



Cyril Alias. Foto: Daniel Schumann

*Zur Verteilung von Import- und Exportcontainern im Ruhrgebiet und im nördlichen und östlichen Nordrhein-Westfalen entwickeln die Logistikforscher\*innen am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) ein in bestehende Systeme und Angebote integriertes Logistikkonzept auf der Basis von kleinen Binnenschiffen für den Einsatz im westdeutschen Kanalnetz sowie einem mobilen Bordkran.*

## Wasserstraßen als urbane Versorgungsadern

Ein Konzept zur Containerverteilung in  
Nordrhein-Westfalen mit Hilfe von kleinen  
Binnenschiffen und dezentralen Umschlagstellen  
Von Cyril Alias, Dieter Gründer, Jens Ley,  
Helmut Broß, Lennart Dahlke & Jonas zum Felde

Eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Wirtschaft erfordert heutzutage einen kosten- und ressourceneffizienten, zuverlässigen, sicheren und umweltfreundlichen Verkehr. Vorhandene Ressourcen müssen effizient genutzt werden, damit der Verkehrssektor nicht zu einem Engpass für die wirtschaftliche Entwicklung einer Region oder eines Landes wird. Dies gilt insbesondere für die bedeutenden Produktions- und Logistikstandorte, die auf eine gut funktionierende und vertrauenswürdige Verkehrsinfrastruktur angewiesen sind.

Für die Zukunft ist in Deutschland und Europa mit einem kontinuierlichen Wachstum der Güterströme zu rechnen, insbesondere im Hinblick auf wachsende Marktanteile des Online-Handels. Dies gilt insbesondere für Ballungsräume, die fast überall auf der Welt eine hohe Bevölkerungsdichte und wachsende Einwohner\*innenzahlen aufweisen. Die immer stärkere Nutzung des Straßen- und Schienenverkehrs in den letzten Jahrzehnten bei gleichzeitigem verzögertem oder aufgeschobenem Ausbau der Infrastrukturkapazitäten hat zu verfallender Infrastruktur, steigenden Unfallzahlen, zunehmender Umweltverschmutzung, Lärm, anderen gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf alle Verkehrsteilnehmer\*innen und nicht zuletzt zu schweren Staus geführt.



(1) Die inaktive Umschlagstelle 'Preußenhafen' in Lünen am Datteln-Hamm-Kanal  
Quelle: smial ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Luenen\\_Preussenhafen\\_IMG9730\\_wp.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Luenen_Preussenhafen_IMG9730_wp.jpg)), „Lünen Preussenhafen IMG9730 wp“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/legalcode>.

Parallel dazu zeichnet sich die Binnenschifffahrt durch hohe Zuverlässigkeit, Kosteneffizienz und Energieeffizienz aus – und bietet in verschiedenen Regionen in Europa und rund um den Globus noch erhebliche ungenutzte Potenziale [1]. Westeuropa, insbesondere Belgien, Deutschland und die Niederlande, verfügen über eine starke Binnenschifffahrtsindustrie mit einem dichten Netz, einer Vielzahl von Akteuren und Beteiligten und einem ausreichenden Frachtaufkommen. Nordrhein-Westfalen liegt direkt am Rhein und dem westdeutschen Kanalnetz und beherbergt einige der stärksten europäischen Binnenhäfen, darunter Duisburg als größten. Es vollzieht sich ein Wandel vom traditionell starken Trocken- und Flüssigmassengutverkehr hin zu einer zunehmenden Konzentration auf den wassergestützten Containertransport auf dem Rhein-Alpen-Korridor zu den westlichen Nordseehäfen, darunter Zeebrügge und Antwerpen (beide Belgien) sowie Rotterdam und Amsterdam (beide Niederlande). Während 2017 nur 11,3 Prozent aller mit Binnenschiffen beförderten Güter in Containern transportiert wurden, wobei etwa zwei Drittel beladene und ein Drittel leere Container ausmachten, waren es in NRW hingegen etwa 30 Prozent.

Während Straße und Schiene mit Staus, steigenden Emissionen und infrastrukturellen Engpässen zu kämpfen haben, bietet die Binnenschifffahrt Kapazitätsreserven an – insbesondere abseits der europäischen Hauptkorridore wie dem Rhein-Alpen- und dem Rhein-Donau-Korridor. Mit dem Güterstruktureffekt, infolgedessen Massenguttransporte immer mehr von Stückguttransporten substituiert werden, wird sich die Situation für die Binnenschifffahrt im Allgemeinen noch verschärfen. Neue Geschäftsmodelle und Tätigkeitsfelder sind daher dringend erforderlich.

Die Gründe für die bisherige Vernachlässigung der Binnenschifffahrt für Containertransporte in weiten Teilen von NRW liegen in der geringen Bekanntheit der Binnenschifffahrt als Verkehrsträgeroption bei den Entscheidungsträgern – sowohl bei Verladern als auch bei Logistikdienstleistern – sowie in einem spärlichen Verkehrsangebot im westdeutschen Kanalnetz mit geringer Netzabdeckung und einem eingeschränkten Leistungsangebot mit nur wenigen Verbindungen zwischen Häfen und Umschlagstellen im westdeutschen Kanalnetz und den großen Seehäfen oder gar den Binnenhäfen am Rhein. Während Ersteres zu der irrigen Vorstellung einer schwierigen Integrierbarkeit in bestehende, oft globale Transportketten führt, steht Letzteres mit technisch und wirtschaftlich wenig geeigneten Binnenschiffen, einer begrenzten Zahl von Umschlagstellen und einem Mangel an geeigneten (Container-)Umschlaggeräten an den jeweiligen Standorten in Zusammenhang. Ein dezentrales Containerbinnenschiffsverkehrskonzept zwischen NRW und den Seehäfen könnte eine wirtschaftlich sinnvolle und umweltfreundliche Alternative zu den bestehenden Verkehren sein.

Im Rahmen des Verbundprojekts DeConTrans (Innovative Konzepte für einen dezentralen Containertransport auf der Was-

serstraße; gefördert im Förderprogramm EFRE.NRW) wird ein neuartiges Logistikkonzept für den wassergestützten Containertransport entwickelt und untersucht. Im Mittelpunkt des Konzepts stehen ein dezentrales Netz von Umschlagstellen im westdeutschen Kanalnetz, der Einsatz kleiner, flexibler, hybridelektrischer und standardisierter Binnenschiffe sowie ein heterogener Mix von Containerumschlaggeräten, die neben klassischen Geräten auch mobile Bordkrane und zukünftig autonom an Land eingesetzte Krane umfassen. Mit dem Einsatz sowohl von standardisierten Binnenschiffen als auch von standardisierten Umschlaggeräten erscheint das Ziel eines wettbewerbsfähigen Betriebs des gesamten Netzwerks erreichbar, sofern es sich reibungslos in bestehende Supply-Chain-Konzepte und damit verbundene Material- und Informationsflüsse integrieren lässt. Letztlich gewährleistet ein dezentrales Netz aus einer Vielzahl kleiner Umschlagstellen entlang des Wasserstraßennetzes ein ausreichendes und zufriedenstellendes Leistungsniveau zu akzeptablen Kosten.

Nachfolgend wird die zugrundeliegende Idee eines dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrs einschließlich seines Logistikkonzepts, des Schiffskonzepts mit speziellen Schiffstypen für den wirtschaftlichen Betrieb im westdeutschen Kanalnetz, des Umschlagkonzepts mit bestehenden und neuartigen Lösungen sowie der Integration in bestehende Verkehrskonzepte sowie gängige Planungs- und Informationssysteme vorgestellt.

### Das Logistikkonzept

Das dem dezentralen Containerbinnenschiffsverkehr zugrundeliegende Logistikkonzept umfasst ein weit verzweigtes Netz der vielen kleinen Umschlagstellen in der betrachteten geografischen Region zwischen dem Rhein im Westen und den Landesgrenzen Nordrhein-Westfalens im Norden und Osten sowie dem

Osnabrücker Land in Niedersachsen. Konkret entspricht sie dem westdeutschen Kanalnetz neben den angrenzenden Rheinhäfen und umfasst den Datteln-Hamm-Kanal, den Dortmund-Ems-Kanal, den Mittellandkanal, den Rhein-Herne-Kanal, den Wesel-Datteln-Kanal und den schiffbaren Teil der Ruhr – sowie einen kleinen Teil der Weser.

### Das Transportnetz

Das betrachtete Gebiet wird auf geeignete Umschlagstellen geprüft, bis eine Reihe möglicher Standorte für die weitere Auswahl und Bearbeitung zur Verfügung feststeht. Der Auswahlprozess erforderte ein oder mehrere Kriterien, die durch eine gründliche Literaturrecherche und sogenannte semistrukturierte Expert\*inneninterviews zusammengestellt wurden. Die Literaturrecherche ergibt zunächst einen ersten Kriterienkatalog, der im Wesentlichen aus einschlägigen Referenzprojekten mit ähnlicher Aufgabenstellung, das heißt der Entwicklung neuartiger Containerlogistikkonzepte, teilweise sogar unter Einbeziehung der Binnenschifffahrt, und dem Aufbau neuer Distributionsnetze, stammt. Auf der Grundlage des anfänglichen Kriterienkatalogs beginnt der qualitative Forschungsteil mit einer Reihe von halbstrukturierten Expert\*inneninterviews, in denen der Kriterienkatalog durch die Meinungen der verschiedenen Expert\*innen validiert und erweitert wird. Die ausgewählten Interviewpartner\*innen stammen aus Reedereien, Logistikdienstleistern, Versendern unterschiedlicher Containerladungen, Landesministerien, Kommunen, Industrie- und Handelskammern, Ingenieurbüros, Hafenbehörden und -betrieben, Softwareanbietern und Wissenschaftler\*innen aus den Bereichen Softwaretechnik, Schiffsbau, Maschinenbau und Logistikmanagement.

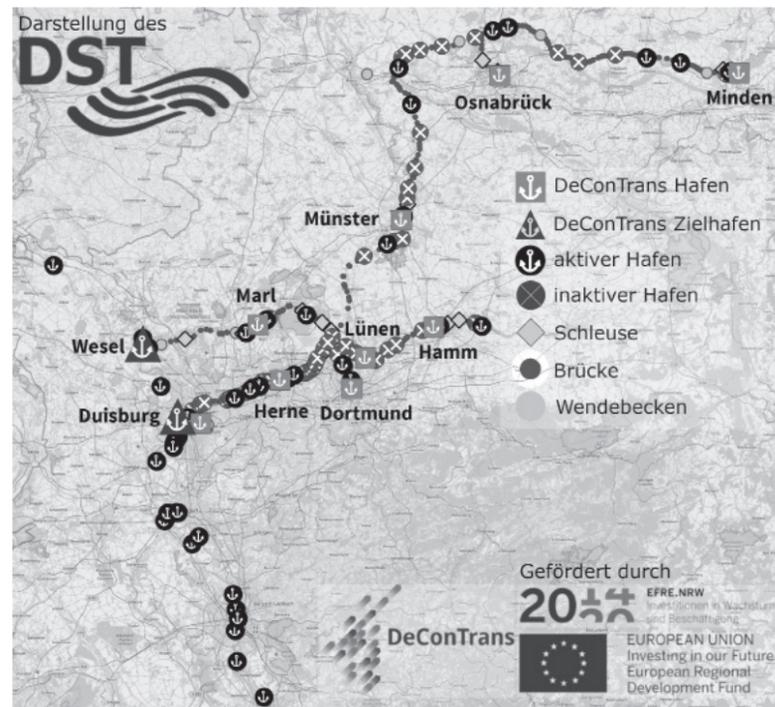
Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurden alle möglichen Umschlagstellen erfasst und aufgelistet. Da aufgrund der Tradition des

Kohlebergbaus, der Erzverhüttung und der Eisen- und Stahlproduktion in NRW viele ehemalige Produktionsstätten stillgelegt wurden und seither brachliegen, sofern sie nicht bereits zu Wohn- und Naherholungsgebieten umgewidmet wurden, weisen viele Standorte noch die infrastrukturellen Voraussetzungen für einen zukünftigen Güterumschlag auf. Abbildung (1) zeigt das Satellitenbild eines beispielhaften inaktiven Umschlagplatzes, der Gutehoffnungshütte in Oberhausen.

Die Sammlung möglicher Umschlagstellen umfasst somit große Häfen im westdeutschen Kanalnetz, kleinere Umschlagstellen entlang der Wasserstraßen und inaktive Ladestellen auf stillgelegten Flächen. Insgesamt umfasste die endgültige Liste möglicher Umschlagstellen 105 Standorte im gesamten Gebiet [2]. Abbildung (2) zeigt die möglichen Umschlagstellen auf einer Karte.

Ein optimales Logistiksystem zeichnet sich durch hohe Effizienz, geringe Lagerbestände, hohe Transparenz, niedrige Kosten und eine hohe Verfügbarkeit aus. Die Öffnung aller Häfen kann zu einem maximalen Serviceniveau führen – allerdings zu erheblich höheren Kosten, die möglicherweise zu Unrentabilität führen. Eine sorgfältige Auswahl der Umschlagspunkte aus der Gesamtmenge von 105 möglichen Standorten ist daher eine Aufgabe, die im Laufe der Untersuchungen zu bewältigen ist. In den späteren Phasen wird die Anzahl der Umschlagstellen in beide Richtungen geändert – als Reaktion auf die Ergebnisse der einzelnen Konfigurationen.

Die Häfen Dortmund, Hamm, Herne (Wanne-West), Lünen, Marl (Brassert), Minden, Mülheim an der Ruhr, Münster sowie Bohmte und Osnabrück bilden zusammen die neun Häfen, mit denen die Untersuchung beginnen wird. Im Laufe der Untersuchungen wird diese Liste angesichts der jeweiligen Erkenntnisse angepasst, so dass manche Standorte gestrichen und andere hinzugefügt werden können. Die



(2) Mögliche Umschlagstellen des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrs im westdeutschen Kanalnetz Quelle: DST

Binnenhäfen, die in einem Exportzenario als erste Ziele dienen, sind das DeCeTe-Terminal in Duisburg und der Hafen Emmelsum in Wesel.

### Das Frachtaufkommen

Nachdem eine vorläufige Menge von Umschlagpunkten im betrachteten Wasserstraßennetz festgelegt worden ist, werden im nächsten Schritt die in jeder betrachteten Gemeinde und schließlich in jedem der neun betrachteten Häfen anfallenden Frachtmengen ermittelt. Die Frachtmengen stellen die Ladung dar, die über Duisburg und Wesel mittels der Binnenschifffahrt zu den westlichen Nordseehäfen in Belgien und den Niederlanden zu befördern ist. Um die Realität bestmöglich abzubilden, mussten komplexe Regeln für die Aufteilung der Frachtmengen auf die verschiedenen Umschlagstellen aufgestellt werden. In Anlehnung an die Realität wird das Frachtaufkommen einer Gemeinde nicht vollständig einem Hafen zugeordnet, sondern nach einer plausiblen Logik auf mehrere Häfen verteilt [3].

Im Prinzip hat jeder Hafen ein bestimmtes Einzugsgebiet, aus dem er seine Fracht erhält. Dies führt dazu, dass eine Gemeinde ihre Güter anteilig an mehr als einen Umschlagplatz schicken kann. In diesem Fall wird die geografische Nähe belohnt und die Entfernung bestraft. Je größer die Entfernung zwischen einer beliebigen Gemeinde und einem der möglichen Umschlagstellen ist, desto geringer ist ihr Anteil am dort umgeschlagenen Frachtvolumen – und umgekehrt. Letztendlich hat jeder Umschlagplatz ein bestimmtes erwartetes Frachtaufkommen pro Jahr (und pro Woche).

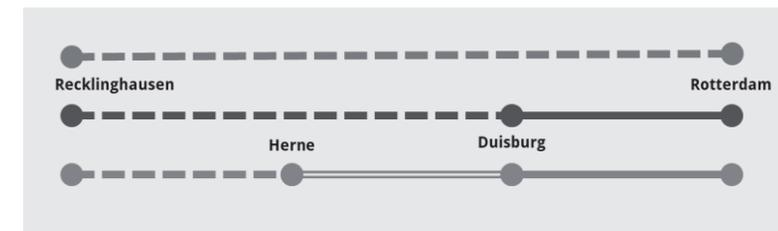
### Die Transportkosten

Nach dem Transportnetz und den Transportmengen besteht der letzte Schritt in der Berechnung der Transportkosten. Generell gilt, dass die Transportkosten pro Tonnenkilometer in der Binnenschifffahrt aufgrund der Fixkostendegression mit zunehmender Entfernung abnehmen. Darüber hinaus nehmen die Kostendegressionseffekte mit zunehmender

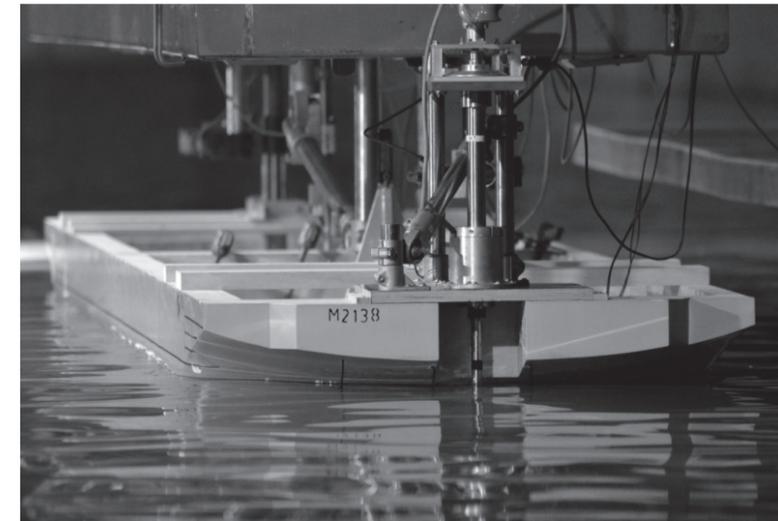
Größe der Schiffstypen zu. Dies lässt sich damit erklären, dass kleine Binnenschiffe ihren maximalen Tiefgang erreichen und dass die Fixkosten auf mehr Ladung verteilt werden können. Hinsichtlich der Kosten für den Containertransport ergab ein Vergleich der drei Verkehrsträger – Straße, Schiene und Binnenschifffahrt – einen komparativen Kostenvorteil der Binnenschifffahrt, der je nach Transportrelation zwischen 15 und 43 Prozent liegt [4].

Für einen Kostenvergleich wird ein interkontinentaler Transport von Recklinghausen nach Foshan (China) über Rotterdam als zugrundeliegender Anwendungsfall herangezogen. Der Fokus dieses Beispiels liegt auf dem Vorlauf. Daher wird der Transport zwischen Recklinghausen und Rotterdam als exemplarischer Transportfall für die anschließende Kostenanalyse verwendet. Die Kostenanalyse umfasst drei verschiedene Konfigurationen der Transportkette: einen direkten Lkw-Transport, einen Lkw-Transport von Recklinghausen nach Duisburg, gefolgt von einer Binnenschiffstrecke nach Rotterdam, und einen dritten Fall, bei dem große Teile der ursprünglichen Lkw-Strecke durch eine Kombination aus einer viel kürzeren Lkw-Strecke zu einem näheren Umschlagplatz, wie zum Beispiel Herne, und einer Binnenschiffstrecke zwischen Herne und Duisburg ersetzt werden. Abbildung (3) zeigt die drei Konfigurationen.

Da die Kosten für den endgültigen Umschlag in Rotterdam bei allen drei Konfigurationen anfallen, werden sie bei der folgenden Betrachtung nicht weiter berücksichtigt. Beim direkten Lkw-Transport fallen nur die Kosten für die Beförderung zwischen Recklinghausen und Rotterdam an. Die zweite Konfiguration beinhaltet die Transportkosten für den Lkw-Transport von Recklinghausen nach Duisburg, die Umschlagskosten für den Umschlag in Duisburg und die



(3) Alternative Konfigurationen einer exemplarischen Transportkette mit Lkw (gestrichelte Linie), Binnenschiffsliniendienst auf dem Rhein (durchgezogene Linie) und dem neuen Servicekonzept des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrs (Doppellinie)  
Quelle: DST



(4) Hydrodynamische Untersuchungen mit Maßstabsmodellen der kleinen Binnenschiffe im Flachwassertank des DST  
Quelle: DST

Transportkosten für die Binnenschiffstrecke zwischen Duisburg und Rotterdam. Der dritte Fall umfasst die Lkw-Transportkosten von Recklinghausen nach Herne, die Binnenschiffstrecke zwischen Herne und Duisburg sowie zwischen Duisburg und Rotterdam und die Umschlagskosten sowohl in Duisburg als auch in Herne. Tatsächliche oder realistische Zahlen werden zu einem späteren Zeitpunkt für die Kostenberechnungen und Vergleiche herangezogen.

### Das Schiffskonzept

Wie bereits erwähnt, basiert der neue Dienst auf speziellen kleinen Binnenschiffstypen, die auf die besonderen wirtschaftlichen, technischen und nautischen Anforderungen für einen nachhaltigen Betrieb im

westdeutschen Kanalnetz zugeschnitten sind. Leicht abweichend von der Literatur werden kleine Binnenschiffe hier als Schiffe bis zur CEMT-Klasse V definiert, da die neu entworfenen Schiffe zwischen 50 und 95 Metern lang und zwischen 6,8 und 9,5 Metern breit sind. Die Ladekapazität der kleinen Binnenschiffe beginnt bei acht Twenty-foot Equivalent Unit (TEU) und steigt allmählich auf 30 TEU beziehungsweise 36 TEU an. Die grundlegenden Schiffstypen sind – aufgrund der niedrigen Brückenhöhen – als einlagige Transportfahrzeuge konfiguriert, zwei von ihnen wurden jedoch auch als zweilagige Varianten konzipiert, um das logistische Potential infolge einer möglichen Anhebung der Brücken untersuchen zu können. Die Konfiguration wird mit den geographischen Gegebenhei-

ten des westdeutschen Kanalnetzes begründet, insbesondere mit dem Lichtraumprofil der Schiffe unter Berücksichtigung der Brückenhöhen, der Fahrwassertiefgänge und der Schleusenabmessungen.

Da die Schiffe im Kanalnetz verkehren sollen, ist mit einem geringen Energiebedarf zu rechnen, was wiederum die Verfolgung eines hybridelektrischen Antriebs ermöglicht. Die Geschwindigkeit über Grund der verschiedenen Schiffe beträgt für die Schiffstypen 1 bis 4 zehn Kilometer pro Stunde und für die Schiffstypen 5, 5\* und 6 jeweils zwölf Kilometer pro Stunde. Darüber hinaus sind die Schiffe hinsichtlich der hydrodynamischen Eigenschaften optimiert, um einen minimalen Energiebedarf zu gewährleisten. Aus regulatorischer Sicht stellen diese Geschwindigkeiten die zulässige Höchstgeschwindigkeit dar. Schiffe mit einem Tiefgang von bis zu 1,3 Metern dürfen in Kanälen eine Höchstgeschwindigkeit von zwölf Stundenkilometern erreichen, während größere Schiffe auf eine Höchstgeschwindigkeit von zehn Kilometern pro Stunde begrenzt sind.

Um die Kosten zu senken, sind die Schiffe für den Ein-Mann-Betrieb ausgelegt. Dies entspricht bisher zwar noch nicht den behördlichen Vorgaben der deutschen Wasserstraßenverwaltung, ein Blick über die Grenzen in die Niederlande zeigt jedoch, dass dies wohl die Zukunft sein wird, da die Niederlande Sondergenehmigungen für den Ein-Mann-Betrieb solcher kleinen Schiffe erteilt haben [5]. Gegebenenfalls sollen die Schiffe im Tagbetrieb beziehungsweise im Schichtbetrieb mit Besatzungswechsel betrieben werden. Auf diese Weise können die Schiffe ohne Wohnräume für die Besatzung ausgelegt werden, da die Besatzungsmitglieder nach ihrer jeweiligen Arbeitsschicht nach Hause gehen können [6]. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Betriebsformen A1 und A2, kann aber auch die Betriebsform B ein-



schließen, wenn ein Personalwechsel im Gange ist. Darüber hinaus stellen die ferngesteuerte, die automatisierte und sogar die unbemannte Schiffsführung Optionen für die Zukunft dar.

Häufig wurden Aufgaben wie das Anlegen in Schleusen und Häfen von einer zweiten Person übernommen, während der Kapitän das Schiff steuerte. In einem Ein-Mann-Betriebsszenario müssen solche Aufgaben automatisiert erledigt werden. Daher müssen Anlegesysteme in Schleusen und Häfen einen automatischen Betrieb ermöglichen, da die Schiffe zu klein sind und sich wahrscheinlich eine Schleuse mit anderen Schiffen teilen müssen und somit ihre Position in der Schleusenammer kontrollieren müssen. Dadurch ist der Bedarf an Arbeitskräften geringer als bei herkömmlichen Schiffen. Die Zukunft wird langfristig sogar eine völlig automatisierte Führung von Binnenschiffen bedeuten.

Da die Ladekapazität eines einzelnen kleinen Binnenschiffs für die lange Reise von und zu den westlichen Nordseehäfen über den Rhein zu gering sein kann, bieten die Schiffe die Möglichkeit, sich zu einem Schubverband zusammenzuschließen. In einem Exportszenario würden die einzelnen Schiffe in einem Binnenhafen entlang des Rheins, zum Beispiel in Wesel, ankommen und mit einem speziellen Schubboot zu einem Schubverband zusammengefasst werden.

Abhängig vom jeweiligen Einsatzfall und -gebiet bieten die Schiffe auch die Möglichkeit des Roll-on-Roll-off-Transports (RoRo). Dies setzt jedoch die infrastrukturellen Voraussetzungen sowohl am Ausgangs- als auch am Zielort der Binnenschiffahrt voraus und kann somit auch als Umschlagoption betrachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Binnenschiffe so konzipiert sind, dass sie durch einen hohen Automatisierungsgrad einen kosteneffizienten Betrieb ermögli-

chen und somit den vermeintlichen Nachteil der geringen Größe aufwiegen.

### Das Umschlagskonzept

Das Umschlagskonzept für den dezentralen Containerbinnenschiffsverkehr basiert auf einer bunten Mischung bestehender und neuartiger Lösungen für das Laden von Containern auf und das Löschen von Containern vom Binnenschiff. Für die Häfen und Umschlagstellen, die bereits im Containerumschlag aktiv sind, ist das entsprechende Umschlaggerät bereits vorhanden. Die größeren Binnenhäfen im westdeutschen Kanalnetz, wie Dortmund und Minden, verfügen über große Containerkräne. In Häfen und Umschlagstellen mit geringerem Containerumschlag sind häufig so genannte Reachstacker, das heißt Greifstapler für den Umschlag intermodaler Frachtcontainer, im Einsatz. Kleinere Binnenhäfen und Häfen mit Schwerpunkt auf dem Massengutumschlag sind hierfür gute Beispiele. Während ein großer Ship-to-Shore-Containerkran Kosten von mehreren Millionen Euro verursachen kann, ist ein gebrauchter Reachstacker bereits für eine Viertelmillion Euro zu haben [7]. Dadurch kann das mit einem Neueinstieg in den Containerumschlag verbundene Investitionsrisiko deutlich gesenkt werden, was wiederum mehr Häfen, die früher den Containerumschlag vernachlässigt und sich möglicherweise ausschließlich auf den Massengutumschlag konzentriert haben, dazu veranlasst, ihr Dienstleistungsportfolio zu erweitern.

Während für Häfen und Umschlagstellen mit ausreichender Umschlagsaktivität die oben genannten bestehenden Lösungen eine praktikable Option darstellen, ergibt sich für Standorte ohne oder mit nur geringen Aktivitäten ein deutlich anderes Bild. Um solche Standorte an das Netz anzuschließen, müssen die Investitionskosten

an dem jeweiligen Standort minimiert werden.

Für bestimmte Relationen erscheint der RoRo-Betrieb sinnvoll, so dass die Binnenschiffe so ausgelegt sind, dass sie bei Bedarf auf RoRo-Betrieb umgerüstet werden können. RoRo-Schiffe sind Fahrzeuge, die es ermöglichen, Ladung auf ihren eigenen Rädern zu bewegen. Die Ladung wird mit Hilfe von Eisenbahnwaggons, Lkw, Lkw-Anhängern und anderen landgestützten Transportfahrzeugen auf die Schiffe gebracht. Nach der Binnenschiffahrtstrecke wird die Fracht dann mit landgestützten Transportmitteln entladen. Das RoRo-System zeichnet sich durch kurze Umschlagzeiten bei vergleichsweise geringer Infrastruktur an den Umschlagstellen aus. RoRo wird in der Regel zur Überbrückung geografischer Lücken, zum Beispiel im Kurzstreckenseeverkehr, eingesetzt, bietet aber auch Anwendungsmöglichkeiten in bestimmten Bereichen der Binnenschiffahrt. Dazu bedarf es jedoch eines Konzepts zur bedarfsgerechten Bereitstellung der Zugmaschinen, die die Sattelaufleger am jeweiligen Hafen abholen.

Ähnlich wie das RoRo-Konzept erfordert ein dezentrales Konzept ein gewisses Maß an Unabhängigkeit von den infrastrukturellen Anforderungen der Umschlagstellen. Im Idealfall wird die Umschlagaufgabe vom Schiffsbetreiber zusammen mit der Transportaufgabe übernommen.

Ein mobiler Bordkran stellt eine attraktive Alternative dar, da die Investitionskosten beim Schiffseigner und -betreiber und nicht bei der Umschlagstelle liegen. Dadurch können viele Standorte, die über kein stationäres oder mobiles Containerumschlaggerät verfügen, Teil des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrskonzepts werden. Einzige Voraussetzung für die Standorte ist eine ausreichende Bodenstabilität, ähnlich wie bei RoRo-Rampen oder Häfen mit

Reachstackern und Containerkränen. Ein solcher mobiler Bordkran ist Teil des Umschlagkonzepts des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrskonzepts [8]. Der Kran sitzt auf der Seitenpassage des Schiffes und kann über dessen Länge verfahren werden (Abb. 5). Bei einlagigem Containerverkehr kann er über der Ladebucht des Schiffes eingesetzt werden, ohne durch die Brückenhöhen beeinträchtigt zu werden. Er ist zudem so konstruiert, dass der Steuerstand des Binnenschiffs gleichzeitig die Krankabine darstellt, so dass kein wertvoller Platz an Bord des Fahrzeugs verschwendet wird. Der\*Die Schiffsführer\*in kann dann – nach Anlegen des Fahrzeugs im Hafen – den Betriebsmodus auf den Kranbetrieb wechseln. Mit dem Kran und seinem Scherenliftsystem kann der\*die Schiffsführer\*in die zu verladenden Container an Bord aufnehmen und anheben, bevor er\*sie anschließend über eine Rampe an Land fährt, um sie dort an den richtigen Stellplätzen abzustellen. Nach Abschluss der Umschlagaktivitäten kann der Kran wieder an Bord fahren und seine Grundposition ein-

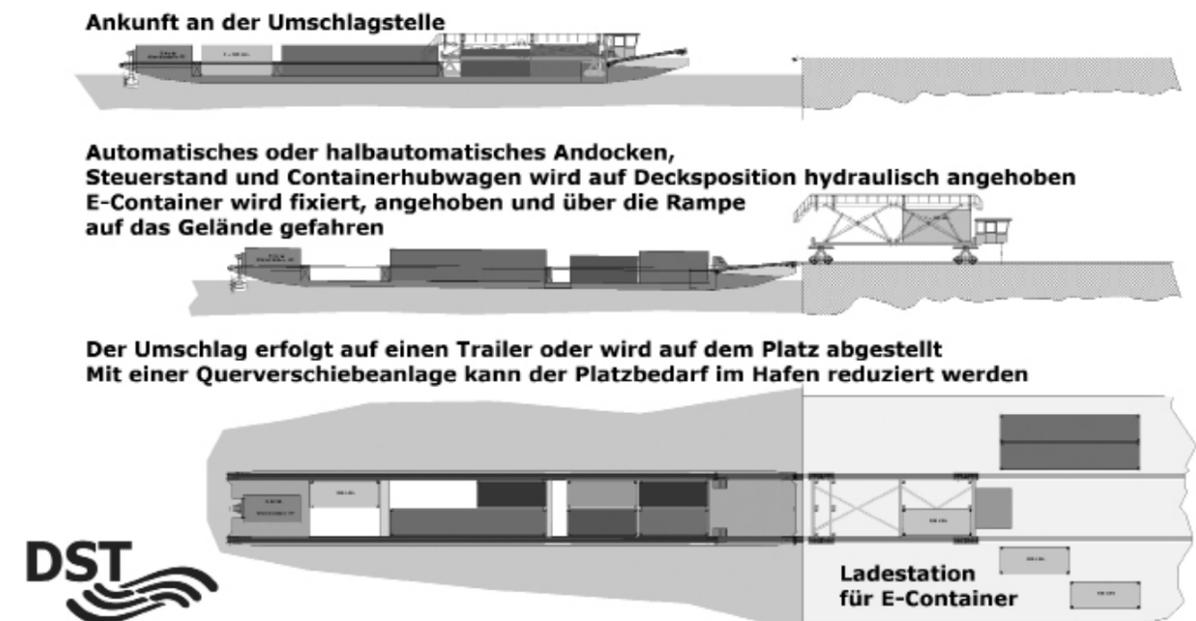
nehmen. Die Energieversorgung für den mobilen Bordkran erfolgt mit einem Wechselakkupack.

Der mobile Bordkran ermöglicht dem Schiffsbetreiber eine größere Flexibilität bei der Annahme von Haltepunkten auf seiner Route und damit eine bessere Anpassung an die dynamisch auftretende Nachfrage nach Transport- und Umschlagleistungen. Sollte sich das neue Konzept des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrs durchsetzen, ist eine Aufrüstung der Containerumschlaganlage an Land weiterhin möglich. Ausgehend von einer einfachen Rampe für den RoRo-Betrieb und dem Einsatz des mobilen Bordkrans kann die Hafenbehörde in einen kosteneffizienten Reachstacker investieren, bevor bei einer vielversprechenden Entwicklung des Umschlagvolumens eine weitere Aufrüstung zur Container-Suprastruktur erfolgt. Zukünftig sind auch automatisierte unbemannte Containerbrücken denkbar, um ein personenfreies Szenario ohne Menschen an Bord der Binnenschiffe und am Umschlagplatz zu ermöglichen. Dabei reicht

die automatische Containerbrücke über das Binnenschiff, die Containerstellplätze und den Lkw. Sowohl das Binnenschiff als auch der Lkw müssen sich in vordefinierten Bereichen des Liegeplatzes beziehungsweise des Docks positionieren. Der automatische Kran erkennt die Position des Containers, der vom Schiff entladen werden soll, hebt den Container an, trägt ihn an Land und setzt ihn auf den Anhänger des Lkw. Anstelle des direkten Umschlags können die Container auch im Hafen abgestellt und später vom Lkw abgeholt werden. Dazu muss jeder Containerplatz mit einer Vorrichtung ausgestattet sein, auf die der Container gestellt werden kann und unter die der Lkw seinen Anhänger schieben kann, um den Container zu übernehmen. Es wird erwartet, dass der hohe Automatisierungs- und Standardisierungsgrad zu einer erheblichen Kostenreduzierung führen wird.

### Das Integrationskonzept

Das Integrationskonzept umfasst die Einbettung des neuen Dienstleis-



(5) Darstellung des Anlege- und Umschlagvorgangs des mobilen Bordkrans  
Quelle: DST

tungskonzepts in bestehende Transportketten und Wertschöpfungsnetzwerke sowie die Anbindung an die heutige Landschaft der im Transportmanagement eingesetzten Informations- und Kommunikationssysteme.

Grundsätzlich kann die Integration des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrs in bestehende Transportketten auf unterschiedliche Weise erfolgen [9]. Abbildung (6) zeigt die bestehende Transportkette und drei verschiedene Möglichkeiten der Integration des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrskonzepts.

Im Exportfall beginnt der Nachlauf einer bestehenden Transportkette in einem der westlichen Nordseehäfen, von denen aus die Container vom Containerliniendienst auf dem Rhein übernommen werden. Die Ladung wird zu einem großen Binnenhafen transportiert, wo sie für den Transport auf der letzten Meile zum Empfänger auf Lkw umgeladen wird. Abbildung (6) zeigt diesen Basisfall als Szenario A.

In Szenario B werden die Container mit konventionellen Liniendiensten auf dem Rhein vom Seehafen zu einem großen Binnenhafen gebracht. Von dort aus übernehmen die kleinen Binnenschiffe die Feinverteilung der Container über das an das westdeutsche Kanalnetz angren-

zende Gebiet. Die Verteilung auf der letzten Meile, die viel kürzer ist als im Szenario A, erfolgt dann per Lkw oder Zug.

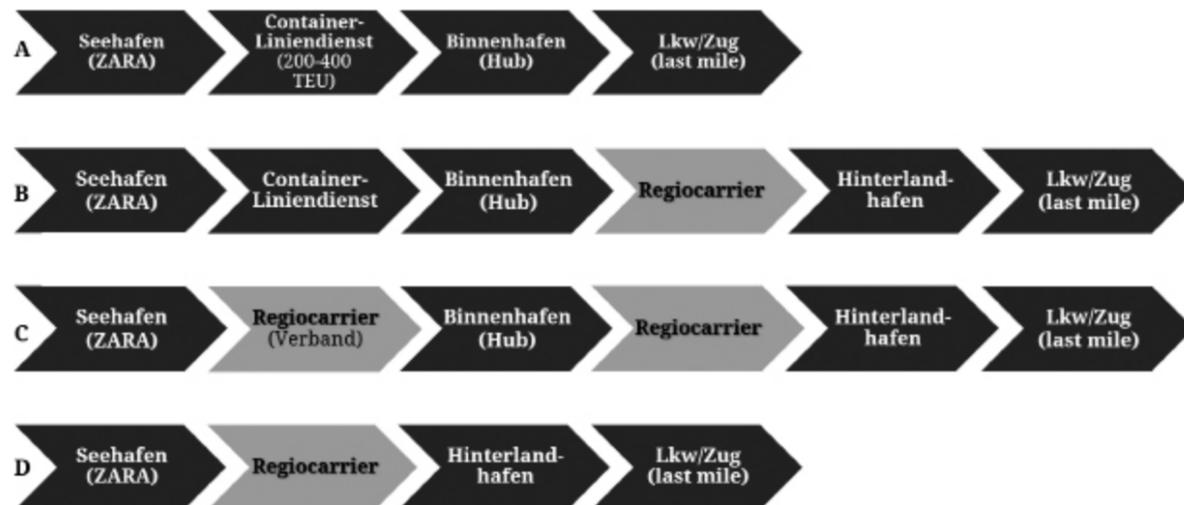
Das Szenario C sieht einen Verband von kleinen Binnenschiffen vor, der die Container vom Seehafen zum großen Binnenhafen transportiert. Dort wird der Konvoi aufgelöst, und die einzelnen kleinen Binnenschiffe fahren zur Umschlagstelle im Hinterland, von dem aus die letzte Etappe beginnt. Auf diese Weise kann der Umschlag im großen Binnenhafen am Rhein entfallen, da die kleinen Binnenschiffe im Seehafen entsprechend dem Endziel beladen werden.

Im Szenario D übernehmen die kleinen Binnenschiffe die Ladung im Seehafen und transportieren sie direkt zur Umschlagstelle im Hinterland, von der aus die kurze letzte Meile per Lkw beziehungsweise Zug zurückgelegt wird. Dieses Szenario impliziert, dass die kleinen Binnenschiffe die Ladung sowohl im Kanalnetz als auch auf dem Rhein transportieren werden. Auch hier entfällt ein Umschlag im großen Binnenhafen am Rhein.

Der Innovationsgrad steigt von den Szenarien B bis D, da immer größere Teile der Transportkette von den neuen kleinen Binnenschiffen übernommen werden sollen. Wäh-

rend sich ihre Rolle in Szenario B auf einen Zubringerdienst zu den großen Binnenhäfen am Rhein beschränkt, werden sie in Szenario D zu einem eigenen Zubringerdienst zu den Seehäfen und konkurrieren somit mit den großen Liniendiensten auf dem Rhein. Der Vergleich der drei Szenarien untereinander erfolgt im Laufe des Verbundprojekts auf Basis der ereignisdiskreten Simulation und liefert Informationen über das Leistungsniveau, das Kostenniveau, die Rentabilität und die ökologischen Auswirkungen.

Neben der Integration in bestehende Transportketten muss die Einbindung des gesamten Dienstleistungskonzepts in die heutige Landschaft der im Transportmanagement eingesetzten Informations- und Kommunikationssysteme sichergestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der oben erwähnte exemplarische Anwendungsfall wiederverwendet, um die Integrierbarkeit des neuen Konzepts in die bestehende IKT-Landschaft im Verkehrsmanagement zu zeigen. Der exemplarische Anwendungsfall setzt auf Szenario B auf und beschreibt einen interkontinentalen Transport von Recklinghausen nach Foshan via Rotterdam. Während des Planungsprozesses, der vom Verlager, dem Logistik-



(6) Integrationsszenarien der kleinen Binnenschiffe in existierende Transportketten  
Quelle: DST

dienstleister oder dem Intermodal-Operator initiiert wird, wird jede Transportteilstrecke einzeln gebucht. Im Beispielfall umfasst der Buchungsprozess den Seetransporteur für die interkontinentale Strecke, die beiden Lkw-Strecken in Deutschland und der VR China, die Binnenschiffstrecke auf dem Rhein und die Binnenschiffstrecke im westdeutschen Kanalnetz.

Sobald die Buchung für jeden Transportabschnitt abgeschlossen ist, werden die entsprechenden Transportdetails einschließlich der Bedingungen und Anforderungen, die bei der Durchführung des jeweiligen Abschnitts zu berücksichtigen sind, an den Transportdienstleister übermittelt. Somit werden alle Dienstleister vor der eigentlichen Durchführung der Dienstleistung benachrichtigt.

Auch die Durchführung des Transports kann mit gängigen und am Markt bereits erhältlichen Lösungen begleitet werden. Bevor der eigentliche Transportvorgang auf jeder einzelnen Transportteilstrecke beginnt, erfolgt die Beladung nach der Ankunft des Transportfahrzeugs an dem Abfahrtsort, an dem die Container und die dazugehörigen Dokumente abgeholt werden sollen. Am jeweiligen Zielort angekommen, werden sowohl die Ladung als auch die Dokumente an die nachfolgende Partei übergeben. Nach Abschluss jeder Etappe wird die für die Transportplanung und -durchführung verantwortliche (und in direktem Kontakt mit dem Versender stehende) Partei informiert und auf dem Laufenden gehalten. Der gesamte Prozess wird laufend überwacht, so dass bei Abweichungen geeignete (Gegen-)Maßnahmen ergriffen oder sogar eine Neuplanungsiteration ausgelöst werden kann. Nach Abschluss der Transportabschnitte werden die Rechnungen erstellt und übermittelt, bevor schließlich jeder Dienstleister den fälligen Vertragsbetrag erhält. Im DeConTrans-Projekt wurden zur Illustration marktübliche und weit verbreitete Planungssysteme und

operative Softwarelösungen exemplarisch nachgebildet. Anhand von jenen gemeinhin bekannten Benutzer\*innenoberflächen, die die Computer- und Handheld-Bildschirme bei den verschiedenen Disponent\*innen, Fahrer\*innen und anderen Mitarbeiter\*innen darstellen, sieht der jeweilige Entscheidungsträger keinen großen Anpassungs- oder Änderungsbedarf in seiner oder ihrer täglichen Arbeit, da die Bildschirme jenen ähneln, die bereits im Einsatz sind. Dadurch kann die Binnenschiffahrt als „normaler“ Verkehrsträger wahrgenommen werden, ohne dass ein erhöhtes Hintergrund- oder Fachwissen erforderlich ist. Es ist zu erwarten, dass die einfache Bedienung die Akzeptanz und Verbreitung der Binnenschiffahrt in großen Transportketten globaler Wertschöpfungsnetzwerke fördert.

#### Fazit und Ausblick

In Anbetracht der sich immer weiter verschärfenden Situation des Güterverkehrs in vielen Teilen Europas und der verzögerten oder verschobenen Kapazitätserweiterung auf der Straße und Schiene, der starken Überlastung und der externen Kosten des Transports bietet die Binnenschiffahrt ausreichend Wachstumspotenzial und verspricht Zuverlässigkeit, Kosteneffizienz und Energieeffizienz. Als Reaktion auf das erodierende Massengutaukommen und den Güterstruktureffekt müssen die Binnenschiffbetreiber in Deutschland nach neuen Betätigungsfeldern Ausschau halten. Der Containertransport erscheint als ein vielversprechender Bereich, da der Anteil des Containertransports in der Binnenschiffahrt in den nächsten Jahrzehnten deutlich steigen wird. Es wird erwartet, dass neue Dienstleistungskonzepte auf Basis der Binnenschiffahrt die Verkehrsverlagerung unterstützen werden. Im DeConTrans-Projekt wird ein dezentrales Containerbinnenschiffsverkehrskonzept für das westdeutsche Kanalnetz vorgestellt

und die zugrundeliegenden Konzepte – das Logistikkonzept, das Schiffskonzept, das Umschlagkonzept und das Integrationskonzept – erläutert.

Im Rahmen des Logistikkonzepts wurde das Transportnetz mit Hilfe aller aktiven und inaktiven Umschlagpunkte im betrachteten Gebiet aufgebaut. Die in den jeweiligen Gemeinden anfallenden Gütermengen wurden erfasst und den verschiedenen Häfen und Umschlagpunkten des Netzes nach vorgegebenen Regeln zugeordnet. Außerdem wurden die Transportkosten aktueller Transportketten, zum Beispiel direkter Lkw-Transport, eine bimodale Transportkette mit Lkw und Binnenschiff und eine neue Transportkette mit einem zusätzlichen Binnenschiffslauf im Vorlauf miteinander verglichen.

Das Schiffskonzept umfasst sieben Schiffstypen der CEMT-Klassen III bis V mit Ladekapazitäten zwischen 8 und 36 TEU. Aufgrund des Lichtraumprofils der Binnenwasserstraßen in der betrachteten geografischen Region ist bei der Erstausrüstung der Schiffe nur eine Containerlage möglich. Die Binnenschiffe sind als selbstfahrende Einheiten konzipiert, können sich aber auch zu einem Schubverband zusammenschließen und von Schubbooten geschoben werden. Die Betriebsmodi A1, A2 und B werden alle unterstützt – möglicherweise mit einem laufenden Personalwechsel. Das Umschlagskonzept umfasst sowohl bestehende als auch neuartige Lösungen. Bestehende Infrastruktur für den Containerumschlag soll weitestgehend genutzt werden, da dies den Bedarf an Investitionen an den jeweiligen Umschlagstellen erheblich senkt. Während in größeren Binnenhäfen des westdeutschen Kanalnetzes Containerbrücken vorhanden sind, dürften kleinere Umschlagstellen eher auf mobile Einheiten wie Reachstacker zurückgreifen, die sie möglicherweise bereits besitzen oder deren Anschaffung aufgrund ihrer Kosteneffizienz

in Erwägung ziehen. Um auch solche Umschlagstellen an das Netz anzubinden, die über kein Containerumschlaggerät verfügen und auch kein solches anschaffen werden, sieht das Konzept einen mobilen Bordkran vor, um die Eintrittsbarriere für Interessenten zu senken.

Im Hinblick auf das Integrationskonzept muss das neue Angebot in bestehende Transportketten und Wertschöpfungsnetzwerke eingebettet werden. Anhand eines exemplarischen Anwendungsfalles werden drei verschiedene Integrationszenarien vorgestellt. Darüber hinaus lässt sich das neue Angebot mit den bestehenden Planungs- und Monitoringlösungen des heutigen Transportmanagements verknüpfen. Indem die Planungs- und Ausführungsprozesse des beispielhaften Anwendungsfalles so modifiziert werden, dass der neue Dienst zu einem integralen Bestandteil desselben wird, wird die systemseitige Integrierbarkeit aufgezeigt.

Aus den Ergebnissen der numerischen Optimierung der hydrodynamischen Auslegung der Schiffe lassen sich der Energiebedarf und die geschätzten Kosten, einschließlich der Investitions- und Betriebskosten, ableiten. Ebenso werden die Konzeption des mobilen Bordkrans abgeschlossen und die Stabilität des Krans auf dem Binnenschiff während der Fahrt, des Anlegens und des Umschlags analysiert, untersucht und validiert. Im Hinblick auf das Logistikkonzept werden detaillierte Analysen zur Konfiguration des Transportnetzes durchgeführt. Mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation werden die Flottenzusammensetzung, die Servicelevels und Auslastungsindikatoren, die geschätzten Transport- und Umschlagskosten sowie die ökologischen Auswirkungen des dezentralen Containerbinnenschiffsverkehrskonzepts untersucht.

### Summary

Congested roads and highways, ailing bridges, noise and exhaust pollution – North Rhine Westphalia suffers from constant traffic-induced congestion and pollution on the road. In order to distribute import and export containers in the Ruhr area as well as the northern and eastern parts of the state, the logistics researchers of the Development Centre for Ship Technology and Transport Systems (DST) in Duisburg have developed a logistics concept based on small inland barges to be operated in the West German canal network and on a heterogeneous set of transshipment solutions.

As part of this logistics concept, the transportation network has been designed with all active and inactive transshipment points in the geographic area concerned identified and included into the basic network. The freight volumes occurring in the related municipalities have been collected and assigned to the various ports and transshipment points of the network according to predetermined rules. Moreover, the transportation costs of current transport chains, such as direct truck transport, a bimodal transport chain with trucks and inland vessels, and a new transport chain with an IWT leg in the pre-haul have been compared with each other.

The vessel concept includes seven inland vessel types ranging from 50 to 95 metres in length, 6.80 to 9.50 metres in width, and 8 to 36 TEU in load capacity. They are designed as single-layer transport vehicles due to unfavourable bridge heights in the geographic area concerned.

The transshipment concept includes the adoption of both existing and novel solutions. Existing container handling infrastructure is to be utilized to the greatest possible extent, as it lowers the need for infrastructural investments at the

respective transshipment locations considerably. In order to link such transshipment locations that have no container handling equipment at hand and are not likely to acquire such to the new service, the concept includes a mobile on-board crane.

With respect to the integration concept, the designated service is embedded into existing transport chains and value-creation networks, for example the existing liner services on the Rhine. Moreover, it is harmonized with existing planning and monitoring systems in the transportation and logistics domain.

By doing so, the potential of inland waterway transportation for growth and its promise of reliability, cost efficiency and energy efficiency is turned into reality.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Andreas Stolte, Henk Heuvelman, Guido Giesen, Jens Diepenbruck, Roland Frindik, Udo Salewski, Oliver Stern, Sven Severin und Florian Blümel für die konstruktive Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen. Die Forschungsarbeit, die zu diesen Ergebnissen geführt hat, wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) im Rahmen des Leitmarktwettbewerbs „Mobilität & Logistik.NRW“ unter dem Förderkennzeichen EFRE-0801222 (ML-2-1-010A, DeConTrans) gefördert.

### Anmerkungen/Literatur

- [1] Janjevic, Milena; Ndiaye, A.B.: Inland waterways transport for city logistics; a review of experiences and the role of local public authorities in Brebbia, C.A.; Longhurst, J.W.S. (Hrsg.): Urban Transport XX. Proceedings of the 20th International Conference on Urban Transport and the Environment, WIT Press, Southampton (GB), 2014, S. 279–290  
 [2] Alias, Cyril; Dahlke, Lennart; Heerwagen, Ole; Gründer, Dieter; zum Felde, Jonas; Pusch, Lea; Severin, Sven: Identifying Suitable Transshipment Points for a Decentralized Waterborne Container Transportation Network in 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, Piscataway

(USA), 2020, S. 799–806

[3] Alias, Cyril; Gründer, Dieter; Dahlke, Lennart; zum Felde, Jonas; Pusch, Lea: Determining the Freight Volumes for a Decentralized Waterborne Container Transportation Service in 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, Piscataway (USA), 2020, S. 786–793

[4] Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße, Bonn, 2007

[5] Zentralkommission für die Rheinschifffahrt: Verordnung über das Schiffspersonal auf dem Rhein, RheinSchPersV, Straßburg (F), 2018

[6] Europäischer Ausschuss für die Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt: European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels, ESTRIN, Straßburg (F), 2017

[7] POM Oost-Vlaanderen: Overview – methods. Gent (B), 2019

[8] Alias, Cyril; Broß, Helmut; zum Felde, Jonas; Gründer, Dieter: Enabling Decentralized Transshipment in Waterborne Container Transportation. in Jahn, Carlos; Kersten, Wolfgang; Ringle, Christian M. (Hrsg.): Adapting to the future. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics. Bd. 32, 1. Aufl.,

epubi, Berlin, 2021. S. 137–166

[9] Alias, Cyril; Pusch, Lea; Gründer, Dieter; Dahlke, Lennart; Broß, Helmut; Heerwagen, Ole; zum Felde, Jonas: Designing a decentralized water-borne container transportation service using small inland vessels in Proff, Heike (Hrsg.): Making Connected Mobility Work, Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte, Springer Gabler, Wiesbaden, 2021

### Die Autoren

Nach seinen Studienabschlüssen in internationalem Management in Rotterdam (NED) und Bielefeld (DEU) erwarb Cyril Alias Masterabschlüsse in Logistikmanagement und Technischer Logistik in Duisburg (DEU). Mit der Erfahrung aus einigen Stationen in der Industrie wechselte Cyril Alias zum Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik der Universität Duisburg-Essen, an dem er in mehreren nationalen und internationalen Forschungsprojekten, darunter auch EU-finanzierten Projekten (FP7, FI-PPP usw.), in leitender und koordinierender Funktion tätig war. Seit 2019 ist Cyril Alias beim DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme als Leiter des Fachbereichs III – Logistik und Verkehr (ehemals

Transportsysteme und Schiffsbetrieb) tätig. Dort zeichnet er für verschiedene Projekte auf nationaler und internationaler Ebene im Bereich der Binnenschifffahrt und Hafenlogistik verantwortlich. Darüber hinaus leitet er das Versuchszentrum für innovative Hafen- und Umschlagtechnologien (HaFoLa) in Duisburg, und ist Vorstandsmitglied des Zentrums für Logistik und Verkehr der Universität Duisburg-Essen. Er leitet das Forschungsprojekt DeConTrans.

**Dieter Gründer** ist Diplom-Ökonom und im Fachbereich III – Logistik und Verkehr.

**Jens Ley** ist Diplom-Schiffbauingenieur und leitet den Fachbereich II – Entwicklung und Simulation von Schiffen und Offshore-Strukturen seit 2018.

**Helmut Broß** ist Diplom-Schiffbauingenieur im Fachbereich II – Entwicklung und Simulation von Schiffen und Offshore-Strukturen.

**Lennart Dahlke** ist Informatiker im Fachbereich IV – Autonomes Fahren.

**Jonas zum Felde** ist Logistiker und im Fachbereich III – Logistik und Verkehr.



Jonas zum Felde. Foto: Daniel Schumann

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/78095

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20230331-132626-5

Erschienen in: UNIKATE 59 (2023), S. 58-71

Alle Rechte vorbehalten.