und Nutzer sowie die zukünftige soziale Rolle des Bordpersonals zentrale Herausforderungen darstellen. Der regulatorische Rahmen stellt aktuell den zentralen Engpass dar. Unklare Zuständigkeiten, fehlende Genehmigungsverfahren sowie die notwendige Anpassung bestehender Normen an autonome Systeme erschweren den Übergang vom Demonstrator zum Regelbetrieb erheblich.

Vor diesem Hintergrund leitet das Dossier fünf zentrale Handlungsempfehlungen ab: Erstens ist eine systematische Erhebung und Bereitstellung von Realdaten erforderlich, da diese die Grundlage für Entwicklung, Validierung und Zulassung bilden. Zweitens müssen geeignete Sicherheits- und Zertifizierungsverfahren entwickelt werden, die insbesondere softwarebasierte und adaptive Systeme berücksichtigen. Drittens bedarf es gezielter Forschung zum Übergang in den Regelbetrieb, insbesondere durch die Erprobung einfacher, niedrigkomplexer Anwendungsszenarien. Viertens sollte die fragmentierte Forschungslandschaft durch ein übergeordnetes Synthesenetzwerk stärker gebündelt werden, um Wissen zu systematisieren und Skalierung zu ermöglichen. Fünftens ist die partizipative Einbindung von Mitarbeitenden, Betreiberunternehmen und Passagieren entscheidend, um Akzeptanz zu fördern und Systeme an reale Betriebsbedingungen anzupassen.

Insgesamt zeigt sich, dass autonome Wasserfahrzeuge weniger ein rein technologisches Innovationsfeld darstellen, sondern ein komplexes sozio-technisches System, dessen erfolgreiche Implementierung maßgeblich von der Integration technischer, regulatorischer und gesellschaftlicher Dimensionen abhängt.

# Einleitung in die Technologie

# 01

Autonome Wasserfahrzeuge sind Teil eines breiteren technologischen Transformationsprozesses in der maritimen und binnenschifffahrtsbezogenen Navigation. Unter autonomen Wasserfahrzeugen werden Schiffe und Boote verstanden, die mithilfe digitaler Sensorik, automatisierter Navigationssysteme und algorithmischer Entscheidungslogiken teilweise oder vollständig ohne kontinuierliche manuelle Steuerung betrieben werden. Die Ausprägungen reichen von automatisierten Assistenzsystemen mit menschlicher Aufsicht über fernüberwachte Betriebsmodelle bis hin zu perspektivisch vollautonomen Systemen. Technologische Grundlage sind integrierte Sensorkonzepte (z. B. Radar, Kamera, Lidar, AIS), Zustands- und Positionsschätzung, softwarebasierte Trajektorienplanung sowie Kommunikationsschnittstellen zur Einbindung in Verkehrsleit- und Kontrollzentren.

Im Unterschied zum autonomen Straßenverkehr muss die automatisierte oder autonome Schifffahrt zusätzliche Schwierigkeiten überwinden, um einen ausreichenden Reifegrad zu erreichen. Dies betrifft die generelle Trägheit von Wasserfahrzeugen bzw. die Schwierigkeit, unmittelbar die Wirksamkeit von Manövern zu erfahren sowie die Notwendigkeit, permanent situationsabhängig auf dynamische Umweltbedingungen (z. B. Wetter, Strömung) zu reagieren. Darüber hinaus ist die Navigation in der Schifffahrt im Vergleich zum Straßenverkehr oft weniger regelbasiert und stärker von der direkten (funkbasierten) Kommunikation zwischen der menschlichen Steuerung in und außerhalb von Wasserfahrzeugen abhängig. Darüber hinaus ist die Objekterkennung deutlich komplexer. Weite Teile von Wasserfahrzeugen befinden sich unter der Wasserlinie, was andere Sensorik erfordert und Wellen können den z. T. niedrigen Schiffsbereich oberhalb der Wasserlinie verdecken und schwieriger erkennbar machen. Diese Faktoren erhöhen die technologische Komplexität und stellen besondere technologische Anforderungen an effiziente und sichere Wahrnehmungstechniken, Entscheidungslogiken und Kommunikationsformen.

In Deutschland befindet sich das Technologiefeld derzeit überwiegend im Stadium von Forschungs-, Test- und Demonstrationsprojekten. Besonders sichtbar sind Initiativen in Norddeutschland. Das Projekt CAPTN in Kiel testet autonome Wasserfahrzeuge explizit als Bestandteil intermodaler ÖPNV-Systeme. Das Projekt AutoFerry erprobt die technischen Grundlagen einer autonomen Fähre im Küstenbereich der Ostsee. Das Reallabor Schuppi autonom in Bremerhaven forschte an der technischen und regulatorischen Weiterentwicklung unter realen Hafenbedingungen und bewies eine technische Machbarkeit. Mittlerweile konzentriert sich das Projekt auf die Etablierung eines nationalen Zulassungspfades für remote und zukünftig autonom agierende Oberflächenfahrzeuge im Binnenbereich. Diese Projekte repräsentieren unterschiedliche Entwicklungslogiken von systemischen Mobilitätskonzepten<sup>1</sup> über experimentelle Reallabore bis hin zu betriebsnahen Demonstratoren und verdeutlichen die Breite, aber auch die Fragmentierung der deutschen Forschungs- und Innovationslandschaft. Ein regulärer autonomer Betrieb im Personen- und Güterverkehr existiert bislang im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern nicht.

Im Zentrum der aktuellen Forschungs- und Demonstrationslandschaft stehen dabei insbesondere liniengebundene Personenfähren sowie weitere Anwendungen mit kontrollierten Einsatzbedingungen mit klar definierten Routen, begrenzten Geschwindigkeiten und überschaubaren Verkehrssituationen bzw. der Möglichkeit, etwaigen Verkehr am Anleger abzuwarten. Diese Anwendungen gelten als besonders geeignet für erste Umsetzungen, da sie technisch und regulatorisch weniger komplex sind und sich zugleich gut in bestehende öffentliche Verkehrssysteme integrieren lassen. Darüber hinaus umfasst das Technologiefeld auch Anwendungen in der gewerblichen Binnenschifffahrt, etwa autonome oder teilautonome

1. Das „autonomous electric water taxi“ wird als ein zentraler Baustein einer intermodalen ÖPNV-Strategie für Kiel beschrieben. Quelle: <https://www.shippax.com/en/press-releases/autonomous-electric-water-taxis-a-key-part-of-kiels-next-gen-intermodal-public-transport-plans.aspx>

Container-Feeder und logistikbezogene Transportlösungen. Diese versprechen potenziell höhere wirtschaftliche Effekte, sind jedoch mit deutlich komplexeren Anforderungen an Navigation und Systemintegration verbunden. Entsprechend befinden sich solche Anwendungen überwiegend in frühen Konzept- und Simulationsphasen. Im Gegensatz dazu stellen automatisierte oder gar vollautonome Binnenfähren eine wichtige Brücke zwischen experimentellen Demonstratoren und potenziellen ersten Regelanwendungen dar. Diese Anwendungen verfolgen einen schrittweisen Automatisierungsansatz und fokussieren sich auf konkrete Betriebsfunktionen wie Trajektorienplanung, Manöverunterstützung oder energieeffiziente Navigation. Teilautomatisierte Binnenfähren zeigen jedoch zugleich die Grenzen aktueller Systeme im Hinblick auf Robustheit, Sicherheit und regulatorische Einbindung.

Insgesamt zeigt sich, dass die deutsche Forschungslandschaft stark auf vergleichsweise niedrigkomplexe, klar abgegrenzte Einsatzszenarien fokussiert ist, insbesondere im Fähr- und Hafenkontext. Komplexere Anwendungen mit freier Navigation oder großräumigen Logistiknetzwerken bleiben hingegen bislang überwiegend auf konzeptionelle oder experimentelle Ansätze beschränkt.

Methodisch basiert dieses Technologiedossier auf einer Kombination aus systematischer Literaturliteraturauswertung (Scoping-Review) und qualitativen Experteneinschätzungen. Aufbauend auf einem ganzheitlichen, transdisziplinären Ansatz wurden fünf zentrale Dimensionen der sozial-ökologischen Transformation hin zu einer klimaneutralen Mobilität konzeptionell abgegrenzt: möglicher Klimaschutzbeitrag, wirtschaftliche Relevanz, Reifegrad, gesellschaftliche Akzeptanz und regulatorische Rahmenbedingungen. Im Rahmen des Scopings wurden wissenschaftliche Publikationen und weitere relevante Quellen mit Bezug zu Deutschland identifiziert, gescreent und entlang fünf eigens konzipierten sozial-ökologischen Transformationsdimensionen ausgewertet.

Die Scoping-Analyse mit Screening der Forschungsliteratur mit Bezug zu Deutschland identifizierte 42 Einträge, von denen 29 nach Sichtung von Titel und Abstract als relevant eingestuft wurden. Davon waren 27 als Volltexte verfügbar. Die Analyse zeigt somit, dass das Feld der autonomen Wasserfahrzeuge in Deutschland noch im Aufbau ist. Die identifizierten Publikationen konzentrieren sich auf die ersten Pilotanwendungen in Deutschland (v.a. in der Kieler Förde und in Bremerhaven) oder in Europa (v.a. in Norwegen), mit denen sich in Deutschland ansässige Forschende wissenschaftlich beschäftigen.

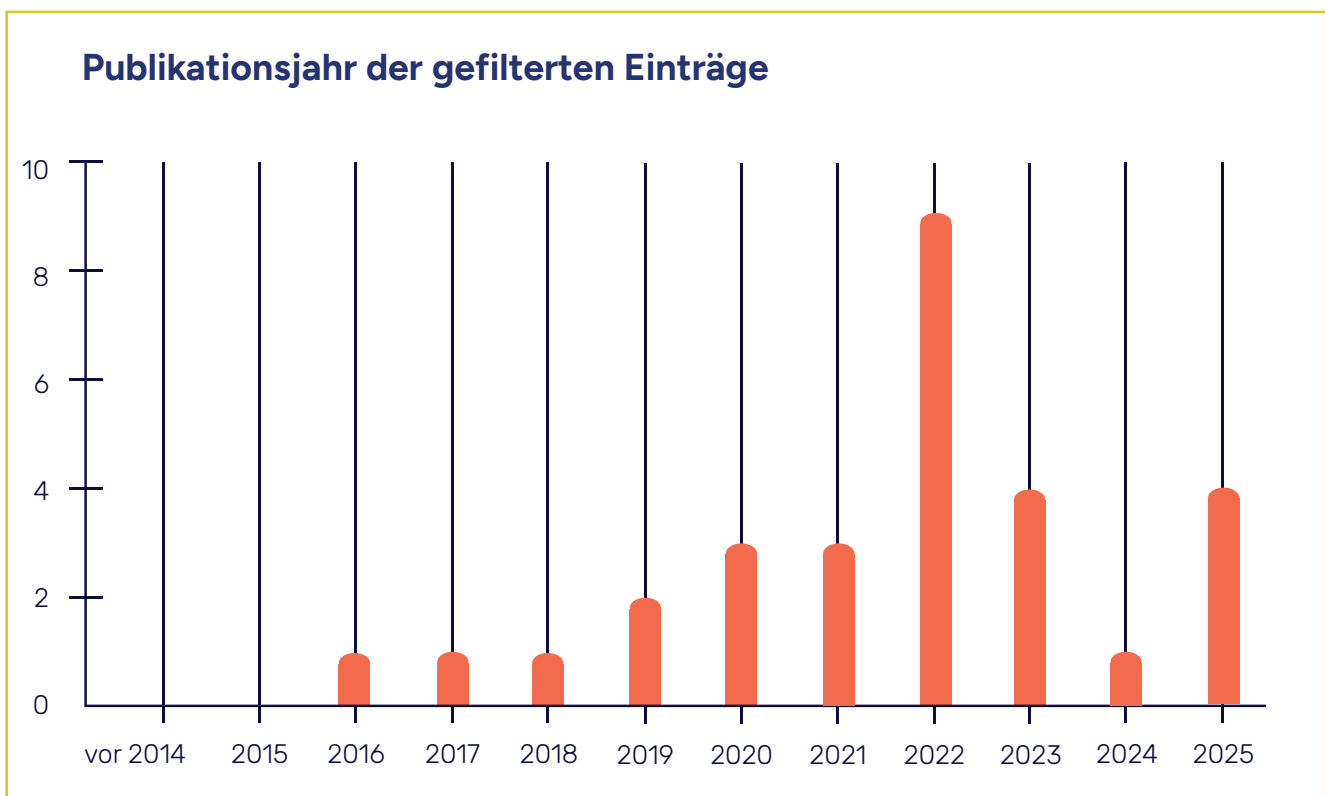


Abbildung 1: Säulendiagramm zu den Erscheinungsjahren der Publikationen aus dem Scoping

Die zeitliche Verteilung der Publikationen weist einen Höhepunkt im Jahr 2022 auf, was offensichtlich mit dem Beginn der Publikationstätigkeiten des Verbundprojekts CAPTN zusammenhängt. Die erste thematische Auswertung mittels Schlagwortanalyse deutet darauf hin, dass klima- und nachhaltigkeitsbezogene Fragestellungen sowie

Diskussionen um den Reifegrad und die Akzeptanz in der deutschen sozial-ökologischen Forschung stärker vertreten sind und in den meisten Publikationen Erwähnung finden. Die Diskussionen um regulatorische Hebel und vor allem um die wirtschaftliche Relevanz werden in der Forschungsliteratur eher randständig oder gar nicht behandelt.

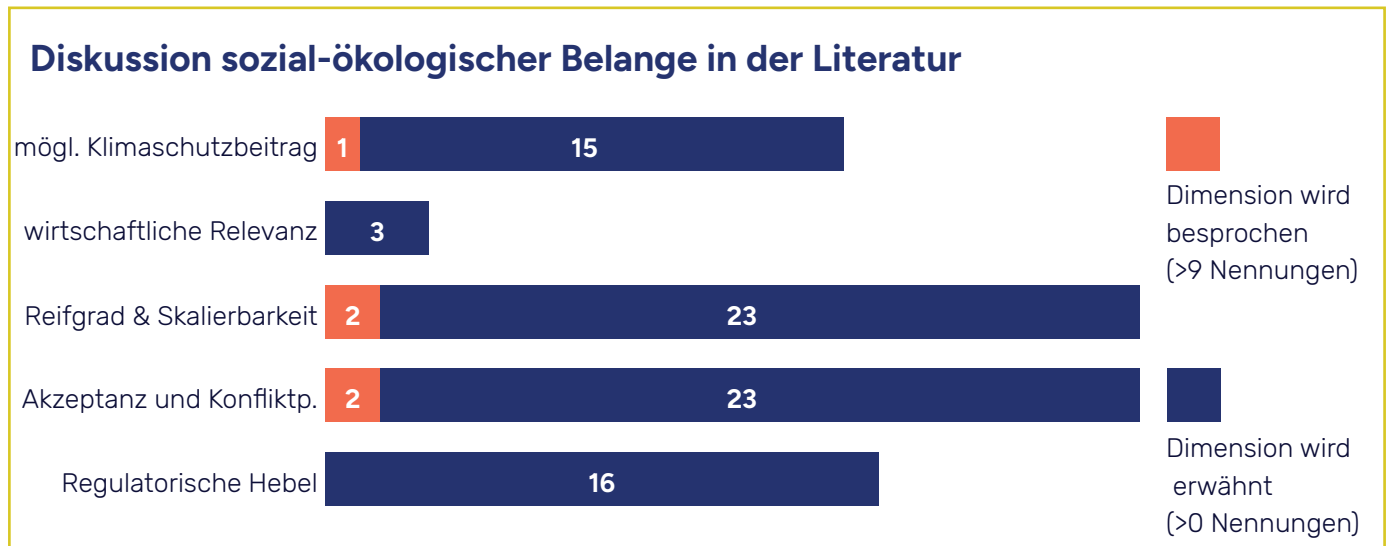


Abbildung 2: Säulendiagramm zum Vorkommen der sozioökologischen Dimensionen in den Scoping-Ergebnissen

Diese systematische Vorstrukturierung unterstützte die darauffolgende qualitative Auswertung der Literatur. Ergänzend wurden Expertinnen und Experten aus Forschung, Verwaltung und Wirtschaft als Interviewpartner konsultiert. Deren Einschätzungen dienten insbesondere der Validierung, Kontextualisierung und Ergänzung der aus der Literatur gewonnenen Ergebnisse. Im Rahmen dieses Dossiers fanden Austausche mit Beteiligten aus den Projekten Schuppi autonom, AutoFerry und CAPTN statt, die teilweise zugleich in öffentlichen Funktionen in den Bundesländern Schleswig-Holstein und Bremen tätig sind. Dadurch konnten sowohl aktuelle Perspektiven aus dem Hafenmanagement als auch aus der privaten Reedereiwirtschaft in das Dossier einfließen.

Die Rückmeldungen wurden in die Überarbeitung des Dossiers integriert, insbesondere in die Einordnung von Markt- und Technologieentwicklungen sowie in die Bewertung von Geschäftsmodellen, Akzeptanz und Reifegrad vor dem Hintergrund notwendiger regulatorischer Anpassungen. Aufbauend auf dieser Übersicht zum aktuellen Stand der transdisziplinären Forschung zu automatisierten und autonomen Wasserfahrzeugen entwickelt das vorliegende Dossier konkrete Handlungsempfehlungen, die zur Stärkung des Logistiksektors, der Reedereiwirtschaft und des Schiffbaus in Deutschland beitragen können. Diese basieren auf der Notwendigkeit, technologische Entwicklung gezielt mit sozialer Akzeptanz und administrativer Handlungsfähigkeit zu verknüpfen.

# Möglicher Klimaschutzbeitrag

# 02

Der potenzielle Klimaschutzbeitrag autonomer Wassertaxis und autonomer Binnenwasserfahrzeuge lässt sich in drei zentrale Wirkungsmechanismen gliedern: (1) betriebliche Effizienzsteigerung, (2) Antriebselektrifizierung und (3) systemische Netz- und Angebotswirkungen im Zusammenspiel mit dem ÖPNV.

Die Reduktion des Energieverbrauchs kann durch energieoptimierte Trajektorienplanung, präzisere Manöverführung sowie adaptive Geschwindigkeitsprofile den Treibstoff- bzw. Energieverbrauch senken (z. B. AKOON-Projekt am Rhein; siehe Koschorrek et al., 2022). Ergänzend zeigen internationale Emissionsmodellierungen unter Einbeziehung von Hafenstandorten wie Hamburg Potenziale zur Emissionsminderung durch optimierte Navigations- und Hafenprozesse (Liu et al., 2021). Der Klimabeitrag entsteht hier durch algorithmisch gestützte Effizienzgewinne im operativen Betrieb. Autonomie wird in Deutschland häufig mit emissionsarmen oder elektrischen Antriebskonzepten kombiniert. Projekte wie Schuppi autonom in Bremerhaven koppeln autonome Steuerung explizit mit vollelektrischen Antrieben. Der wesentliche Klimabeitrag resultiert dabei aus der Dekarbonisierung des Antriebs, während die Autonomie zusätzliche Effizienzpotenziale erschließt.

Somit bleibt der erwartbare Klimaschutzbeitrag durch die Einführung autonomer Systeme in Teilen eher gering und auch in den durchgeführten Interviews mit Praxisakteuren spielt der Klimaschutz als primärer Treiber der Technologieentwicklung eine untergeordnete Rolle. Stattdessen stehen betriebliche Herausforderungen, insbesondere Fachkräftemangel, Modernisierungsbedarf bestehender Flotten sowie Fragen der technischen und regulatorischen Umsetzbarkeit, im Vordergrund. Poten-

zielle Klimawirkungen werden eher indirekt über Effizienzsteigerungen und optimierte Betriebsabläufe adressiert, jedoch selten explizit quantifiziert oder als zentrales Entwicklungsziel formuliert.

Dennoch ergibt sich in der Überwindung der zentralen Herausforderungen der Küsten- und Binnenschifffahrt ein mittelbares Klimaschutzpotenzial. Autonome Fähren ermöglichen flexiblere Fahrpläne, bedarfsgerechte Bedienkonzepte und die Reduktion von Umwegen. Im Kontext der Kieler Förde werden autonome Fähren hinsichtlich solcher netz- und betriebsorganisatorischer Effekte modelliert (Aslaksen et al., 2020, 2021). Durch optimierte Taktung und bessere Auslastung können Emissionen pro transportierte Person gesenkt werden. Auch das Bremer Projekt Schuppi autonom soll durch neue (elektrische) Fährverbindungen den ÖPNV stärken und somit zur Klimaneutralität beitragen. Bei effizienter Einbindung in lokale Nahverkehrssysteme können autonome Fähren umweltfreundliche Mobilitätsformen attraktiver machen und somit indirekt zu einer Verkehrsverlagerung vom Straßenverkehr auf den Wasserweg beitragen (Aslaksen et al., 2020; 2021). Der tatsächliche Klimanutzen hängt dabei maßgeblich von der Integration in bestehende ÖPNV-Strukturen und der tatsächlichen Substitution emissionsintensiver Verkehrsträger ab. Außerdem kann die allgemeine Stärkung der Binnenschifffahrt durch geringere Personalbedarfe zu Emissionsreduktionen in der Gesamtbetrachtung des Logistiksektors führen, da die Binnenschifffahrt emissionsärmer als ein vergleichbarer Transport in dieselbetriebenen Lkws ist (Kracht et al., 2022). Autonome Wasserfahrzeuge sollten daher eher als „enabling technology“ betrachtet werden, deren Umweltwirkung stark von flankierenden Faktoren (z. B. Antriebssystemen, Auslastung und Systemintegration) abhängt.

# Wirtschaftliche Relevanz

# 03

Die in den Interviews gewonnenen Einschätzungen zeichnen ein differenziertes Bild der aktuellen Standortrelevanz autonomer Wasserfahrzeuge in Deutschland. Demnach ist Deutschland derzeit weniger als etablierter Markt, sondern primär als Forschungs- und Demonstrationsstandort zu verstehen. Die Entwicklung des Technologiefelds wird daher ausschließlich durch öffentlich geförderte Projekte und Reallabore getragen, während privatwirtschaftlich getriebene Skalierungsdynamiken bislang nur begrenzt erkennbar sind.

Aktuell bilden sich regionale Innovationscluster, insbesondere in Kiel (Projekt CAPTN), im Ostseeraum (Projekt AutoFerry) und Bremerhaven (Reallabor Schuppi autonom), in denen technologische Entwicklung, Testinfrastruktur und regulatorische Lernprozesse noch mehr gebündelt werden müssen. Diese Aktivitäten sind bislang stark öffentlich gefördert und häufig hochschulnah organisiert und beziehen nur teilweise private Unternehmen mit ein. Einzelne Vorhaben, wie in Bremen, verfolgen dabei explizit auch industriepolitische Zielsetzungen, indem sie Entwicklung, Bau und Betrieb autonomer Systeme mit lokalen Werften und Anbietern von eFuels verknüpfen (Freie Hansestadt Bremen, 2026). Auch das CAPTN-Teilprojekt Sven-tana, welches von der HAW in der Stadt Kiel vorangetrieben wird, hat ein kommerzielles Ziel. Die in diesen Projekten entstehenden Kompetenzen und Demonstrationsfelder für autonome Navigations-, Steuerungs- und Systemintegrationstechnologien werden mittelfristig für den (nord-)deutschen Wirtschaftsstandort relevant sein, sind kurzfristig jedoch noch von begrenzter wirtschaftlicher Bedeutung. Ein Experte aus der Bremer Hafenverwaltung hebt in diesem Zusammenhang hervor, dass insbesondere im Kontext der „Zeitenwende“ der Aufbau nationaler und funktionaler Technologiekompeten-

zen im Bereich autonomer Systeme und Anwendungen von hoher Relevanz für die Verteidigungsfähigkeit sein wird.

Die industrielle Basis im Schiffbau hat sich in den vergangenen Jahrzehnten gewandelt. Insbesondere Werften entwickelten sich zunehmend von klassischen Produktionsbetrieben hin zu Systemintegratoren, die komplexe digitale und sensorbasierte Komponenten zusammenführen. Damit gehen steigende Anforderungen an Wartung, Betrieb und Integration einher, die häufig internationale Zuliefer- und Servicenetzwerke einbeziehen. Durch autonome Systeme wird diese Tendenz verstärkt, spielt aber laut dem wirtschaftlichen Sprecher des CAPTN-Projekts für einen Trendwechsel in der sinkenden Wettbewerbsfähigkeit deutscher Schiffbauer kaum eine besondere Rolle, da dieser Markt hochgradig international vernetzt ist und andere Faktoren, wie die Kosten von Fachkräften, davon nicht sonderlich beeinflusst werden.

Eng damit verbunden ist ein struktureller Wandel des Arbeitsmarktes. Autonome Wasserfahrzeuge führen, ähnlich wie andere Hochtechnologien, tendenziell zu einem Wandel klassischer operativer Tätigkeiten bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an Qualifikation und Spezialisierung. Insbesondere für die Fernüberwachung, Wartung und Weiterentwicklung komplexer Steuerungs- und Navigationssysteme entstehen neue Tätigkeitsprofile, die in der traditionellen Schiffsbau- und Schifffahrtsausbildung bislang nur begrenzt abgebildet sind.

Gleichzeitig wird in den Interviews der zunehmende Fachkräftemangel als zentraler Treiber der technologischen Entwicklung hervorgehoben, wodurch autonome Systeme primär als betriebliche Lösungsperspektive und weniger als marktgetriebene Innovation verstanden werden. Laut einem Experten der Reederei FRS Weiße Flotte, die am Projekt AutoFerry beteiligt

ist, werden autonome Systeme als unabdingbare betriebliche Lösungsperspektive für einen sich verschärfenden Fachkräftemangel verstanden, der den langfristigen wirtschaftlichen Betrieb von Fährverbindungen gefährdet.

Ein strukturelles Hemmnis für die Nutzung des Innovations- und Standortpotenzials stellt die kleinteilige Betreiberlandschaft dar. Viele Fähr- und Schifffahrtsunternehmen verfügen über begrenzte Ressourcen für Forschung und Entwicklung, so dass Innovationen stark von projektbasierter Förderung abhängen und nur eingeschränkt in den Regelbetrieb überführt werden können. Es fehle insbesondere an einer übergeordneten Koordination der unterschiedlichen Aufgabenfelder sowie an einem funktionalen Schnittstellenmanagement, das die bislang überwiegend freiwilligen und durch intrinsische Motivation getragenen Austauschformate ergänzt und stärkt.

Für den urbanen Personenverkehr untersuchen Studien zur Kieler Förde die optimale Gestaltung von Routen, Flottengrößen und Abfahrtsfrequenzen autonomer Fähren (Aslaksen et al. 2020; 2021). Diese Forschungsarbeiten liefern Entscheidungsgrundlagen für kommunale Mobilitätsstrategien. Gesamtwirtschaftlich liegt somit ein deutlich erkennbares „Downstream“-Potenzial in neuen kommunalen Anbindungsmöglichkeiten durch die günstigere Integration von Wasserwegen ins ÖPNV-Netz, wenn bislang schwer erreichbare Gebiete zuverlässig angebunden werden können.

Neben den personenverkehrsbezogenen Anwendungen ergeben sich zusätzliche Standortpotenziale im Bereich der Logistik und des Güterverkehrs. Eine stark alternde Personalstruktur infolge fehlenden Nachwuchses führt zu wachsenden Personalengpässen, die ohne (Teil-)Automatisierung oder den Einsatz autonomer Systeme die Aufrechterhaltung der Operationalität bzw. Einsatzbereitschaft gefährden. Zudem zeigen internationale Fallstudien Kosteneinsparpotenziale durch autonome Schiffe in Short-Sea- und Liner-Netzwerken (Akbar et al., 2021; Msakni et al., 2020), deren technologische Grundlagen erhebliche Schnittmengen mit der autonomen Binnenschifffahrt haben. Es ist also davon auszugehen, dass diese Kosteneinsparpotenziale auch in der Binnenschifffahrt grundsätzlich erreichbar sind, da ökonomische Modellierungen zeigen, dass autonome Binnenschiffe im Container-Feeder-Verkehr potenzielle Kostenvorteile erzielen können (Alias & Felde, 2022). Das Potenzial, dass autonome Binnenschiffe in der Logistik und im Transport effizienzsteigernd und kostenreduzierend wirken, würde sich positiv auf die Kosteneffizienz in den gesamten industriellen Liefer- und Wertschöpfungsketten auswirken.

Insgesamt deuten sowohl die ausgewertete Literatur als auch die Interviews darauf hin, dass Deutschland über relevante technologische Kompetenzen und anwendungsnahe Entwicklungsumgebungen verfügt, jedoch bislang keine klare Position als globaler Leitmarkt oder Technologieführer einnimmt. Die Standortrelevanz ergibt sich derzeit primär aus der Forschungs- und Demonstrationsaktivität sowie aus potenziellen zukünftigen Anwendungen, während eine breite wirtschaftliche Verwertung noch aussteht.



Taufe der MS „Wavelab“ im Februar 2023

Bild mit Projektpartnern: v.l.: Björn Lehmann-Matthaei (FuE-Zentrum FH Kiel GmbH), Dr. Norbert Saloman (BMDV), Björn Schwarze (Addix GmbH), Prof. Dr. Dirk Nowotka (CAU) Dr. Wiebke Müller-Lupp (Geschäftsführerin Wissenschaftszentrum Kiel), Daniel Sommerstedt und Andreas Weidner (Anschütz GmbH), Anna Bubenheim (FuE-Zentrum FH Kiel GmbH), Katrin Lau (Schiff&Hafen, Taufpatin), Kathrin Birr (Gebr. Friedrich Schiffswerft)

© Ann-Christin Wimber/CAPT Initiative

# Reifegrad und Skalierbarkeit

# 04

Technologisch befindet sich die Entwicklung autonomer Wasserfahrzeuge in Deutschland in einer fortgeschrittenen Demonstrations- und Testphase. Es existieren weitgehend funktionsfähige Demonstratoren, etwa die (teil-)automatisierte Rhein-Fähre im AKOON-Projekt (Koschorrek et al. 2022), eine Inselfähre im Rahmen des Projekts AutoFerry oder eine Hafenfähre Schuppi autonom in Bremerhaven. Ergänzend werden hochrealistische Simulationsumgebungen und Kontrollzentren aufgebaut, beispielsweise im Rahmen des Forschungs- und Kontrollzentrums VeLABi für autonome Binnenschiffe (Kracht et al., 2022). Der Reifegrad wird in der Literatur dabei vor allem über Test- und Validierungsarchitekturen adressiert. So wird der Transfer von Verifikations- und Validierungsmethoden (V&V) aus der Automobilindustrie in die maritime Autonomie diskutiert (Brinkmann et al., 2017). Benchmarking-Ansätze wie „CommonOcean“ dienen der standardisierten Vergleichbarkeit von Motion-Planning-Verfahren (Krasowski & Althoff, 2022). Experimente zur kooperativen Navigation und Multi-Vehicle-Control wurden unter realitätsnahen Bedingungen, etwa im Hafen von Rostock, validiert (Kurowski et al., 2019). Auch AIS-basierte Verkehrsanalysen am Rhein liefern Datengrundlagen für sicherheitsrelevante Algorithmen und Routenplanungsverfahren (Kaster et al., 2022).

Die in den Interviews gewonnenen Einschätzungen bestätigen dieses Bild einer technologisch fortgeschrittenen, jedoch noch nicht systemisch ausgereiften Entwicklung. Während zentrale Komponenten wie Sensorik, Navigation und Trajektorienplanung grundsätzlich funktionsfähig sind und in Demonstrationsumgebungen zuverlässig arbeiten, bestehen weiterhin erhebliche Herausforderungen in der Integration dieser Elemente zu einem robusten Gesamtsystem. Autonome Wasserfahrzeuge sind damit technisch prinzipiell realisierbar, jedoch noch nicht in einem Umfang validiert, der einen stabilen und sicheren Dauerbetrieb unter realen Bedingungen gewährleistet.

Entsprechend bestehen auch erhebliche Skalierungshemmnisse. Ein regulärer vollautonomer

Personenbetrieb autonomer Fährsysteme existiert bislang in Deutschland nicht. Wirtschaftlichkeitsnachweise beruhen überwiegend auf simulationsbasierten Modellen, während reale Dauerbetriebsdaten fehlen (z.B. Aslaksen et al., 2020; Msakni et al., 2020).

In den Interviews wird der Übergang vom Testfeld zum Regelbetrieb übereinstimmend als zentraler Engpass hervorgehoben. Insbesondere fehlen standardisierte Verfahren zur sicherheitsbezogenen Abnahme, klare regulatorische Zuständigkeiten sowie belastbare Nachweise für die Betriebssicherheit im kontinuierlichen Einsatz.

Regulatorische Unsicherheiten erschweren den Übergang vom Testfeld in den Regelbetrieb außerhalb von Reallaboren (Bačkalov et al., 2025). Laut einem Experten aus dem Projekt Schuppi autonom, übernehmen Reallabore und Pilotprojekte derzeit die Funktion, technische, organisatorische und regulatorische Fragestellungen parallel zu erproben, können jedoch die fehlende institutionelle Verankerung eines Regelbetriebs nicht ersetzen. Darüber hinaus zeigen Studien zur Konnektivität, etwa 5G-Messkampagnen im Küstenraum der Kieler Förde (Denizer et al., 2025), dass stabile und leistungsfähige Datenübertragung eine zentrale infrastrukturelle Voraussetzung für skalierbare autonome Systeme darstellt.

Letztendlich variiert der technologische Reifegrad stark zwischen unterschiedlichen Anwendungsfeldern. Liniengebundene Fahren vor allem in kurzen Querungsverbindungen mit weitgehend kontrollierten Umgebungen gelten als vergleichsweise weit entwickelt und werden gezielt als erste Anwendungsfälle erprobt. Anwendungen mit Navigation entlang von Flüssen mit Passagieren oder Gütern weisen hingegen deutlich geringere Reifegrade auf und sind noch deutlich weiter von einem Regelbetrieb entfernt. Insgesamt ergibt sich daher ein Bild eines Technologiefeldes, in dem die grundlegenden technischen Voraussetzungen weitgehend vorhanden sind, die Integration von Komponenten in komplexen Systemen und eine weitergehende organisationale Skalierung jedoch durch institutionelle und infrastrukturelle Faktoren begrenzt wird.

# Akzeptanz und Konfliktpotenzial

# 05

In der bislang vorliegenden wissenschaftlichen Literatur zu autonomen Wassertaxis und autonomen Fähren in Deutschland finden sich nur begrenzte Hinweise auf ausgeprägte gesellschaftliche Konflikte oder politische Kontroversen. Breitere sozialpolitische Gerechtigkeitsfragen (etwa hinsichtlich Verteilungseffekten, Zugangsgerechtigkeit oder arbeitsmarktlicher Umbrüche) werden in der derzeit verfügbaren Forschung kaum systematisch behandelt. Im Unterschied zur Debatte um den autonomen Straßenverkehr steht somit nicht eine gesamtgesellschaftliche Polarisierung im Vordergrund, sondern primär die Frage der sicheren und regelkonformen Implementierung.

Die Forschung fokussiert entsprechend stark auf Sicherheits- und Risikoakzeptanzfragen. Im Zentrum stehen die Definition und Operationalisierung von „Target Safety Levels“, „Risk Acceptance Criteria“ sowie die Anpassung bestehender Zertifizierungs- und Sicherheitslogiken an autonome Systeme (Bolbot et al., 2023; Chaal et al., 2023). Die Akzeptanzfrage wird dabei vor allem technisch-normativ verhandelt. Dabei steht das vertretbare Sicherheitsniveau und dessen Absicherung im Vordergrund. Internationale Studien aus dem norwegischen Kontext (Goerlandt & Pulsifer, 2022) zeigen zudem, dass erwartete Emissionsreduktionen die Akzeptanz fördern können, gleichzeitig jedoch Sicherheitsbedenken gegenüber unbemannten Fähren fortbestehen. Insbesondere das Fehlen von Personal an Bord wird als potenzielles Unsicherheitsmoment wahrgenommen. Wie der wirtschaftliche Sprecher des CAPTN-Projekts in einem Interview anmerkt, übernimmt das Bordpersonal auf Fähren eine zentrale Rolle für Sicherheit, Aufsicht und Organisation. Für den Betrieb autonomer Wasserfahrzeuge stellt sich daher die Frage, inwiefern

ein Verzicht auf Sicherheitspersonal gesellschaftlich akzeptiert wird. Gleichzeitig müssen Passagiere mit angemessenem Verhalten in Notfallsituationen vertraut gemacht werden. Erst mit der Bearbeitung dieser gesellschaftlich-ordnungspolitischen – und nicht technologischen – Fragestellungen erscheint ein weiterreichender Regelbetrieb autonomer Wasserfahrzeuge realistisch.

Die Interviews im deutschen Kontext bestätigen diese Einschätzung, verschieben den Fokus jedoch auf konkrete betriebliche und organisatorische Fragestellungen. Im Umfeld des Reallabors Schuppi autonom wird deutlich, dass gesellschaftliche Konflikte bislang eine untergeordnete Rolle spielen, während Akzeptanzfragen vor allem im praktischen Betrieb verortet werden. Insbesondere die sichere Navigation in realen Hafenumgebungen sowie die zuverlässige Objekterkennung und Systemreaktion stehen im Vordergrund. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Technologie bislang nur begrenzt in der breiten Öffentlichkeit wahrgenommen wird, wodurch gesellschaftliche Auseinandersetzungen noch ausbleiben.

Im Kontext teilautomatisierter Fähren einer Reederei, die im Projekt AutoFerry beteiligt ist, werden auch arbeitsmarktbezogene Spannungsfelder hervorgehoben. Hier wird von einer ambivalenten Stimmung unter Beschäftigten der Reederei in Bezug auf die Automatisierung von Fähren berichtet. Einerseits wird die Automatisierung als Arbeiterleichterung und notwendige Modernisierung der Schiffe begrüßt. Andererseits bestehen Sorgen hinsichtlich des Wegfalls klassischer Berufsbilder und eines Bedeutungsverlusts bestehender Qualifikationen bei dem umfassenden Einsatz vollautonomer Systeme, die nur teilweise durch den zunehmenden Fachkräftemangel auf Verständnis stoßen. Die Einführung autonomer Systeme führt damit zwar nicht zu unmittelbaren

Beschäftigungskonflikten, aber zu einem schrittweisen Strukturwandel, der neue, stärker technologiebezogene Kompetenzprofile erfordert, um für Arbeitnehmer akzeptabel zu sein. In diesem Sinne wird deutlich, dass sich Konfliktlinien stärker im Bereich institutioneller und organisatorischer Integration manifestieren. Dies betrifft insbesondere die Einbindung autonomer Systeme in bestehende Aufsichts- und Kontrollstrukturen wie Vessel Traffic Services (VTS), aber auch die Anpassung betrieblicher Abläufe, Verantwortlichkeiten und Entscheidungsprozesse. Studien wie das LEAS-Projekt des Fraunhofer CML<sup>1</sup> unterstreichen diese Perspektive,

1. <https://www.cml.fraunhofer.de/en/research-projects/LEAS.html>

indem sie zeigen, dass technologische Leistungsfähigkeit allein nicht ausreicht, wenn Systeme nicht in bestehende Arbeitsprozesse und Organisationsstrukturen integrierbar sind (Schäfer et al., 2025).

Insgesamt ergibt sich damit ein Bild geringer gesellschaftlicher Polarisierung bei gleichzeitig relevanten, jedoch bislang vor allem latenten Konfliktpotenzialen mit Bezug auf die Belegschaft der Reedereien. Diese liegen auch in breiten gesellschaftlichen Auseinandersetzungen zu generellen Arbeitsplatzverlusten durch Automatisierung, aber auch in sicherheitsbezogenen Detailfragen sowie in der organisatorischen und institutionellen Einbettung autonomer Systeme in bestehende maritime Strukturen.



Forschungskatamaran MS Wavelab  
(CAPTN/Bevis Nickel)

# Regulatorische Hebel und Steuerungsbedarfe

# 06

Der regulatorische Rahmen stellt derzeit einen zentralen Engpass für die Skalierung autonomer Wassertaxis und autonomer Binnenfahrzeuge dar. Im Zentrum steht die Frage, wie bestehende maritime Sicherheits- und Verhaltensnormen funktional auf autonome Systeme übertragen werden können. Insbesondere die Kollisionsverhütungsregeln enthalten implizit menschliche Entscheidungs- und Verantwortungsannahmen, die bei hochautomatisierten oder unbemannten Systemen neu interpretiert oder operationalisiert werden müssen. Arbeiten zur COLREG-konformen Trajektorienplanung (Bartels & Meurer, 2025; Heiberg et al., 2022) sowie zur Entwicklung äquivalenter Anforderungen für elektronische Lookout-Systeme (Bolbot et al., 2023) zeigen, dass Autonomie eine normativ-funktionale Übersetzungsaufgabe darstellt und nicht nur technologisch gedacht werden kann. Ergänzend wird auf Ebene der internationalen Seerechtsordnung diskutiert, inwiefern bestehende Klassifikationen von Autonomiestufen ausreichend sind oder angepasst werden müssen (Sümer, 2023).

Die Interviews bestätigen diese Einschätzung und konkretisieren sie im Hinblick auf die praktische Umsetzung. Im Kontext des Reallabors Schuppi autonom wird hervorgehoben, dass der zentrale Handlungsbedarf auf Bundesebene liegt. Demnach fehlen bislang grundlegende rechtliche Voraussetzungen für den regulären Betrieb autonomer Systeme, einschließlich klar definierter Zulassungsverfahren. Autonome Systeme bewegen sich damit aktuell in einem regulatorischen Vakuum, das ihre Weiterentwicklung und insbesondere den Übergang in den Regelbetrieb erheblich einschränkt. Übereinstimmend wird auch im Interview mit dem Projekt AutoFerry hervorgehoben, dass weniger das Fehlen einzelner Regelwerke als vielmehr deren Operationalisierung, Auslegung und Anwendung zentrale Herausforderungen darstellen. In der Praxis zeigt sich dies insbesondere im Fehlen standardisierter Verfahren zur sicherheitsbezogenen

Abnahme autonomer Systeme sowie in unklaren Zuständigkeiten für Genehmigung, Aufsicht und Typenzulassung, welches auch vom wirtschaftlichen Sprecher des Projekt CAPTN bestätigt wird:

*„Ich war letzte Woche beim Bundesamt für Seeschiff von der Hydrographie mit Vertretern der Marine, die hatten morgens ein Gespräch mit der Generaldirektion Wasser- und Schifffahrtsstraße. Und gemeinsam konnten wir nicht herausfinden, wie an einer bestimmten Stelle in der Kieler Förde die rechtliche Situation ist, wer da was zu sagen hat. Also auch das föderale System steht der Entwicklung da schon im Weg.“*

Dies führt dazu, dass Projekte trotz technischer Fortschritte im Status von Demonstratoren verbleiben und nicht in einen regulären Betrieb überführt werden können. Als ein Grund für diese regulatorische Zurückhaltung wird die hohe sicherheitsbezogene „Fallhöhe“ der Schifffahrt benannt. Wasserstraßen gelten als kritische Infrastruktur mit potenziell schwerwiegenden Unfallfolgen, was zu besonders hohen Anforderungen an Sicherheit und Regulierung führt. Diese Einschätzung deckt sich mit der in der Literatur beschriebenen Notwendigkeit, bestehende Sicherheitsnormen funktional auf autonome Systeme zu übertragen, verdeutlicht jedoch zugleich, dass diese Übersetzungsleistung bislang nicht in operationale Regelwerke überführt wurde.

Für Deutschland ist insbesondere das Binnenrecht von zentraler Bedeutung. Die derzeitige Definition des „Master“ in der Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung und im europäischen Binnenregelwerk wird als strukturelles Hindernis für unbemannte oder fernüberwachte Schiffe identifiziert (Bačkalov et al., 2025). Da die rechtliche Verantwortlichkeit bislang an eine physisch an Bord befindliche Person geknüpft ist, entsteht ein Spannungsfeld zwischen technischer Machbarkeit und normativer Zulässigkeit. Hinzu kommt die Frage der Sicherheitszertifizierung dynamischer, softwarebasierter Systeme. Arbeiten zu sicherheitsgerichteten Systemarchitekturen und zur Behandlung von Soft-

ware-Updates (Hake et al., 2021) zeigen, dass klassische Zertifizierungslogiken an Grenzen stoßen, wenn autonome Systeme im Betrieb adaptiv verändert werden. Die Interviews verdeutlichen, dass insbesondere für kontinuierliche Systemupdates, Fernüberwachung und softwarebasierte Entscheidungslogiken bislang keine etablierten Abnahme- und Zertifizierungsverfahren existieren.

Ein weiterer zentraler Engpass ergibt sich aus dem Fehlen geeigneter Daten- und Nachweisgrundlagen für die Bewertung der Systemsicherheit. Beide interviewten Projekte weisen darauf hin, dass belastbare Realdaten für autonome Wasserfahrzeuge bislang nur begrenzt verfügbar sind. Die Generierung solcher Daten ist im maritimen Kontext deutlich aufwändiger als im Straßenverkehr, da sie den Einsatz komplexer und kostenintensiver Sensorensysteme sowie größerer Versuchsträger erfordert. Gleichzeitig erschweren spezifische Umweltbedingungen – etwa Wellengang, Schiffsbewegungen und variierende Sichtverhältnisse – die zuverlässige Objekterkennung und Systemvalidierung. Die Notwendigkeit einer umfassenden 360°-Sensorfusion (u. a. Kamera, Lidar, Radar) sowie die hohe Dynamik und Heterogenität möglicher Objekte im Wasser verdeutlichen, dass die Erhebung sicherheitsrelevanter Daten selbst eine zentrale Herausforderung darstellt.

Reallabore wie Schuppi autonom in Bremerhaven oder Testfelder im Küsten- und Binnenbereich fungieren vor diesem Hintergrund nicht nur als technische Erprobungsräume, sondern als regulatorische Lernumgebungen. Sie ermöglichen die Generierung von Trainingsdaten, praktische Erprobung von Aufsichtsmodellen, Verantwortlichkeitsstrukturen sowie der Interaktion mit bestehenden Verkehrsüberwachungs- und Genehmigungsprozessen. Gleichzeitig zeigen diese Projekte, dass regulatorische Fragestellungen eng mit technischen und betrieblichen Aspekten verknüpft sind und nicht isoliert behandelt werden können.

Insgesamt fehlt bislang ein kohärenter nationaler Ordnungsrahmen für autonome Wassertaxis und autonome Binnenfahrzeuge, der internationale Vorgaben, Binnenrecht, Sicherheitszertifizierung und betriebliche Aufsicht systematisch integriert. Der regulatorische Hebel liegt daher insbesondere in der Anpassung personenbezogener Verantwortlichkeitsdefinitionen (Master-Begriff), der funktionalen Operationalisierung bestehender Sicherheitsnormen für autonome Systeme sowie in der Entwicklung konsistenter Zulassungs-, Abnahme- und Aufsichtsverfahren für softwarebasierte maritime Autonomie.



CAPTN Vaiaro – Entwurf:  
Floating Platform

© Vincent Steinhart-Besser,  
Simeon Ortmüller /Muthesius  
Kunsthochschule

# Empfehlungen zur Forschungsagenda

# 07

Die in dieses Technologiedossier eingegangene Analyse zeigt, dass die Entwicklung autonomer Wasserfahrzeuge in Deutschland durch eine spezifische Konstellation technischer, regulatorischer und betrieblicher Herausforderungen geprägt ist. Zwar befinden sich zentrale Technologien – etwa Sensorik, Navigation und Steuerungssysteme – bereits in einer fortgeschrittenen Demonstrationsphase, jedoch bestehen erhebliche Hürden beim Übergang in einen stabilen und skalierbaren Regelbetrieb des Gesamtsystems. Diese Hürden unterscheiden sich in wesentlichen Punkten von anderen Mobilitätsbereichen.

Charakteristisch für das Technologiefeld ist insbesondere die hohe Komplexität der Einsatzumgebung zu Wasser. Dynamische Umweltbedingungen wie Wellengang, eingeschränkte Sichtverhältnisse und die träge Steuerbarkeit von Schiffen stellen hohe Anforderungen an Objekterkennung, Sensorfusion und antizipative Navigation. Gleichzeitig ist die Generierung belastbarer Realdaten deutlich

aufwändiger als in anderen Verkehrsträgern, da sie den Einsatz kostenintensiver Sensorik und größerer Schiffe als Versuchsträger erfordert. Diese Besonderheiten wirken sich unmittelbar auf die Validierung, Zertifizierung und regulatorische Bewertung autonomer Systeme aus.

Vor diesem Hintergrund kommt der transdisziplinären Forschung eine zentrale Rolle zu. Ihre besondere Hebelwirkung liegt in der Verknüpfung technischer, regulatorischer und betrieblicher Perspektiven sowie in der systematischen Einbindung relevanter Akteursgruppen. Dadurch kann sie dazu beitragen, die identifizierten Barrieren gezielt zu adressieren und den Übergang von fragmentierten Demonstrationsprojekten hin zu integrierten, anwendungsfähigen Systemlösungen zu unterstützen. Die folgenden Handlungsempfehlungen leiten sich aus der Analyse der wissenschaftlichen Literatur, der Projektlandschaft in Deutschland sowie den durchgeführten Interviews und schriftlichen Rückmeldungen ab.

## Systematische Erhebung, Bereitstellung und Nutzung von Realdaten

Die Verfügbarkeit belastbarer Realdaten stellt eine zentrale Voraussetzung für die Weiterentwicklung und Skalierung autonomer Wasserfahrzeuge dar. Sowohl in der Literatur als auch in den Interviews wird deutlich, dass derzeit erhebliche Defizite in der Datengrundlage bestehen. Insbesondere im Vergleich zum autonomen Straßenverkehr ist die Erhebung von Daten im maritimen Kontext deutlich aufwändiger, da sie den Einsatz komplexer Sensorensysteme sowie kostenintensiver Testinfrastrukturen erfordert. Projekte wie Schuppi autonom und AutoFerry verdeutlichen, dass die Generierung von

Daten unter realen Umweltbedingungen, etwa bei variierenden Sichtverhältnissen, Wellengang und komplexen Verkehrssituationen, eine eigenständige Herausforderung darstellt. Diese Daten sind essenziell für die Entwicklung und Validierung autonomer Systeme und stellen eine zentrale Voraussetzung für deren regulatorische Zulassung dar. Vor diesem Hintergrund besteht ein erheblicher Bedarf an koordinierten Forschungs- und Förderansätzen zur systematischen Datenerhebung sowie zum Aufbau gemeinsamer Dateninfrastrukturen und -plattformen.

# Entwicklung und Umsetzung geeigneter Sicherheits- und Zertifizierungsvorgaben

Ein zentraler Engpass für die Skalierung autonomer Wasserfahrzeuge liegt in der fehlenden Operationalisierung von Sicherheits- und Zertifizierungsanforderungen. Während die Literatur umfangreiche Ansätze zur Definition von Sicherheitszielen (z. B. „Target Safety Levels“) und zur Entwicklung entsprechender technischer Lösungen bietet, fehlt bislang eine systematische Überführung dieser Konzepte in standardisierte, regulatorisch anerkannte Verfahren.

Besonders herausfordernd ist hierbei die Zertifizierung softwarebasierter, adaptiver Systeme, die sich im Betrieb kontinuierlich verändern können. Arbeiten zur Sicherheitsbewertung und zur Behandlung von Software-Updates zeigen, dass klassische Zertifizierungslogiken hierfür nur begrenzt geeignet sind. Die Interviews bestätigen, dass insbesondere im Bereich der sicherheitsbezogenen Abnahme, der Typenzulassung sowie der kontinuierlichen Überwachung autonomer Systeme erhebliche Unsicherheiten bestehen. Forschungsbedarf besteht daher in der Entwicklung neuer, flexibler und zugleich verlässlicher Zertifizierungsansätze, die den spezifischen Anforderungen autonomer Wasserfahrzeuge gerecht werden.

## Forschung am Übergang von den Prototypen zum ersten Regelbetrieb

Die Weiterentwicklung autonomer Wasserfahrzeuge benötigt dringend einen Impuls für den erfolgreichen Übergang von Demonstratoren in einen stabilen Regelbetrieb. Während bestehende Forschungsaktivitäten stark auf die Entwicklung und Erprobung einzelner technologischer Komponenten ausgerichtet sind, bleibt deren Integration in reale Betriebskontexte weitgehend ungeklärt. Insbesondere fehlen belastbare Konzepte für den kontinuierlichen Betrieb unter realen organisatorischen, rechtlichen und infrastrukturellen Bedingungen. Forschungsbedarf besteht daher auch in der Erprobung von institutionellen Verantwortungsstrukturen für den Regelbetrieb. Reallabore stellen hierfür wichtige Ausgangspunkte dar, adressieren diese Fragestellungen bislang jedoch überwiegend projektbezogen und ohne systematische Überführung in übertragbare Betriebskonzepte.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine stärkere Fokussierung auf niedrigkomplexe, frühzeitig realisierbare Anwendungsszenarien wie kurze Flussquerungen sinnvoll. Diese Anwendungen vor allem in Bereichen mit geringem Verkehrsaufkommen und klar abgrenzbaren Betriebsräumen bieten geeignete Bedingungen, um Erfahrungen im Regelbetrieb zu sammeln. Auch wenn die Weiterentwicklung hin zu komplexeren Anwendungen im Güter- und Personenverkehr auf längeren Strecken technologisch und wirtschaftlich naheliegend erscheint, zeigt die Analyse, dass ein schrittweiser Einstieg über weniger komplexe Einsatzfelder entscheidend sein kann, um regulatorische, betriebliche und organisatorische Fragestellungen unter realen Bedingungen zu klären und den Übergang in einen stabilen Regelbetrieb überhaupt zu ermöglichen.

Die Entwicklung autonomer Wasserfahrzeuge erfordert eine enge Verzahnung technischer, regulatorischer und betrieblicher Perspektiven. Die Analyse zeigt, dass diese Dimensionen bislang häufig getrennt voneinander bearbeitet werden, obwohl ihre Wechselwirkungen maßgeblich für den Erfolg der Technologie sind. Insbesondere die Integration autonomer Systeme in bestehende Verkehrsüberwachungsstrukturen, betriebliche Abläufe und organisatorische Verantwortlichkeiten stellt eine zentrale Herausforderung dar.

Erste Ansätze für einen Übergang in den operativen Einsatz zeigen sich in einzelnen Projekten wie Auto-Ferry, in denen bereits eine Zertifizierung nach Projektabschluss durch den Fährbetreiber FRS Weiße Flotte angestrebt wird. Dabei wird deutlich, dass spezifische technische Lösungen wie vektorisierbare Antriebssysteme (bzw. Voith-Schneider-Antriebe), die neue Steuerungsmöglichkeiten eröffnen, zugleich erhöhte Anforderungen an Regelung, Systemintegration und betriebliche Einbettung stellen. Diese Zusammenhänge verdeutlichen, dass technische Entwicklung und sozial-ökologische Fragestellungen im Übergang zum Regelbetrieb nicht getrennt, sondern integriert adressiert werden müssen.

## **Partizipative Gestaltung zur Förderung von Akzeptanz und betrieblicher Integration**

Mit zunehmender technologischer Reife gewinnt die systematische Berücksichtigung von Akzeptanzfragen im Betrieb an Bedeutung. Die vorliegende Analyse zeigt, dass diese bislang im Vergleich zu technischen und regulatorischen Fragestellungen nur begrenzt adressiert werden. Gleichzeitig hängt die langfristige praktische Implementierung maßgeblich davon ab, inwieweit autonome und teilautomatisierte Systeme in bestehende Arbeitsprozesse integriert und von den Nutzerinnen und Nutzern als verlässlich wahrgenommen werden.

Konkrete Projekterfahrungen zeigen, dass partizipative Entwicklungsansätze hierbei eine zentrale Rolle spielen. In einzelnen Projekten wurden Benutzeroberflächen und Steuerungslogiken in enger

Abstimmung mit Schiffsführern und Betriebspersonal entwickelt und iterativ angepasst. Diese kontinuierliche Einbindung der späteren Nutzerinnen und Nutzer ermöglichte es, das Systemverhalten gezielt so auszugestalten, dass es im Betrieb als nachvollziehbar und erwartbar wahrgenommen wird. Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf, partizipative Verfahren systematisch in die Entwicklung und Erprobung autonomer Wasserfahrzeuge zu integrieren. Dies betrifft insbesondere die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, Betriebsprozessen und Organisationsstrukturen. Ziel ist es, die Anschlussfähigkeit an bestehende betriebliche Kontexte zu verbessern und damit eine zentrale Voraussetzung für den Übergang in einen stabilen Regelbetrieb zu schaffen.

# **Transdisziplinäre Bündelung und Vernetzung von Forschungs- und Anwendungsergebnissen in einem Synthesenetzwerk oder einer „Plattform autonome Schifffahrt“**

Handlungsbedarf besteht ebenfalls in der systematischen Bündelung und Weiterentwicklung der bislang fragmentierten Forschungs- und Projektlandschaft. Obwohl in Deutschland eine Vielzahl von Demonstrations- und Forschungsprojekten zu autonomen Wasserfahrzeugen existiert, sind diese bislang nur unzureichend miteinander verknüpft. Ergebnisse werden überwiegend projektbezogen erarbeitet und verbleiben häufig in lokalen Anwendungskontexten. Dies erschwert die Vergleichbarkeit, Übertragbarkeit und Skalierung von Erkenntnissen erheblich. Mehrere interviewte Experten sehen daher die Bundesregierung in der Verantwortung, eine schnelle und agile Führungsrolle bei der Koordination und strategischen Ausrichtung zu übernehmen.

Vor diesem Hintergrund erscheint der Aufbau eines übergeordneten Synthesenetzwerks oder einer Plattform zur autonomen Schifffahrt zentral. Eine solche Struktur sollte nicht nur der Dokumentation und Vergleichbarkeit von Projektergebnissen dienen, sondern insbesondere auch den systematischen Austausch zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen ermöglichen. Dies umfasst neben Forschungseinrichtungen auch Behörden, Betrei-

ber, Infrastrukturakteure und Industriepartner, deren Perspektiven bislang häufig getrennt voneinander in die Entwicklung einfließen. Insbesondere im Bereich der Testmethoden, Sicherheitsbewertungen und betrieblichen Erfahrungen besteht ein erheblicher Bedarf an standardisierten Austausch- und Lernprozessen, die technische, regulatorische und betriebliche Aspekte gemeinsam berücksichtigen. Beispielsweise können standardisierte Benchmarking-Frameworks erste Möglichkeiten zur Vergleichbarkeit aufzeigen, wenn diese systematisch in die Projektlandschaft integriert sind.

Ein Netzwerk oder eine Plattform kann damit eine zentrale Schnittstelle zwischen Technologieentwicklung, regulatorischer Ausgestaltung und praktischer Anwendung bilden. Durch die strukturierte Zusammenführung von Wissen und Akteuren kann es dazu beitragen, Doppelarbeit zu vermeiden, Synergien zu heben und die bislang bestehenden Brüche zwischen einzelnen Projekten und Systemebenen zu überwinden. Damit wird es zu einem wesentlichen Baustein für die Beschleunigung des Übergangs von isolierten Demonstratoren hin zu skalierbaren und integrierten Anwendungssystemen.

# Referenzen

- Akbar, A., Aasen, A. K. A., Msakni, M. K., Fagerholt, K., Lindstad, E., & Meisel, F. (2021). An economic analysis of introducing autonomous ships in a short-sea liner shipping network. *International Transactions in Operational Research*, 28(4), 1740–1764. <https://doi.org/10.1111/itor.12788>
- Alias, C., & Felde, J. Z. (2022). Evaluating the economic performance of a decentralized waterborne container transportation service using autonomous inland vessels. *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 3571–3576. <https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9922500>
- Alsos, O. A., Saghafian, M., Veitch, E., Petermann, F.-M., Sitompul, T. A., Park, J., Papachristos, E., Eide, E., Breivik, M., & Smogeli, Ø. (2024). Lessons learned from the trial operation of an autonomous urban passenger ferry. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 26, 101142. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101142>
- Aslaksen, I. E., Svanberg, E., Fagerholt, K., Johnsen, L. C., & Meisel, F. (2020). Ferry Service Network Design for Kiel fjord. In E. Lalla-Ruiz, M. Mes, & S. Voß (Eds.), *Computational Logistics* (Vol. 12433, pp. 36–51). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59747-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59747-4_3)
- Aslaksen, I. E., Svanberg, E., Fagerholt, K., Johnsen, L. C., & Meisel, F. (2021). A combined dial-a-ride and fixed schedule ferry service for coastal cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 153, 306–325. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.09.004>
- Bačkalov, I., Illuri, M. S. K., Kerkmann, T., & Oberhagemann, J. (2025). Definition of the Master as a key to unlocking autonomous shipping on inland waterways. *Ship Technology Research*, 72(1), 65–72. <https://doi.org/10.1080/09377255.2024.2386767>
- Bartels, S., & Meurer, T. (2025). COLREG compliant trajectory planning for autonomous vessels in areas with static and dynamic obstacles. *2025 European Control Conference (ECC)*, 1767–1772. <https://doi.org/10.23919/ECC65951.2025.11186934>
- Bolbot, V., Owen, D., Chaal, M., BahooToroody, A., Bergström, M., Rahikainen, M., & Banda, O. V. (2023). Investigation of Statutory and Class Society Based Requirements for Electronic Lookout. *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference*, 2954–2962. [https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1\\_P343-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1_P343-cd)
- Braathen, C., Goez, J. C., & Guajardo, M. (2024). Autonomous ferries in light of labor regulations—A passenger perspective. *Maritime Transport Research*, 7, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2024.100115>
- Brinkmann, M., Böde, E., Lamm, A., Maelen, S. V., & Hahn, A. (2017). Learning from automotive: Testing maritime assistance systems up to autonomous vessels. *OCEANS 2017 - Aberdeen*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084951>
- Chaal, M., Bolbot, V., Berres, A., & Banda, O. V. (2023). From Aviation to Maritime: An Approach to Define Target Safety Levels for the Safety Assurance of Autonomous Ship Systems. *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference*, 2917–2928. [https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1\\_P668-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-18-8071-1_P668-cd)
- Denizer, B., Dohse, N., & Landsiedel, O. (2025). Fjord5G: A Comprehensive 5G Dataset for Coastal Maritime Connectivity. *2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2025-Spring65109.2025.11174898>
- Freie Hansestadt Bremen. (2026, Februar 13). *Aktionsplan Klimaschutz der Freien Hansestadt Bremen: Maßnahme: L-MV-205*. Aktionsplan Klimaschutz der Freien Hansestadt Bremen. <https://aktionsplanklima.bremen.de/actions/L-MV-205>

- Goerlandt, F., & Pulsifer, K. (2022). An exploratory investigation of public perceptions towards autonomous urban ferries. *Safety Science*, 145, 105496. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105496>
- Hake, G., Maelen, S. V., & Hahn, A. (2021). Maintaining safety requirements of updated maritime surveillance systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54(16), 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.081>
- Heiberg, A., Larsen, T. N., Meyer, E., Rasheed, A., San, O., & Varagnolo, D. (2022). Risk-based implementation of COLREGs for autonomous surface vehicles using deep reinforcement learning. *Neural Networks*, 152, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.04.008>
- Kaster, M., Neugebauer, J., & Moctar, B. el. (2022). Challenges of autonomous shipping: Traffic analysis of inland vessels on the Rhine River. *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2234–2239. <https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9922301>
- Koschorrek, P., Kosch, M., Nitsch, M., Abel, D., & Jürgens, D. (2022). Towards semi-autonomous operation of an over-actuated river ferry. *At - Automatisierungstechnik*, 70(5), 433–443. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0152>
- Kracht, F. E., Jarofka, M., Oberhagemann, J., Henn, R., & Schramm, D. (2022). VeLABi – Research and control center for autonomous inland vessels. *At - Automatisierungstechnik*, 70(5), 411–419. <https://doi.org/10.1515/auto-2022-0007>
- Krasowski, H., & Althoff, M. (2022). Common-Ocean: Composable Benchmarks for Motion Planning on Oceans. *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1676–1682. <https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9921925>
- Kurowski, M., Roy, S., Gehrt, J.-J., Damerius, R., Buskens, C., Abel, D., & Jeinsch, T. (2019). Multi-Vehicle Guidance, Navigation and Control Towards Autonomous Ship Maneuvering in Confined Waters. *2019 18th European Control Conference (ECC)*, 2559–2564. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795726>
- Liu, J., Law, A. W.-K., & Duru, O. (2021). Abatement of atmospheric pollutant emissions with autonomous shipping in maritime transportation using Bayesian probabilistic forecasting. *Atmospheric Environment*, 261, 118593. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118593>
- Msakni, M. K., Akbar, A., Aasen, A. K. A., Fagerholt, K., Meisel, F., & Lindstad, E. (2020). Can Autonomous Ships Help Short-Sea Shipping Become More Cost-Efficient? In J. S. Neufeld, U. Buscher, R. Lasch, D. Möst, & J. Schönberger (Eds.), *Operations Research Proceedings 2019* (pp. 389–395). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48439-2\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48439-2_47)
- Schäfer, C., Motz, F., & Befort, L. (2025). Developing a Decision Support System for Vessel Traffic Services. *Journal of Physics: Conference Series*, 3123(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3123/1/012063>
- Sümer, M. (2023). *Overcoming the legal challenges of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and compliance with UNCLOS and SOLAS: Designation of a remote Master to assume the safety duties of a Master* [maastricht university]. <https://doi.org/10.26481/dis.20230411ms>

# Autonome Wasserfahrzeuge

## Impressum

Teil 3 der Reihe „Technologiedossiers: Hightech aus Deutschland für klimaneutrale Mobilität“

Entstanden im Projekt „BRIDGE-HTAD: Beteiligung, Regulierung, Innovation & Governance für sozial-ökologische Transformationspfade neuer Mobilitätstechnologien“

Projektleitung: Sabine Schröder, Dr. Filipe Mello Rose

Dossierautor: Dr. Filipe Mello Rose

Veröffentlichung Mai 2026 durch das nexus Institut für Kooperationsmanagement und interdisziplinäre Forschung

Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) fördert das Projekt „BRIDGE-HTAD: Beteiligung, Regulierung, Innovation & Governance für sozial-ökologische Transformationspfade neuer Mobilitätstechnologien“ im Rahmen der Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) [www.fona.de](http://www.fona.de) im Förderschwerpunkt Sozial-ökologische Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UV2501. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Sozial-ökologische Forschung