



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2016

Schriftenreihe Projektträger Jülich



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2016

Schriftenreihe Projektträger Jülich

## Grußwort



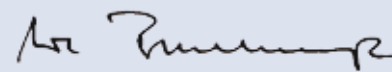
Die maritime Branche ist das Segel für den Wirtschaftsstandort Deutschland: Wer über Außenhandel spricht, meint auch Häfen, Schifffahrt und Logistik. Denn erst eine leistungsfähige maritime Wirtschaft ermöglicht unseren Erfolg als Exportnation. Zukunftstechnologien und marktfähige Innovationen sind dabei ein wichtiger Wettbewerbsfaktor. Der Bund unterstützt die Branche deshalb mit gezielten Förderprogrammen.

Das Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ gibt den unternehmerischen Aktivitäten Rückenwind: Mit insgesamt 30 Millionen Euro fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Forschung, Entwicklung und Innovationen in den vier Feldern Schiffstechnik, Produktion maritimer Systeme, Schifffahrt und Meerestechnik.

Mit dem Start der neuen Förderperiode zum 1.1.2018 wollen wir das Programm noch passgenauer auf die Bedürfnisse der Wirtschaft ausrichten. Daran arbeiten wir aktuell gemeinsam mit der Branche. Unser Ziel ist eine Förderung entlang der gesamten maritimen Wertschöpfungskette.

Der vorliegende Tagungsband zeigt die ganze Bandbreite der unternehmerischen Innovationen: von neuesten Schiffstechniken über die Möglichkeiten der Produktionsplanung bis hin zu sicherer Schiffsführung und Unterwasser-Monitoring-Methoden.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und viele neue Impulse.



Uwe Beckmeyer, MdB

Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Wirtschaft und Energie und Maritimer Koordinator der Bundesregierung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWi finanziert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

#### Herausgeber und Vertrieb

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zentralbibliothek, Verlag  
D-52425 Jülich  
Telefon 02461 61 - 53 68  
Telefax 02461 61 - 61 03  
E-Mail [zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)  
Internet [www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

#### Satz und Layout

Kristina Ehrhardt, Projektträger Jülich

#### Bildnachweis

Projekt SMIS

#### Druck

Schloemer und Partner GmbH, Düren

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-95806-187-3

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JUWEL)  
unter [www.fz-juelich.de/zb/juwel](http://www.fz-juelich.de/zb/juwel)

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

## Inhaltsverzeichnis

### **COSINUS – Kooperative Schiffsführung für nautische Sicherheit** ..... 9

André Bolles, Alex Hahn (OFFIS)  
Michael Braun (Signalis)  
Sven Rohde (Raytheon Anschutz)  
Knud Benedict (Hochschule Wismar)

### **PASSAGES – Protection & Advanced Surveillance System for the Arctic: Green, Efficient, Secure** ..... 25

Frank Michaelis (Airbus Defence and Space GmbH)

### **BinGas – Entwicklung von Technologien zum LNG-Transport mit Binnenschiffen** ..... 39

M. Sc. Friederike Dahlke (UDE - Universität Duisburg-Essen)  
Prof. Dr.-Ing. Ould el Moctar (UDE - Universität Duisburg-Essen)  
Prof. Dr.-Ing. Benjamin Friedhoff (DST - Entwicklungszentrum  
für Schiffstechnik und Transportsysteme)  
Dr.-Ing. Manuel Boog (MTU - MTU Friedrichshafen GmbH)  
Dipl.-Ing. Benjamin Scholz (DNV GL)

### **HEPP – Hocheffiziente Produktionsplanung für Prototypenkompetenz** . 53

Dirk Steinhauer (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG)  
Prof. Dr.-Ing. Markus König, Thomas Hilfert (Ruhr-Universität Bochum)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, Dr.-Ing. Axel Friedewald,  
Jan Niklas Sikorra, Moritz Alexander Haux (Institut für Produktionsmanagement  
und -technik, Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Michael Hübler, Andreas Roppelt (Center of Maritime Technologies e.V.)  
Ilka Habenicht (SimPlan AG)

### **INKOV – Entwicklung innovativer Kolben- und Ventillösungen mit Werkstoffverbunden in Schiffsmotoren** ..... 69

Dipl.-Ing. Peter Kolbe (Gesensschmiede Schneider GmbH Aalen)  
Dipl.-Ing. André Wagner (Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Bludszweit (MET Motoren- und Energietechnik GmbH)  
Dipl.-Ing. Henrik Specht (WTZ Roßlau gGmbH)

### **SchiV3.0 – Schiffsicherheit, Vermessung und Logistik** ..... 93

Michael Moskopp, Matthias Breyer (VOMATEC)  
Frank Hartmann, Prof. Dr. Wilhelm Stork (KIT)  
Ralph Zimmermann, André Schreiber, Frank Norda (MEYER WERFT)

### **FLEXMOT – Flexible Umweltmonitoring-Plattform für Notfall- und Langzeiteinsätze im Offshore-Bereich** ..... 109

Matthias Lunge, Carsten Frank, Peer Fietzek, Daniel Esser  
(Kongsberg Maritime Contros GmbH)  
Thomas Ruth, Stefan Audersch, Prof. Uwe Freiherr von Lukas (Fraunhofer IGD)  
Volker Nuppenau, Manfred Kühn, Frank Appel, Dr. Gerd Schriever (Oktopus GmbH)  
Dr. Uwe Rudolf (LEONI Special Cables GmbH)  
Dr. Sascha Flögel, Dr. Olaf Pfannkuche (GEOMAR Kiel)

## **SMIS – Subsea Monitoring via Intelligent Swarms** . . . . . 125

Dr. Sven Hoog, Alexander Schormayer (IMPac Offshore Engineering GmbH, Hamburg)  
Dr. Carl Thiede, (ENITECH Energietechnik - Elektronik GmbH, Bentwisch)  
Martin Kurowski, Erik Rentzow, Detlef Dewitz, Matthias Wulff,  
Prof. Bernhard P. Lampe, Prof. Torsten Jeinsch  
(Universität Rostock, Institut für Automatisierungstechnik)  
Sebastian Ritz, Florin Boeck, Matthias Golz, Prof. Gerd Holbach  
(Technische Universität Berlin, Institut für Land und Seeverkehr)  
Sergej Neumann, David Oertel  
(Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozesskontrolle und Robotics)  
Prof. Joanna J. Waniek, Dr. David Kaiser  
(Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde)

## **NAUTEK – Neue Wege bei der Reinigung von Abwässern an Bord von Kreuzfahrtschiffen** . . . . . 143

Stephan Köster, Elmar Dorgeloh, Lutz Kretschmann, Thilo Seibicke, Mark Grigo

## **PerSee – Performance von Schiffen im Seegang** . . . . . 155

M. Riesner, S. Sigmund, O. el Moctar (Universität Duisburg-Essen)  
M. Palm, J. Springer, D. Jürgens (Voith), M. Scharf, M. Lemmerhirt,  
M. Abdel-Maksoud (Technische Universität Hamburg-Harburg)  
J. Wagner, E. Binkowski, R. Bronsart (Universität Rostock)  
S. Uharek, A., A. Lengwinat, Cura Hochbaum (Technische Universität Berlin)  
P. Valanto (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt)  
S. Harries (Friendship Systems), V. Shigunov (DNV GL)  
S. Walter (Meyer Werft)

## **HoOK – Hochseeoperationen mit Kranen** . . . . . 175

Hendrik Vorhölter (Mareval AG)  
Hendrik Gröne (HeavyLift@Sea GmbH)  
Stefan Krüger (TUHH – Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit)

## **OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Vertstellpopellern und Hybridantrieben** . . . . . 189

Marc Steinwand (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH)  
Sophie Stutz, Kay Tigges (Siemens AG)  
Moustafa Abdel-Maksoud, Jan Clemens Neitzel-Petersen,  
Markus Pergande (Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Frank Oberhokamp, Wolfgang Sichermann, Christian Thieme  
(thyssenkrupp Marine Systems GmbH)

## **BiWi – Binnenwasserstraßenanschluss Wilhelmshaven** . . . . . 205

Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff  
(DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.)  
Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar (UDE – Universität Duisburg-Essen)  
Dipl.-Ing. Holger Mumm (DNV GL)

## **COSINUS –**

### **Kooperative Schiffsführung für nautische Sicherheit**

Förderkennzeichen: 03SX367

André Bolles, Axel Hahn (OFFIS)  
Michael Braun (Signalis)  
Sven Rohde (Raytheon Anschütz)  
Knud Benedict (Hochschule Wismar)

### **Zusammenfassung**

Die e-Navigation Strategie der IMO zielt auf die Erhöhung der maritimen Verkehrssicherheit durch Verbesserung der Kooperation der beteiligten maritimen Stakeholder. Verbessertes Datenaustausch zwischen Schiff und Land soll zu verbesserten Lagebildern und damit zur frühzeitigeren und verlässlicheren Erkennung und Vorbeugung von Gefahren beitragen.

Das COSINUS-Projekt trug zu dieser Strategie bei, indem im Rahmen dieses Projektes Konzepte für die Erzeugung gemeinsamer Lagebilder an Bord und an Land entwickelt wurden. Mit Hilfe dieser Konzepte erhalten die beteiligten Stakeholder eine gemeinsame Entscheidungsgrundlage auf deren Basis die Vermeidung von gefährlichen Situationen im Schiffsverkehr umgesetzt werden kann. Die in COSINUS entwickelten Konzepte ermöglichen es, Routen, Radar- und AIS-Informationen auszutauschen und auf deren Basis höherwertige Informationen wie bspw. Informationen über Abschattungen zu generieren.

### **Einleitung**

Schiffahrtsstraßen in der Deutschen Bucht sind wichtige wirtschaftliche Infrastrukturen. Schiffssicherheit und sichere Seewege (im Sinne einer Unfallsicherheit wie z. B. Kollisions- und Grundberührungssicherheit) sind insbesondere für Deutschland für den internationalen Warenaustausch von elementarer Bedeutung, da der überwiegende Teil des deutschen Gütertransfers (292 Mio. t Güter in 2015<sup>1)</sup> über den Seeweg abgewickelt wird.

Zunehmender Schiffsverkehr, technisches und menschliches Versagen sowie Extremwetterereignisse (Stürme, ungewöhnlicher Seegang) beeinflussen die Verkehrsabwicklung auf den Schiffahrtsstraßen und stellen vielfältige

<sup>1)</sup> de.statista.com

Gefahren für die Schiffssicherheit dar. Schiffsunfälle mit zunächst örtlich begrenzten Schadenslagen können sich zu überregionalen wirtschaftlichen Schäden (Sperrung von Verkehrswegen) oder Umweltschäden mit katastrophalen Ausmaßen ausweiten. Unterbrechungen von Hauptrouten des Seeverkehrs in der Deutschen Bucht führen zu Unterbrechungen von Produktions- und Dienstleistungsprozessen mit hohen volkswirtschaftlichen Schäden.

Es werden integrierte maritime Verkehrsleit- und Sicherheitssysteme benötigt, die sowohl die Effizienz des Seeverkehrs steigern als auch den Schutz des Meeres und der Küsten, von Schiffen und maritimen Infrastrukturen vor den Folgen von Unfällen sicherstellen. In der Deutschen Bucht führen insbesondere Nutzungskonflikte zwischen Schifffahrt und Errichtung/Betrieb von Offshore-Windparks zu neuen Herausforderungen. Zukünftige maritime Verkehrssicherheitssysteme müssen einen stetig steigenden Schiffsverkehr in immer mehr von Windparkanlagen durchdrungenen Küstengewässern und die damit verbundenen Herausforderungen der Schiffsführung berücksichtigen. Die stärkere Integration von Sicherheitssystemen und die verbesserte Kommunikation und Kooperation der beteiligten Akteure in Gefahrensituationen sind zentrale Aspekte der e-Navigation Strategie<sup>2</sup> der International Maritime Organization (IMO), die in den Nationalen Masterplan Maritime Technologien (NMMT) und das Forschungsprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation (2011-2015)“ eingeflossen sind.

## Zielstellung

Die Integration maritimer Verkehrssicherheitssysteme (s. Abbildung 1) an Land und an Bord ermöglicht die Erzeugung umfassender, zuverlässiger maritimer Verkehrslagebilder.



Abbildung 1: Integrierte maritime Verkehrsüberwachung

<sup>2</sup>) <http://www.imo.org/OurWork/Safety/Navigation/Pages/eNavigation.aspx>

Zur Erhöhung der nautischen Sicherheit in der Deutschen Bucht adressierte das COSINUS-Projekt die Integration von integrierten Brücken- und VTS-Systemen mit Schwerpunkt auf einer integrierten Routen- und Manöverplanung. Dieses Projekt untersuchte grundlegende Integrationsaspekte von INS und VTS-Systemen wie Datenschnittstellen, Datenfusion, Konsistenzprüfungen und Datenqualitätsaspekte.

Gemäß den IMO-Empfehlungen in der e-Navigation Strategie wurde im Projekt ein nutzerzentrierter Ansatz angewendet, der darauf abzielte allen beteiligten Akteuren eine Gefahrenerkennung und Unfallvermeidung durch kooperative Schiffsführung zu ermöglichen.

## Verwandte Projekte

Vor und während der Laufzeit von COSINUS beschäftigte sich eine ganze Reihe von Projekten mit der Erhöhung von maritimer Verkehrssicherheit unter Nutzung von e-Navigation-Konzepten. Wesentliche Vorgängerprojekte wie Bassy und EfficienSea wurden bereits im Proposal zu COSINUS dargestellt.

Die engste Verwandtschaft bestand jedoch zum Projekt ACCSEAS. In diesem InterReg Projekt wurden parallel zur Laufzeit von COSINUS verschiedene technologische Bausteine zur e-Navigation erprobt. Insbesondere wurde auch der Routenaustausch zwischen Schiff und Land in ACCSEAS betrachtet. Ziel des entsprechenden Experimentes in ACCSEAS war die Demonstration der Eignung des IVEF-Standards für den Datenaustausch. Das ACCSEAS-Projekt hat zur Erzeugung eines einheitlichen Lagebildes daher explizit auf den IVEF-Standard sowohl für die Schiffseite als auch für die Landseite gesetzt und erfolgreich erprobt. Der Fokus der Entwicklungen in COSINUS lag auf Verwertbarkeit unter Praxisbedingungen mit kommerziellen Werkzeugen und die dafür notwendige Unterstützung verschiedener Hersteller existierender Systeme. Daher hat das COSINUS-Konsortium eine Systemarchitektur aufgebaut, die die Verwendung beliebiger Standards ermöglicht. Dieser Ansatz ist insbesondere vor dem Hintergrund gewählt worden, dass auf der Schiffseite IVEF nicht der maßgebliche Standard ist, sondern unter anderem die ECDIS-Prüfvorschrift (IEC 61174 ed. 4.0). Das COSINUS-Systemkonzept sowie die einzelnen Bausteine dieses Konzeptes werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

## Konzept

Das Konzept zur Erstellung eines integrierten schiffs-/landseitigen Lagebildes ist angelehnt an die e-Navigation Architecture der IMO[1].

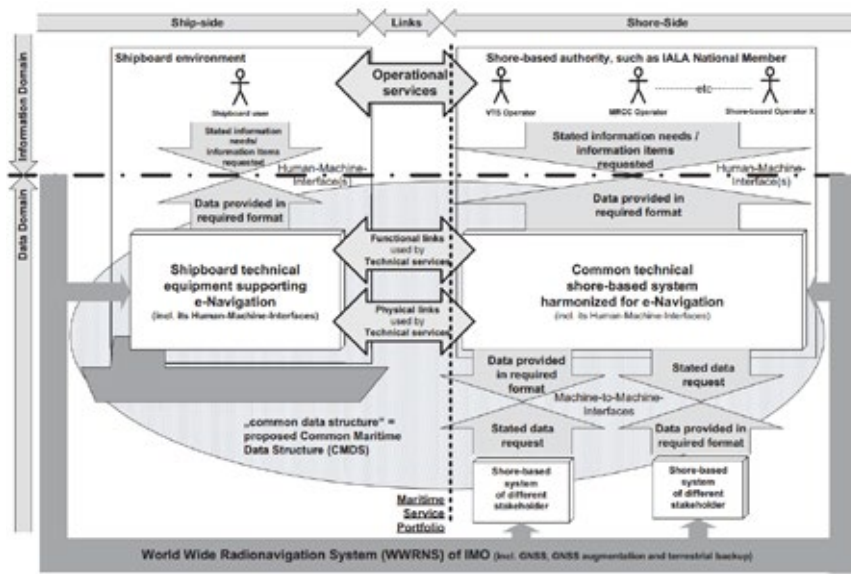


Abbildung 2: e-Navigation Architecture der IMO

Aus dieser e-Navigation Architecture wurde im Rahmen des COSINUS-Projektes die Architektur des COSINUS-Systemansatzes abgeleitet. Diese Architektur ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

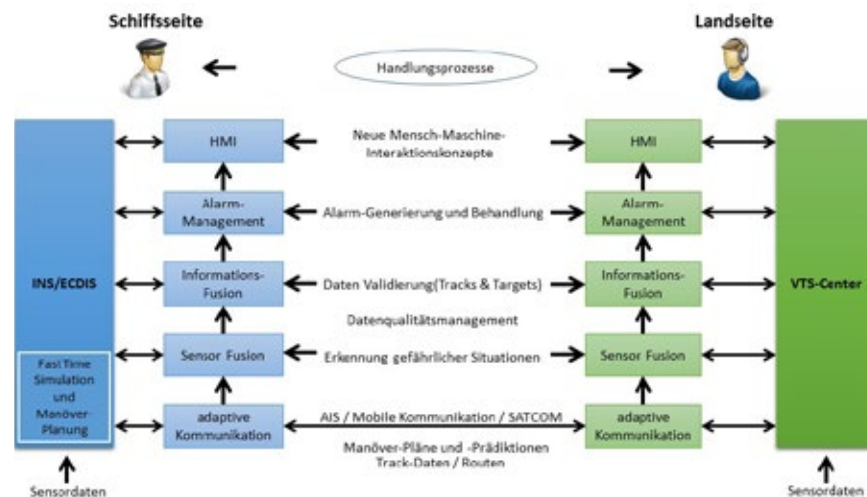


Abbildung 3: COSINUS-Systemarchitektur

Sie berücksichtigt die Informationsbereitstellung und –aufbereitung auf beiden Seiten (Schiff und Land) von der rein technischen Datenkommunikation über die Generierung höherwertiger Informationen bis hin zur adäquaten Dar-

stellung für menschliche Nutzer wie Kapitäne und VTS-Operateure sowie der Prozesse innerhalb derer Handlungen zur Vermeidung und Auflösung kritischer Verkehrssituationen umgesetzt werden müssen.

Auf der untersten Ebene dieser Architektur ist der eigentliche Datenaustausch zu erkennen, der über verschiedene Kommunikationskanäle realisiert werden kann. Auf dieser Ebene können AIS und Radardaten sowie Routeninformationen ausgetauscht werden. Im Rahmen des COSINUS-Projektes wurde dazu sowohl auf breitbandige LTE-Kommunikation wie auch auf VHF-Datenkommunikation gesetzt.

Basierend auf den synchronisierten Daten werden in beiden Systemen, VTS und Brücke, Lagebilder so fusioniert, dass sowohl das Personal an Bord eines Schiffes als auch das Personal in einer VTS-Verkehrsleitzentrale dasselbe Lagebild zur Verfügung haben. Mit Hilfe von Qualitätsinformationen wie bspw. der Auflösung eines Radarsensors kann zudem die Verlässlichkeit des Lagebildes abgeschätzt werden.

Das einheitliche Lagebild wird genutzt, um sowohl an Land als auch auf See ein einheitliches Alarmmanagement umzusetzen. Hierzu wurden z. B. Verfahren zur routenbasierten CPA-Berechnung umgesetzt.

Neue Mensch-Maschine-Schnittstellen ermöglichen einen effizienten Umgang mit den neu zur Verfügung stehenden Informationen. Für die Entwicklung dieser Schnittstellen wurden verschiedene Studien durchgeführt, die die Effizienz vorhandener und neuer Interaktionskonzepte bewerteten.

Auf der Schiffsbrücke wurde zusätzlich zur Erweiterung des Lagebildes durch schiffsfremde Sensoren auch die Möglichkeit der genaueren Planung von zukünftigen Manövern geschaffen. Die Manöverpläne werden dabei innerhalb der Schiffsbrücke berechnet. Bei dem entsprechenden Modul handelt es sich um ein neuartiges Planungsmodul, das unter Berücksichtigung der Schiffsdynamik und der durch den Schiffsführer geplanten Fahrweise die voraussichtliche Trajektorie des Schiffes berechnet und visuell auf einer Seekarte darstellt.

### Datenaustausch

Wesentliche Basis für die kooperative Schiffsführung zwischen Land und See ist der Austausch von lagebildrelevanten Daten. Zu diesen wurden im Rahmen von COSINUS AIS-Daten, Radardaten und Routen gezählt. Für den Austausch dieser Daten wurden in COSINUS im Wesentlichen zwei Aspekte betrachtet:



- Der eigentliche Datenaustausch
- Die Transformation der Daten von den Quelldatenformaten in die Ziel-  
datenformate der jeweiligen Systeme VTS und integriertes Brücken-  
system

Der eigentliche Datenaustausch wurde in Projekt COSINUS zunächst im Labor über eine gewöhnliche Ethernet-Schnittstelle und einer TCP/IP-Verbindung erprobt. Anschließend wurden zwei physische Funkkanäle benutzt, um die Übertragung der Daten auch im realen Testfeld umsetzen zu können. Zunächst wurde mit Hilfe einer LTE-Mobilfunkverbindung eine breitbandige Kommunikationsverbindung zwischen dem Schiffsystem und dem VTS-System hergestellt. Der Test dieser Verbindung zeigte, dass neben den zuvor genannten Daten auch Videodaten übertragen werden konnten, so dass auch landseitig die Sicht auf die Schiffsbrücke möglich war. Derzeit noch nachteilig ist die geringe Netzabdeckung auf See. Neben der LTE-Mobilfunkverbindung wurde daher auch noch die Übertragung mittels VHF-Datenfunk geprüft. Hierzu wurden zwei Satelliten 3ASd EASy Pro 35 W mit 1,2m Rundstrahl Stabantennen verwendet. Die Sendeleistung wurde per Dämpfungsglieder auf 2,5W begrenzt. Die verfügbare Bandbreite betrug 19200 Bits pro Sekunde. Der Test zur Datenübertragung mit dieser Konfiguration wurde zunächst im Labormaßstab mit geringer Entfernung (ca. 30m) an Land durchgeführt. Anschließend wurde eine Datenübertragung vom Forschungsboot Oztum der Universität Oldenburg, das sich im Fahrwasser der Elbe in Cuxhaven befand, an eine im Amerikahafen in Cuxhaven aufgebaute VTS-Station durchgeführt. Mit Hilfe dieses Kanals konnten die wesentlichen Daten AIS, Radarziele und Routen auch dann übertragen werden, wenn bspw. Kaimauern den direkten Sichtkontakt zwischen den Antennen verhinderten. Der Nachteil dieses Kommunikationskanals liegt dabei jedoch in der fehlenden Implementierung eines Protokollstacks wie er bei klassischen Internetverbindungen bspw. durch das ISO/OSI-Schichtenmodell [2] vorzufinden ist. Das hat insbesondere auf der physischen Ebene den Nachteil, dass sehr leicht Fehler bei der Datenübertragung auftreten können, die nicht korrigiert werden. Für den sicheren Betrieb des Systems mit Hilfe dieses Kommunikationskanals ist daher eine Implementierung entsprechender Korrekturmechanismen erforderlich.

Neben der eigentlichen Datenübertragung war, wie bereits erwähnt, auch eine Transformation der Daten in die Zielformate der empfangenden Systeme notwendig. Bei den AIS und Radardaten war dies relativ einfach, da hier die standardisierten NMEA 0183 Nachrichten ausgetauscht wurden. Für AIS waren dies die Position Reports und Static Voyage Data und für Radar TTM- und TLL-Nachrichten. Für den Routenaustausch war eine Übersetzung von einem JSON-basierten Routenformat des Brückensystems in das standardi-

sierte IVEF notwendig. Zwar steht mit dem nach IEC 61174 ed. 4 definierten „Route plan format for export and import“ inzwischen auch auf Seite des Integrierten Brückensystems ein standardisiertes Format zur Verfügung. Dieses war während der Projektlaufzeit jedoch wegen der damals noch nicht abgeschlossenen Standardisierung noch nicht im Testsystem implementiert. Die Transformation und Weiterleitung der Daten wurde mit Hilfe von Odysseus[3], einem Datenstrommanagementsystem, umgesetzt, das es erlaubte, die eigentliche physische Kommunikation und die Verarbeitung auf den beiden Systemseiten voneinander zu kapseln. Die Verarbeitung der Daten erfolgt in diesem System mit Hilfe sogenannter Operatorgraphen, die je nach Bedarf für die jeweilige Anwendung konfiguriert werden können. Operatoren führen jeweils einzelne Datenverarbeitungsschritte durch. Ein einheitliches zugrundeliegendes Datenmodell ermöglichte es im Rahmen des Projektes einzelne Operatoren auszutauschen und so andere Konfigurationen der Datenverarbeitung ohne großen Aufwand zu erproben.

### Daten- und Informationsfusion

Durch einen Austausch von AIS zwischen Schiff und Land kann die Reichweite für den Empfang von AIS-Signalen erhöht werden. In diesem Fall fungieren die beteiligten Schiffe und VTS-Zentralen als Relaystationen. AIS-Daten die von landbasierten Antennen aufgrund ihrer Reichweite nicht mehr empfangen wurden, konnten jedoch noch von Schiffen bereitgestellt werden, die auf See eine entsprechend geringere Distanz zu den entsprechenden AIS-Zielen aufwiesen. Gleiches gilt entsprechend für die umgekehrte Richtung, wenn die AIS-Antennen-Kette eines VTS-Zentrums Ziele empfangen hat, die vom Schiff nicht mehr empfangbar waren. Der Austausch von AIS-Daten erfolgte im Projekt durch Weiterleitung der entsprechenden AIS NMEA 0183 Nachrichten.

Der Austausch von Radardaten bietet im Vergleich zum AIS-Datenaustausch noch weitere Vorteile. Zum einen ist natürlich auch die Reichweitenproblematik vorhanden. Radarziele, die von Land aus nicht mehr beobachtet werden können, lassen sich jedoch ggfs. durch schiffsseitige Radarsensoren verfolgen. Weiterhin weist die Nutzung von Radarsensoren die Problematik von Abschattungen auf. Wenn sich ein sehr großes Objekt wie bspw. ein großes Containerschiff im Sichtbereich eines Radarsensors befindet, kann es vorkommen, dass der Bereich hinter diesem Objekt von dem entsprechenden Radarsensor abgeschattet wird. Damit können in diesem Bereich keine Ziele verfolgt und damit auch keine Verkehrssituation erfasst werden. Die Nutzung von weiteren Radarsensoren an Bord von Schiffen oder an Landpositionen kann es in diesem Fall ermöglichen, in den Schattenbereich eines Radarsensors hineinzuschauen. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 6: Implementierung der Radarschattendarstellung im Signalis VTS.

Diese Abbildung zeigt die Implementierung der Radarschattendarstellung im Signalis VTS. Es ist zu erkennen, dass das Radar des VTS-Zentrums an Land das Schiff „Hidden“ im rot dargestellten Bereich nicht erkennen kann. Aufgrund der Nutzung des Radardatenaustauschs mit der Zhen Hua 10 ist das Radarziel der „Hidden“ dennoch im Verkehrslagebild sichtbar.

Neben dem Austausch von reinen Sensordaten wurde im Projekt insbesondere auch der Austausch von Routeninformationen umgesetzt. Es konnte im Rahmen des Projektes gezeigt werden, dass bspw. die Kollision der Fähre Finnsailor und des Frachters General Grot-Rowecki in der Kadetrinne im Jahr 2005 durch einen Routenautausch hätte verhindert werden können. In Abbildung 3 ist der Verlauf der geplanten Routen der vier beteiligten Schiffe im Verkehrstrennungsgebiet zu erkennen. Der Unfall kam insbesondere dadurch zustande, dass sowohl die Crew der Finnsailor als auch die der General Grot-Rowecki angenommen hatten, dass die Dana 1 und die Protector dem Verkehrstrennungsgebiet Richtung Nordosten folgen würden. Unter dieser Annahme drehte die General Grot-Rowecki kurz vor der östlichen Grenze des Verkehrstrennungsgebietes auf Backbord, überholte die Dana 1 und kollidierte mit der Finnsailor, die einem Kurs Richtung Osten folgte, da die Protector nicht wie erwartet nach Nordosten abdrehte. Mit einem Routenaustausch, wie er in COSINUS entwickelt wurde, wären allen beteiligten Crews die Intentionen der anderen Schiffe bekannt gewesen und es wäre ohne nautische Probleme möglich gewesen die Kollision zu vermeiden.

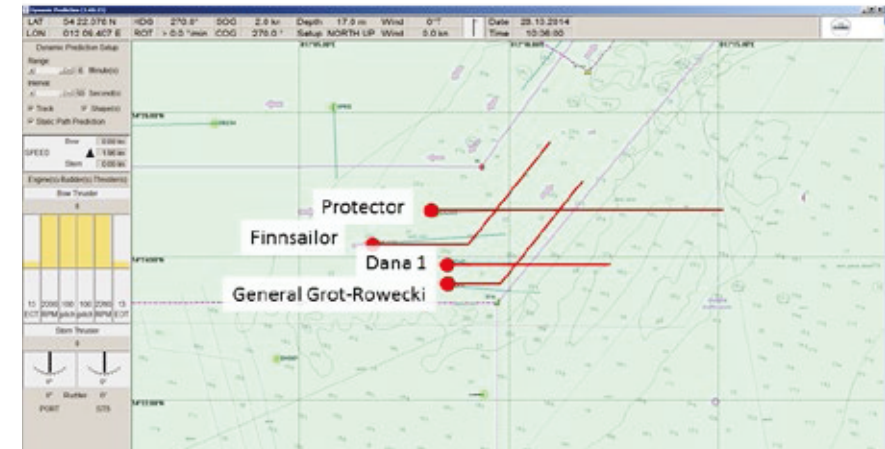


Abbildung 4: Kollision der Finnsailor und der General Grot-Rowecki im Jahr 2005

### Nutzerschnittstellen

Für die Entwicklung geeigneter Nutzerschnittstellen wurden im Rahmen des Projektes ethnografische Studien an Bord und in Verkehrsleitzentralen durchgeführt, um die Interaktion der Menschen mit den Systemen genau zu untersuchen und daraus Konzepte für neuartige Nutzerschnittstellen zu ableiten. Im Frühjahr 2014 wurde eine solche Studie bspw. auf der Brücke der Stena Scandinavica durchgeführt. Die hier gesammelten Daten wurden

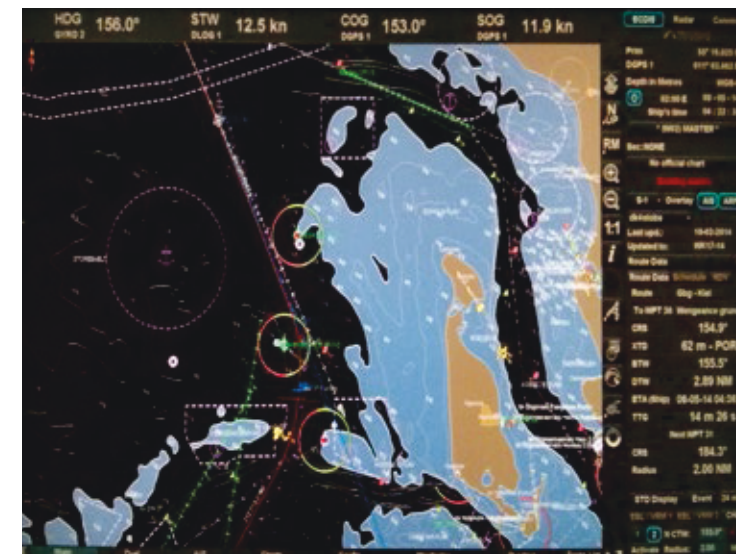


Abbildung 5: Durchfahrt unter der Storebelt-Brücke mit der Stena Scandinavica

beispielhaft für die Aufgabe der Kollisionsvermeidung während der Durchfahrt der Storebelt-Brücke betrachtet (s. Abbildung 5). Eine häufig wiederkehrende Aktion der Crew war die Anpassung der Länge der Speedvektoren über ein Drop-Down-Menü rechts von der ECDIS-Kartendarstellung. Ein alternatives Interaktionskonzept wurde entwickelt, das eine direkte Interaktion mit den Speedvektoren auf der Kartendarstellung erlauben soll.

Darüber hinaus wurden HMI-Prototypen zur Darstellung von Routeninformationen entwickelt. Insbesondere wurde die Verfügbarkeit von Routeninformationen genutzt, um eine verbesserte CPA-Berechnung mit entsprechender Darstellung vorzunehmen. In den nachfolgenden Abbildungen sind zwei unterschiedliche Ansätze zur Darstellung von CPA-Informationen dargestellt. Links zeigt eine Detaildarstellung inkl. numerischer Informationen, während in der rechten Darstellung Gefahren durch Einfärbung betroffener Routensegmente hervorgehoben werden.

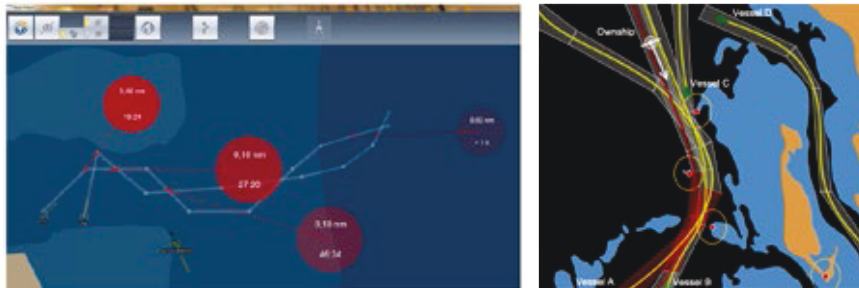


Abbildung 7 und 8: Alternative Darstellungen von routenbasierten CPA-Informationen

### Manöverplanung und Prädiktion

Auf der Schiffsseite wurde neben der Integration von Fremdsensorinformationen von Land und von anderen Schiffen ein Modul zur Manöverplanung und -Prädiktion entwickelt. Mit Hilfe dieses Werkzeuges ist es möglich, basierend auf vorher zu erfassenden Informationen über das dynamische Verhalten des Schiffes, eine grafische Planung von Manövern durchzuführen. Ähnlich zur Routenplanung in einem ECDIS können bei der Manöverplanung verschiedene Manöverpunkte definiert werden, an denen bestimmte Manöver für die Veränderung von Geschwindigkeiten oder Ruderlage oder aber der Wechsel des Antriebs geplant werden können. Basierend auf dieser Planung berechnet das Werkzeug mit Hilfe einer Fast Time Simulation die Bahn, die das Schiff unter Berücksichtigung der Manöverinformationen, der eigenen dynamischen Eigenschaften sowie externer Einflüsse wie Wind und Strömung nehmen würde. Die Auswirkungen einer Veränderung einzelner Parameter werden dem Nautiker in quasi Echtzeit angezeigt. Bei der Durchführung

der geplanten Manöver werden die aktuellen Sensorinformationen des Schiffes wie Position und Maschinendaten genutzt, um die Vorhersage der voraussichtlichen Bahn des Schiffes anzupassen. So wird es den Nautikern ermöglicht, effiziente Manöver bspw. in engen Fahrwassern oder im Hafen zu planen. Durch die Integration dieses Werkzeuges mit dem integrierten Lagebild von See und von Land können so gefährliche Verkehrssituationen besser vermieden werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Screenshot des entsprechenden Manöverplanungstools, auf dem die Planung eines Manövers zur Einfahrt in den Nord-Ostsee-Kanal bei Brunsbüttel zu erkennen ist.

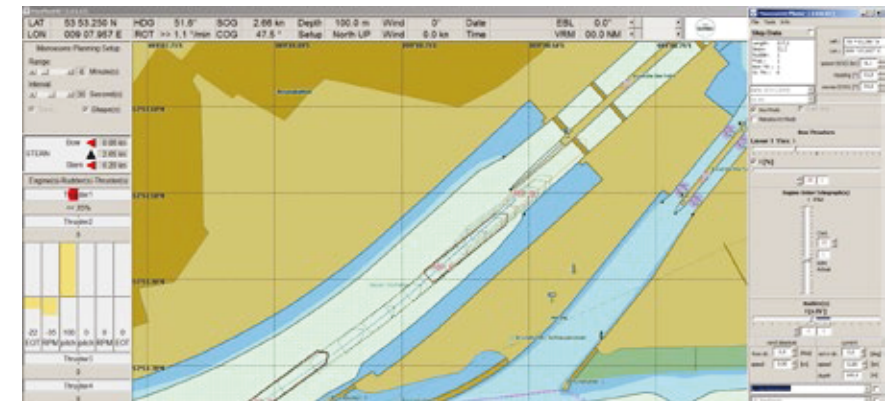


Abbildung 9: Werkzeug zur Manöverplanung

### Abschlussdemonstration

Am 16.9.2015 fand in Cuxhaven die Abschlussdemonstration des Projektes COSINUS statt. Im Rahmen dieser Demonstration wurde das Gesamtsystem mit dem Forschungsboot Otzum der Universität Oldenburg (s. Abbildung 10) und einem im Hafen installierten VTS-System vorgeführt.

Hier wurden insbesondere Szenarien zur Nutzung des Routenaustauschs für eine verbesserte Verkehrsführung und zur Vermeidung von Gefahren vorgestellt und auf der Elbe durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass durch den frühzeitigen Austausch von Routeninformationen ein Verkehrsmanagement möglich wird, dass insbesondere Kollisionsgefahren von vornherein vermieden. In Kombination mit der entwickelten Manöverplanung konnte dies genutzt werden, um eine effiziente und effektive Fahrt in engen Fahrwassern, in diesem Fall im Cuxhavener Amerikahafen, zu ermöglichen. Neben diesen Szenarien konnte insbesondere auch gezeigt werden, dass die Nutzung dezentral verfügbarer Radar- und AIS-Informationen ebenfalls zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit führt. Die folgende Abbildung 11 zeigt eine Karte des Amerikahafens.



Abbildung 10: Forschungsboot Otzum



Abbildung 11: Amerikahafen in Cuxhaven

Auf dieser Karte ist gut die Kaimauer zu erkennen, auf der sich auch das Steubenhöft befindet. Ein Schiff, das sich nun im Hafen befindet, hat in der Regel keine oder nur eine sehr eingeschränkte visuelle und Radar-Sicht auf

das Fahrwasser der Elbe. Durch die Nutzung von Radarinformationen des auf der Kaimauer installierten VTS-Radars kann das Radarlagebild an Bord von Schiffen also deutlich erweitert werden.

Auch der umgekehrte Fall konnte in Cuxhaven gezeigt werden. Immer dann, wenn sehr große Containerschiffe im Fahrwasser an dem VTS-Radar vorbeifahren, war die Radar-Sicht auf das Fahrwasser für das VTS stark eingeschränkt. Die Nutzung von Radarinformationen von Schiffen, die sich im Fahrwasser befinden wie bspw. das jeweils gerade vorbeifahrende Containerschiff, kann hier für eine kontinuierliche Radarüberwachung des gesamten Fahrwassers genutzt werden.

### Verwertung

Die Ergebnisse von COSINUS wurden in die e-Maritime Integrated Reference Platform (eMIR, [www.emaritime.de](http://www.emaritime.de)) integriert. Insbesondere besteht über das Mobile Brückensystem von eMIR und die stationären NaviBoxen in Cuxhaven und Brunsbüttel als Kommunikations- und Sensorplattform nun die nachhaltige Möglichkeit des Datenaustauschs zwischen Schiff und Land. Die Verwendung der Ergebnisse aus COSINUS ist damit für andere Projekte und die maritime Industrie offen.

Als erstes konkretes Beispiel für die nachgelagerte Nutzung der COSINUS-Ergebnisse wurde eine integrierte Demonstration von COSINUS und dem BMBF-geförderten Projekt EMSec im Rahmen der EMSec-Abschlusswoche vom 5.9. bis 9.9.2016 in Cuxhaven durchgeführt. In dieser Woche wurde die luft- und satellitengestützte Überwachung der Nordsee in verschiedenen Szenarien durch das EMSec-System demonstriert. Im Rahmen dieser Abschlussveranstaltung hat OFFIS das COSINUS-System als zusätzliche see-gestützte Überwachungskomponente in das EMSec-Lagezentrum integriert. Mit Hilfe des Forschungsbootes Zuse (s. Abbildung 12) konnte der Austausch von Radarinformationen genutzt werden, um ein entführtes Schiff, beim durch die Entführer das AIS-Signal ausgeschaltet wurde, weiterhin im Lagebild sichtbar zu machen. Informationen zu dieser Abschlusswoche können beim DLR abgerufen werden<sup>3</sup>.

Als weiteres Beispiel werden die Ergebnisse von COSINUS über die eMIR-Plattform derzeit dem Forschungsprojekt MTCAS bereitgestellt, in dem es um die Entwicklung eines automatischen Kollisionsvermeidungssystems für Schiffe ähnlich dem TCAS in der Luftfahrt geht. Im Rahmen dieses Projektes werden die Datenaustauschkomponenten für den Austausch von Informationen zur Berechnung von Ausweichrouten erweitert.

<sup>3</sup>) [http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151\\_read-19273/#/gallery/24278](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-19273/#/gallery/24278)



Abbildung 12: Das Forschungsboot Zuse mit COSINUS-Ausstattung zur seegestützten Lagebilderstellung

## Literatur

- [1] „Development of an e-navigation Strategy Implementation Plan“, International Maritime Organization, Sub-Committee on navigation communications and search and rescue, Report of the Correspondence Group on e-Navigation, März 2014.
- [2] „ITU-T X.200 (07/94) Data Networks and Open System Communication/ Open Systems Interconnection Model and Notation“, International Telecommunication Union, 1994.
- [3] H.-J. Appelrath, D. Geesen, M. Grawunder, T. Michelsen, und D. Nicklas, „Odysseus - A Highly Customizable Framework for Creating Efficient Event Stream Management Systems“, in Proceedings of the 6th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems ACM DEBS 2012, 2012.
- [4] S. Feuerstack und B. Wortelen, „Revealing Differences in Designers' and Users' Perspectives: A Tool-supported Process for Visual Attention Prediction for Designing HMIs for Maritime Monitoring Tasks“, in Proceedings of 15th IFIP TC.13 International Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT, Bamberg, 2015.

## **PASSAGES – Protection & Advanced Surveillance System for the Arctic : Green, Efficient, Secure**

Förderkennzeichen: 03SX355

Frank Michaelis, Airbus Defence and Space GmbH

Das Projekt wurde unter dem Namen INUIT (Innovatives Universelles Informations und Tracking System) akquiriert und als Fördervorhaben beauftragt. Da das Projekt mit Canadischen Partnern zusammen durchgeführt wurde (siehe Kapitel 1.2), stellte sich schon im KickOff in Halifax heraus, daß der Name INUIT problematisch war, da er gleichlautend mit den Canadischen Ureinwohnern, den Inuit, war.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des KickOffs der Name in PASSAGES geändert. PASSAGES steht für

Protection & Advanced Surveillance System for the Arctic: Green, Efficient, Secure

Hier in der Aufgabenstellung, dem Kapitel „1.1.2 Motivation des Projektes“ und im Kapitel „1.1.3 Ziel des Projektes“ steht noch INUIT, da diese Aufgabenstellung aus der Angebots- bzw. Vergabephase übernommen wurde. Später wird dann nur noch von PASSAGES die Rede sein.

### **Motivation des Projektes**

INUIT ist ein angewandtes Forschungsprojekt, dessen Ziel es ist, die Anforderungen an ein neuartiges Überwachungssystem für arktische und subarktische Küstenbereiche und Meeresstraßen, wie beispielsweise die kanadische Nordwestpassage, zu erarbeiten. Hintergrund des Projektes ist die Prognose, daß die Schiffspassage durch die polaren Gewässer im Norden Kanadas, die den Atlantischen mit dem Pazifischen Ozean verbinden (Nordwestpassage), aufgrund der Erderwärmung mittelfristig während der Sommermonate soweit eisfrei sein wird, dass kommerzieller Schiffsverkehr in diesem Gebiet möglich sein wird.

Die Routen über die polaren Breiten sind nicht nur für den kanadischen, US amerikanischen und chinesischen Handel sehr attraktiv, sondern auch für exportorientierte Nationen im nördlichen Bereich Europas. Die Entfernung zwischen Europa und den Märkten in Ostasien z.B., würde um ca. 4000 km verkürzt gegenüber der traditionellen Seehandelsroute durch den Panama-



- thematischen Kartendaten
- Vorhersagemodellen der Eisbewegung, -bedeckung und -beschaffenheit
- bekannten Plänen für Schiffsbewegungen
- Modellen, die die zu überwachenden Schiffe erfassen und eine Klassifizierung und eine Vorhersage ihrer Bewegungen erlauben.

Aus der mittelfristigen Umsetzung des Konzeptes in ein technisches Überwachungssystem soll letztlich die Notwendigkeit von Such- und Rettungsaktionen abgeleitet aber auch illegales oder zumindest verdächtiges „anormales“ Verhalten erkannt werden.

Die Anforderungen sowie die benötigten technischen Konzepte werden sich deutlich von den heute für die kommerzielle Schiffsüberwachung und Führung üblichen Ansätzen unterscheiden. Daher sind die Ergebnisse des hier vorgestellten Forschungsprojektes eine notwendige Voraussetzung für ein intelligentes und effizientes Einsatzkonzept mit modernen technischen Überwachungskomponenten. Ohne eine derartige solide Grundlagenarbeit wird sich kein Investor finden, der die Entwicklung eines solchen Überwachungssystems einleitet, zumal der absehbare Realisierungszeitraum weit in der Zukunft liegt und das Risiko des erfolgreichen Produkteinsatzes derzeit als hoch eingeschätzt werden muß.

### Die Nordwestpassage (NWP)

Der Begriff „Nordwestpassage“ ist ein Sammelbegriff für alle im Norden Kanadas existierenden Wasserstraßen, die die Baffin Bay im Osten mit der Beaufort See im Westen verbinden. Die folgende Abbildung zeigt 3 verschiedene dieser Wasserwege (rot), die den Nordatlantik mit dem Nordpazifik auf einer Länge von ca. 5000 km miteinander verbinden. Aus topographischer Sicht besteht die NWP aus einer Aneinanderreihung von verschiedenen tiefen Wasserrinnen, die während der Wintermonate verschieden stark und lange zugefroren sind.

Die nördlichsten Abschnitte der NWP liegen ca. 800km nördlich des Polarkreises. Sie durchquert die kanadischen Provinzen „Nunavut“ im Nordosten und „Northwest Territories“ im Nordwesten, die extrem dünn besiedelt sind (s. Abbildung 3-2). In Nunavut, beispielsweise, liegt die Bevölkerungsdichte bei 0,01 Einwohner / km<sup>2</sup> bei einer Gesamtfläche von über 2 Millionen km<sup>2</sup>. Es gibt ca. 25 Kommunen, bei denen es sich größtenteils um Siedlungen der

Inuit, sowie um einige wenige Forschungsstationen oder Marinestützpunkte der kanadischen Regierung handelt. Die Provinzhauptstadt ist Iqaluit auf Baffin Island mit einer Einwohnerzahl von 31906 (Stand Juli 2011). Derzeit sind die Kommunen nicht durch Strassen mit einander verbunden (Ref. (3)). Das Gebiet nördlich des Polarkreises wird auch als kanadische Arktis bezeichnet.

Die geologische Beschaffenheit der kanadischen Arktis reicht von den „Innuitian Mountains“, die sich ca. 1000 km entlang der atlantischen Küste von Ellesmere Island bis Baffin Island erstrecken und im Norden von Ellesmere Island über 2600 m hoch sind, bis zum arktischen Tiefland im mittleren und westlichen Teil. Unterbrochen wird das Tiefland an einigen Stellen durch hügeliges Sedimentgestein, das z.B. westlich von Victoria Island die ca. 700 m hohen Slater Berge bildet.



Quelle: <http://geology.com/articles/northwest-passage/northwest-passage-map-lq.gif>

Abbildung 2: Grafik der Nordwestpassage

Bis zum Jahr 2008 galt die NWP als unpassierbar für die Handelsschifffahrt. Dies hat sich im September 2008 geändert, als das erste Handelsschiff der kanadischen Reederei Desgagnés Transport die Nordwestpassage von Montreal kommend in westlicher Richtung durchquert hat. Seitdem hat die NWP an Attraktivität stark zugenommen, weil einerseits das Abschmelzen des polaren Packeises schnell voranschreitet und andererseits die Route durch die kanadische Arktis gegenüber herkömmlichen Routen Zeit und Kosten spart.



Den Rückgang des Eises in der kanadischen Ostarktis zeigt das Diagramm des Kanadischen Eis-Services, CIS, (CIS ist eine Division des nationalen meteorologischen Dienstes) in Abbildung 3-4. Dargestellt ist die Eisbedeckung in % von 1982 bis 2012, die einen eindeutig fallenden Trend aufweist. Basierend auf diesen Diagrammen wird prognostiziert, dass die NWP noch vor 2040 während der Sommermonate eisfrei sein wird

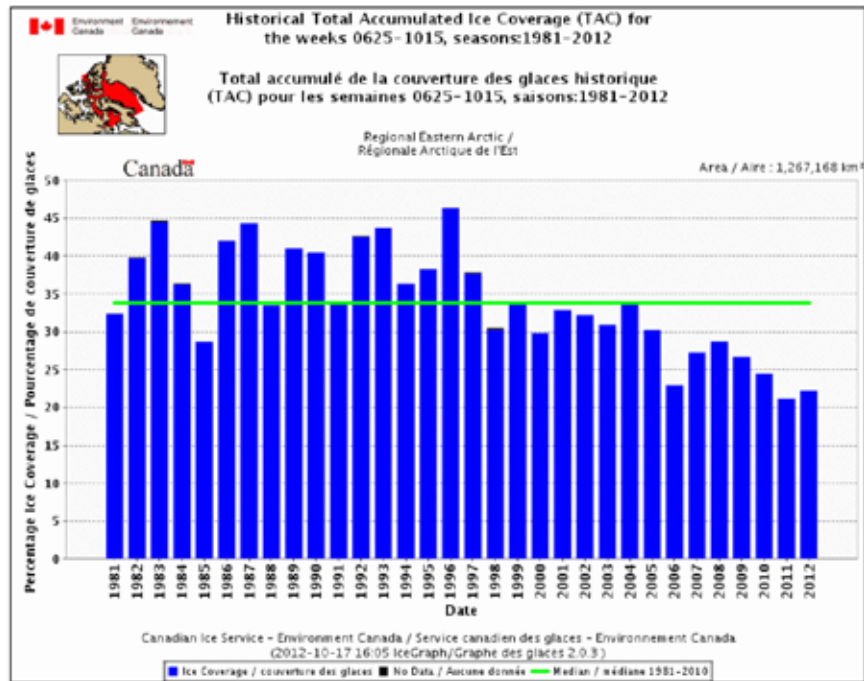


Abbildung 3: Eisbedeckung in der östlichen Arktik

Der Rückgang des Eises macht auch Teile des kanadischen Kontinentalschelfs zugänglich, die vorher ganzjährig vom Eis bedeckt waren. Als Folge hiervon werden auch die Bodenschätze der Arktis zugänglicher. Die Reichhaltigkeit dieser natürlichen Ressourcen scheint immens zu sein und hat einen Wettlauf um Gebietsansprüche in der gesamten Arktis entfacht. Zu den Vorkommen im Bereich der kanadischen Arktis zählen zum Beispiel:

- Eisenerzvorkommen auf Baffin Island
- Nickel, Kupfer und Platin an der Grenze zwischen Nunavut und den Northwest Territories
- Ölvorkommen in der Beaufort See an der Grenze zur USA, die vermutlich weit in das kanadische Hoheitsgebiet hinein reichen
- weitere Basismetallvorkommen in Nunavut.

Erwähnenswert ist auch die Tatsache, daß der Eisrückgang die kommerzielle Fischerei in der kanadischen Arktis möglich macht. Über die Fischbestände liegt noch kein gesichertes Wissen vor, es wird aber vermutet, dass es im arktischen Meer große Bestände von Dorsch, Heilbutt, Schrimps und Krill gibt. Zur Zeit gibt es noch keine Regulierung des potentiellen industriellen Fischfangs. Vielmehr soll die kommerzielle Fischerei im Eismeer vorerst ausgesetzt und die Arktisstaaten dazu bewogen werden, eine internationale Vereinbarung über den Schutz der bisher unregulierten Gewässer des nördlichen Eismeeers zu entwickeln. Kanada entwirft derzeit seine Fischereipolitik für den Teil der Beaufort See, der innerhalb der 200-Seemeilen Wirtschaftszone liegt.

Zum heutigen Zeitpunkt ist die Nordwestpassage höchstens während der Sommermonate (Juli-September) nicht zugefroren. Aber auch während dieser vermeintlich „eisfreien“ Zeit kann es noch viel Treibeis geben, das in Form von Schollen verschiedener Größe und Dicke und auch in Form kleinerer Eisberge in der Passage treibt. Darunter ist sowohl einjähriges als auch – in immer geringerem Ausmaß – mehrjähriges Eis.

Aufgrund dieser Tatsache ist die Schifffahrt in der Nordwestpassage und durch sie hindurch immer noch gefährlich. Selbst im Sommer kann die Begleitung eines Eisbrechers notwendig sein, was bis zu 40000 € pro Tag kosten kann. Für die kommerzielle Schifffahrt ist daher momentan das Risiko einer Passage noch unverhältnismäßig groß. Einige Reedereien (z.B. Hapag Lloyd) bildet aktuell noch keine Kapitäne für die Fahrt durch die NWP aus, da die Nutzung noch zu unsicher ist.

Die Route durch die Nordwestpassage ist aber nicht nur für amerikanische und kanadische Reedereien interessant, sondern auch für die europäischen, da die EU Mitgliedstaaten über die größte Handelsflotte der Welt verfügen. Aus diesem Grund hat die EU im November 2008 eine „Arktisstrategie“ zu einer EU-einheitlichen Meerespolitik in der Arktis beschlossen, die zum Ziel hat, die Voraussetzungen für einen Aufbau der Handelsflotte in arktischen Gewässern zu verbessern. Im Hinblick auf die deutlich verkürzten Seewege von Europa nach Asien hat die Nordwestpassage daher eine zunehmend attraktive Bedeutung für Europa und damit auch für Deutschland. Der Seeweg durch den Nordwestatlantik hat außerdem gegenüber der Nordostpassage, die nördlich der russischen Küste verläuft, den Vorteil, dass er ausschließlich durch Hoheitsgewässer verbündeter Nato Staaten führt.

Jetzt im Sommer 2016 ist zum ersten Mal ein Kreuzfahrtschiff von der amerikanischen Westküste nach New York durch die NWP unterwegs, allerdings in Begleitung eines kommerziellen Eisbrechers für den Notfall.

Der überwiegende Teil des heutigen Schiffsverkehrs ist zielgerichtet, d.h. führt zu einem bestimmten Ort in der Nordwestpassage und wieder zurück, dazu zählen z.B.

- die Versorgung der arktischen Siedlungen per Schiff/Boot
- der Kreuzfahrttourismus zu bestimmten Anlaufzielen
- der Abtransport von Rohstoffen
- Rettungsaktionen verunglückter Schiffe.

### Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde als sogenanntes Verbundprojekt durchgeführt, bei dem die Airbus die Rolle des Koordinators inne hatte. Hier die Projektstruktur mit den beteiligten Partnern und Unteraufnehmern.

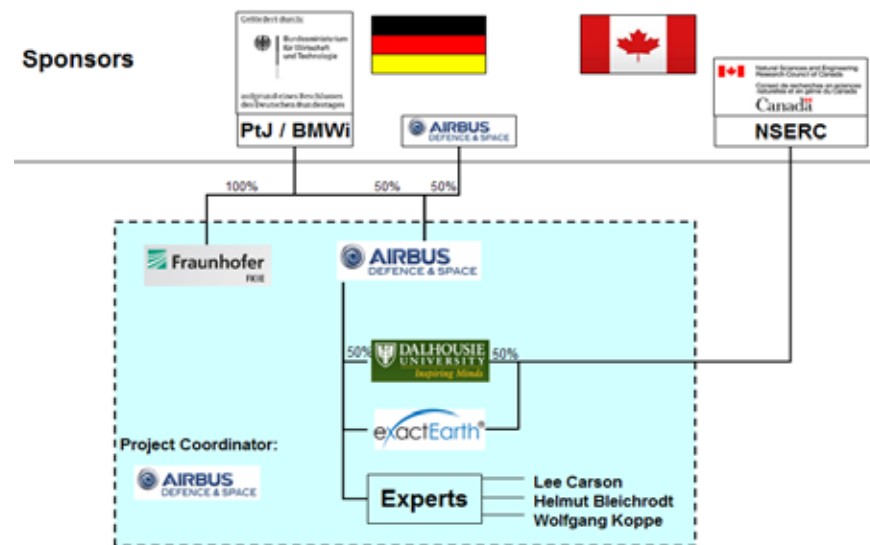


Abbildung 4: Projektstruktur

Das Projekt wurde durch die kanadische Behörde NSERC (Natural Science and Engineering Research Council of Canada) für die Dalhousie University of Halifax co-finanziert. Die Hauptfinanzierung lag beim BMWi und der Airbus.

Die Airbus hatte die Dalhousie University of Halifax als 50% Unteraufnehmer, neben der NSERC Co-Finanzierung. Weitere Unteraufnehmer der Airbus waren die Firma exactEarth als Lieferant von AIS Daten, sowie verschiedene Experten, die in einzelnen Teilarbeitspaketen beauftragt wurden.

Das Fraunhofer FKIE Institut war Teil des Verbundprojektes und wurde durch die Airbus mit koordiniert. Die finanzielle Beauftragung erfolgte jedoch durch das BMWi direkt.

Dieses Projekt unterschied sich doch in einigen Punkten sehr von anderen Fördervorhaben. Es war extrem notwendig sich mit den kanadischen Stakeholdern auseinander zu setzen um die speziellen Anforderungen um die NWP zu erfahren. Dazu war es notwendig diverse Reisen nach Canada zu unternehmen. Diese Stakeholder-Befragungen wurden in der Regel auf Arktikkonferenzen durchgeführt, da dort immer diverse Stakeholder zur Verfügung standen. Weiterhin wurde dazu ein kanadischer Arktisexperte als Unteraufnehmer und Berater mit in das Projekt eingebunden.

### Team

Die Projektpartner haben langjährige praktische Erfahrungen in

- der aktiven und passiven Sensortechnik
- der Vernetzung von heterogenen Sensorinformationen zu einem komplementären Lagebild mit hoher Qualität, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit
- der Interpretation des Sensor Lagebildes
- der Erkennung von Anomalien und der Risikoanalyse
- der Konzeption und Entwicklung von komplexen verteilten Überwachungssystemen.

Diese Kompetenzen sind in das Projekt eingeflossen, um ein neues Systemkonzept zu entwickeln, das als Basis für die operationelle und kommerzielle Nutzung zukünftiger Überwachungssysteme von Seefahrtswegen durch arktische und subarktische Gebiete dienen kann. Obwohl der Fokus in dieser Forschungsarbeit auf der NWP liegt, soll die Systemarchitektur skalierbar und anpaßbar sein an Gegebenheiten anderer maritimer Gebiete wie z.B. der norwegischen Arktis oder der russischen Nordostpassage.

## Projektgruppe Airbus Defence and Space

Die Gruppe setzt sich aus Mitgliedern der Entwicklung im Bereich Data Fusion und Surveillance sowie aus dem Programmbereich „Naval Systems“ zusammen. Der Standort aller Abteilungen ist Ulm.

Die Entwicklungsabteilungen sind Software- und Systemabteilungen, die ausgewiesene Kompetenzen auf den folgenden Gebieten haben:

### Algorithmen:

- zur Fusion umfangreicher heterogener Daten von sehr verschiedenen Sensoren (Land-, Wasser- und Luft-gestützt)
- zur Zielverfolgung vieler Einzelobjekte und Gruppen von Objekten in teilweise stark verrauschtem Hintergrund (z.B. Objekte auf bewegter See)
- zur Identifikation und Klassifikation von Objekten

### Lagebilderstellung:

- für militärische und zivile Anwendungen
- Rollen-basierte(r) Nutzung/ Zugang
- Bedrohungsanalyse und automatisierte Warnung

### Überwachungssysteme:

- Integration von tausenden von Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem
- großflächige, vernetzte Systemarchitekturen
- Anbindung an Führungs- und Kontrollsysteme
- Verifikation und Validierung von Systemen
- Betreuung von operierenden Systemen und Training der Anwender

Ihre Fähigkeiten auf diesen Gebieten haben sie in mehreren großen Projekten bewiesen, z.B. :

- MST Finland: landesweites vernetztes Überwachungs- und Trackingsystem
- Airborne Early Warning & Control
- US Coast Guard Deepwater Program
- Grenzschutz in Saudi Arabien

Der Programmbereich „Naval Systems“ beschäftigt sich mit Marine Projekten für den nationalen Deutschen Kunden und für internationale Kunden und hat hier langjährige Erfahrungen und Verbindungen.

## Projektgruppe FKIE

Die Mitglieder der Gruppe gehören der Abteilung „Sensor und Informationsfusion“ an. Der Standort der Gruppe ist Wachtberg bei Bonn.

Das FKIE besitzt Expertise im Bereich der Sensordatenfusion und in spezieller Sensorik, die sowohl durch theoretische Forschungsarbeit als auch durch Beteiligung an Projekten und Auswertung von Realdaten charakterisiert ist. Der wesentliche Informationsgewinn wird bei den meisten dieser Projekte erst durch Fusion der verschiedenen Sensoren mit ihrer sehr unterschiedlichen Charakteristik erzielt (weitreichende Sensorik, klassifizierende Sensorik, optische/ elektromagnetische/ akustische Sensorik). FKIE ist in der internationalen Multi-Static Tracking Working Group (MSTWG) seit Jahren aktiv tätig. In dieser Gruppe befassen sich die führenden Experten mit allen kritischen Problemen bei der Fusion von multistatischen Radar- und Sonar-Systemen. FKIE ist somit international an der vordersten Front der Forschung eingebunden.

Die Abteilung „Sensor Data & Information Fusion“ ist zudem international bekannt für ihre grundlegenden Arbeiten zur Entwicklung von neuen Algorithmen, die sowohl die Nutzung neuer Datenquellen als auch den Einsatz neuer Schätzmethoden zur Zielverfolgung behandeln. Zu den Kernkompetenzen der Abteilung zählen die folgenden Themen:

### **Ortung & Navigation:**

- fortschrittliche Arraysignalverarbeitung
- UAV basierte Emitterverfolgung
- robuste Navigationssysteme

### **Weiträumige Überwachung:**

- Luftgestützte Bodenüberwachung
- maritime Überwachung
- multistatische Zielverfolgung

### **Bedrohungserkennung:**

- zivile Sicherheit & Gefahrstoffdetektion
- Datenbankgestützte Informationsfilterung
- Kontextbasierte Informationsauswertung

### **Projektgruppe Dalhousie**

Die Gruppe besteht aus Mitgliedern der Forschungsgruppe für Marine Forschung (Marine Research Group). Die Gruppe gehört der Fakultät „Industrial Engineering“ an und hat zahlreiche Kooperationen mit kanadischen Partnern, darunter: der Such- und Rettungsdienst der CCG, das kanadische Verkehrsministerium: Transport Canada, DRDC Ottawa und das kanadische Verteidigungsministerium DND.

Eins der Hauptforschungsgebiete der Gruppe liegt auf dem Gebiet der Konzeption und Entwicklung quantitativer Methoden zur Entscheidungsunterstützung (Operations Research). Die Ergebnisse sind in nationale Projekte eingeflossen, wie z.B. Risikoanalysen zur maritimen Sicherheit im Hinblick auf die nationale Verteidigung, das Risiko von Unfällen und von Umweltverschmutzungen in Zusammenarbeit mit der CCG. Die Gruppe hat zudem Erfahrungen mit Projekten im Nordostatlantik, wie z.B. Forschungen zur Unfallstatistik im Fischfang und in der Handelsschifffahrt vor den Küsten Neuschottlands, Neufundlands und Labradors.

## BinGas – Entwicklung von Technologien zum LNG-Transport mit Binnenschiffen

Förderkennzeichen: 03SX354

M. Sc. Friederike Dahlke (UDE – Universität Duisburg Essen)  
Prof. Dr.-Ing. Ould el Moctar (UDE – Universität Duisburg Essen)  
Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff (DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme)  
Dr.-Ing. Manuel Boog (MTU – MTU Friedrichshafen GmbH)  
Dipl.-Ing. Benjamin Scholz (DNV GL)

Assoziierte Partner:

TGE Marine Gas Engineering  
EnBW Regional AG  
Reederei Jaegers  
Zentralkommission für die Rheinschifffahrt  
August Strom GmbH & Co. KG

### Kurzbeschreibung

Erdgas zeichnet sich gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen durch geringere Emissionen von CO<sub>2</sub> und Schadstoffen wie Feinstaub, Schwefel- und Stickoxiden aus. Bei der angestrebten Emissionsreduktion zur Einhaltung der Klimaschutzziele liegen daher große Hoffnungen in dem verstärkten Einsatz von Erdgas. Der Nutzung von Erdgas als Kraftstoff in mobilen Anwendungen steht die Frage nach dem benötigten Tankvolumen entgegen. Ein wirtschaftlicher Transport ist dann möglich, wenn das Erdgas tiefkalt und flüssig (Liquefied Natural Gas - LNG) oder hochverdichtet (Compressed Natural Gas - CNG) vorliegt.

LNG hat bei der Übergabe vom Terminal auf das Schiff eine Temperatur von etwa -162°C und ist drucklos. Eine aktive Kühlung der Tanks während der Fahrt ist in der Regel nicht vorgesehen; durch eine entsprechende Isolierung wird der Wärmeeintrag so gering wie möglich gehalten. Während der Reise beginnt das LNG zu verdampfen. Dieses sogenannte Boil-Off-Gas muss dann entweder mittels entsprechender Anlagen rückverflüssigt werden oder an Bord, zum Beispiel als Kraftstoff für die Hauptmaschine, verbraucht werden. Einige Tanksysteme lassen einen gewissen Überdruck (meist 4 bis 6 bar) zu.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von Binnenschiffstypen, die LNG transportieren und gleichzeitig Teile ihrer Ladung als Treibstoff nutzen. Folgende Schiffstypen wurden entwickelt:

- Ein 135 m Übergroßes Motorschiff (ÜGMS) für die Fahrt auf dem Rhein
- Ein 105 m Großmotorgüterschiff (GMS) für die Fahrt auf dem Rhein und dem Neckar
- Ein Koppelverband bestehend aus einem 105 m GMS und einem 86 m Leichter für die Fahrt auf dem Rhein

### Vorgehensweise

Das Vorhaben gliederte sich in die Bereiche Schiffstechnik, Schiffbau, Hydrodynamik, Logistik, Antrieb und Sicherheit sowie die Erstellung von Empfehlungen und Richtlinien für den Bau und Betrieb der neuen Schiffstypen. Dabei teilten sich die Antragsteller die Gesamtaufgabe gemäß folgender Schwerpunktsetzung:

- Entwicklung von LNG-Tank- und Nutzungstechnologien für Binnentankschiffe
- Logistische und hydrodynamische Untersuchungen für den LNG-Transport mit Binnenschiffen
- Entwicklung eines Simulationsprogramms für die Antriebsanlage von LNG-Binnentankschiffen
- Entwicklung von Sicherheitskonzepten für den LNG-Transport mit Binnenschiffen
- Entwicklung von Fertigungsverfahren zum Bau und Umrüsten von LNG-Binnentankschiffen

Im Vorhabensverbund ergaben sich durch die Aufgabenteilung diverse Schnittstellen, insbesondere zwischen der Antriebsanlage, der Schiffstechnik, der Hydrodynamik und der Sicherheit.

### LNG-Tank- und Nutzungstechnologien für Binnentankschiffe

Für den Transport des LNG musste zunächst ein geeignetes Tanksystem ausgewählt und dann optimiert werden. Auf Basis der verschiedenen Entscheidungskriterien wie Laderaumnutzung, Gewicht und Isolierungsmöglichkeiten wurde für die Schiffsentwürfe ein Drucktanksystem ausgewählt. Aus Festigkeitsgründen wurde eine zylindrische Form bevorzugt; für die neuen Entwürfe wurde daher die sogenannte Bilobe-Bauweise (siehe Abbildung 1), zwei verschnittene Zylinderkörper mit durchströmten Mittellängsschotts, verwendet.

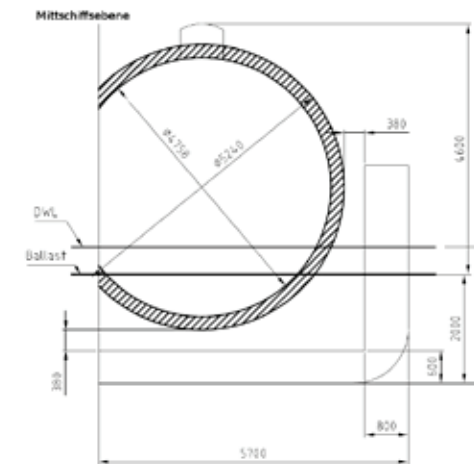


Abbildung 1: Bilobe-Tank im Querschnitt

Um ein Optimum aus maximalem Volumen und minimalem Wärmeeintrag zu finden, wurde ein Programm entwickelt, welches zusätzlich die Tankparameter (Druck, Temperatur, Füllgrad) zu jedem Zeitpunkt der Reise abbilden kann. Ein weiteres Kriterium für die Auslegung des Tanksystems waren die existierenden Vorschriften und Richtlinien der Klassifikationsgesellschaften und der Gesetzgeber. Für LNG-Tanks an Bord von Binnenschiffen gibt es vorgeschriebene Haltezeiten, die von der Reisedauer des Schiffes abhängig sind [1]. Um diese einhalten zu können, mussten Rückverflüssigungsanlagen in der Tankinfrastruktur vorgesehen werden, da das Boil-Off-Gas-Aufkommen den Bedarf der Hauptmaschine regelmäßig übersteigt.

Die Hauptmaschine verlangt einen bestimmten Gaszustand, der ebenfalls in der Tankinfrastruktur hergestellt wird: das Boil-Off-Gas muss daher erwärmt und verdichtet werden. In bestimmten Fällen, etwa zu Beginn der Reise, steht nicht genügend Boil-Off-Gas zur Verfügung, sodass LNG aus dem Ladungstank entnommen und verdampft werden muss. Auch hier wurden

verschiedene Systeme entwickelt, woraufhin nach verschiedenen Kriterien wie Platzbedarf, Fehleranfälligkeit und Verfügbarkeit der Komponenten die beste Variante ausgewählt wurde.

Neben der Hauptmaschine können auch andere Anlagen im Schiffshilfsbetrieb Teile des Boil-Off-Gases verbrauchen. Aus praktischen Gründen wurde entschieden, diese Verbraucher, wie zum Beispiel Pumpen, die Rückverflüssigungsanlagen etc. elektrisch zu betreiben und den Strom durch ein Generatorset mit Gasaggregat zu erzeugen.

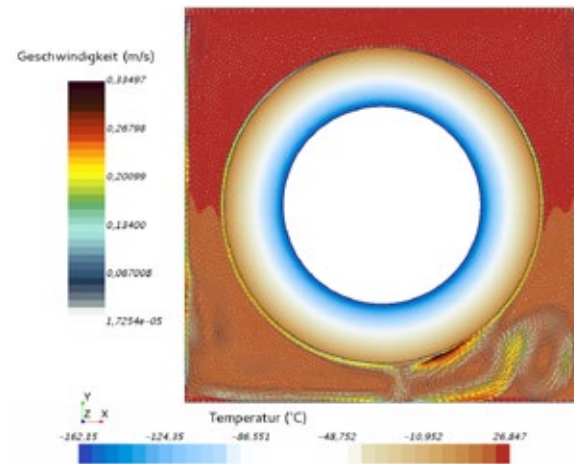


Abbildung 2: CFD-berechnetes Geschwindigkeitsfeld und Temperaturverteilung im Laderaum

Für die Auslegung der Systeme wurden neben vereinfachten thermodynamischen Berechnungen auch aufwändige CFD Simulationen (siehe Abbildung 2) und FEM Berechnungen (siehe Abbildung 3) zum Beispiel für die Wärmeverteilung im Laderaum oder die Festigkeitsanalyse des Tanks durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse der Analysen sowie aller weiteren Ergebnisse des Teilvorhabens findet sich im Abschlussbericht der Universität Duisburg-Essen [2].

### Logistische und hydrodynamische Untersuchungen

Als relevante Transportszenarien wurden die Strecken von Rotterdam nach Stuttgart und nach Basel identifiziert. In Stuttgart könnte der dortige LNG-Pufferspeicher beliefert werden und in Basel die ansässige chemische Industrie. In der Zukunft würde auch die Verbreitung von Erdgastankstellen im Straßenverkehr für ein erhöhtes Transportaufkommen von LNG sorgen.

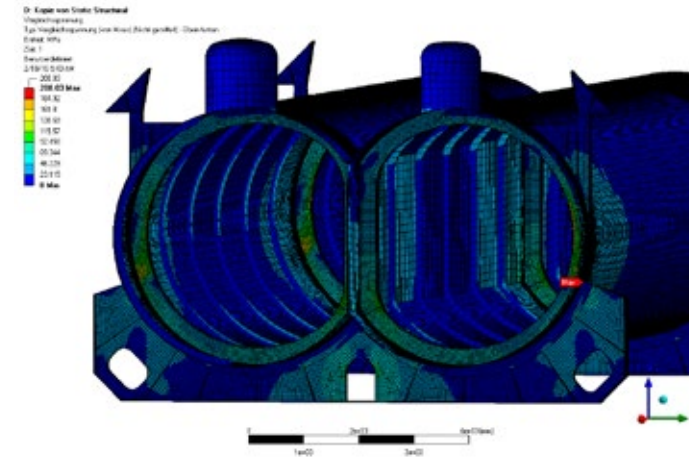


Abbildung 3: Strukturanalyse des Bilobe-Tanks mit FE-Methoden

Für beide Strecken wurden entsprechende Lastprofile unter Berücksichtigung der hydraulischen Daten der Wasserstraßen Rhein und Neckar ermittelt. Nach Stuttgart würde ein 105 m GMS fahren, welches auf dem Rhein als Koppelverband noch einen Leichter mitnehmen kann. Nach Basel soll ein 135 m ÜGMS fahren.



Abbildung 4: Die Koppelstelle im Modellmaßstab 1:16 im Schlepptank des DST

Die geringe Dichte des Transportgutes LNG erlaubt eine hydrodynamische Optimierung der Rumpfform über den üblichen Spielraum hinaus. So konnte ein besserer Propellerzustrom durch Optimierung des Hinterschiffs realisiert werden. Insbesondere die Koppelstelle zwischen dem GMS und dem Leichter konnte dahingehend optimiert werden, dass der Leistungsbedarf des Koppelverbandes um rund 25% gesenkt werden konnte (siehe Abbildung 4). Die Schiffsentwürfe wurden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht.

Für die detaillierte Quantifizierung des Leistungsbedarfs im Betrieb unter wechselnden hydrologischen Randbedingungen wurde eine bereits vorhandene komplexe Simulationsumgebung des Projektpartners DST erweitert (vergleiche hierzu den Abschlussbericht des DST [3]). In dieser wurde eine hydrodynamische Modellierung des Schiffes mit zeitlich und räumlich aufgelösten Umgebungsbedingungen und verschiedenen Fahrprofilen eingesetzt. Dieser Ansatz erlaubt die Identifikation von kritischen Situationen, in denen beispielsweise der Treibstoffbedarf hoch oder gering ist.

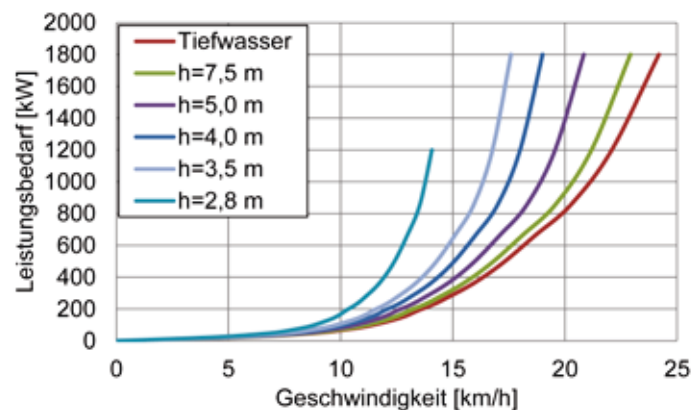


Abbildung 5: Exemplarische Kurvenschar aus der Modellierung für das 135 m Schiff bei 2 m Tiefgang.

### Simulation der Antriebsanlage

Der klassische Hauptantrieb eines Binnenschiffs besteht aus einem Dieselmotor mit Getriebe, einer Welle zur Kraftübertragung sowie einem Festpropeller mit Düse und Ruderanlage. Zum Manövrieren kommt als weiterer Antrieb das Bugstrahlruder hinzu, das in seinem Aufbau dem Hauptantrieb sehr ähnlich ist. Außerdem gibt es an Bord von Binnenschiffen meist mehrere Generatorsysteme zur Bereitstellung des Bordstromes oder zum Antrieb von Pumpen und ähnlichem. Im Rahmen dieses Projektes wurde nun für die jeweilige Transportaufgabe ein optimales Antriebskonzept (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 10), welches über den klassischen Binnenschiffsantrieb hinausgeht, erstellt und analysiert.

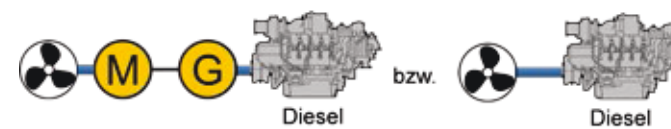
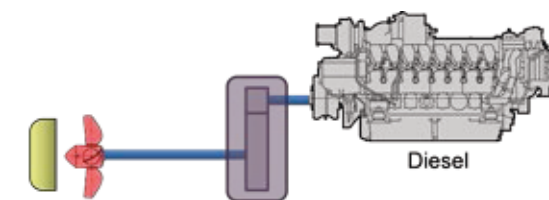


Abbildung 6: K1, Dieselmotor als Hauptantrieb; Diesel, bzw. Diesel-elektrisches Bugstrahlruder

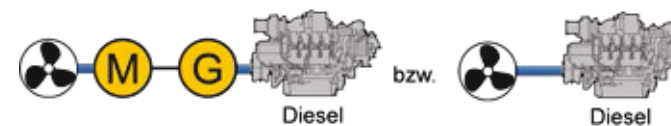
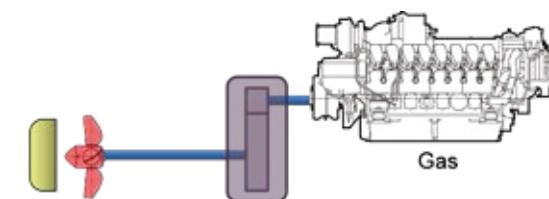


Abbildung 7: K2, Gasmotor als Hauptantrieb; Diesel, bzw. Diesel-elektrisches Bugstrahlruder

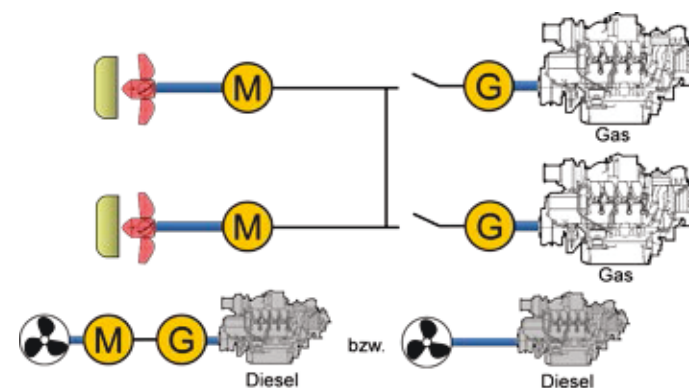


Abbildung 8: K15, Gas-elektrischer Hauptantrieb; Diesel, bzw. Dieselelektrisches Bugstrahlruder



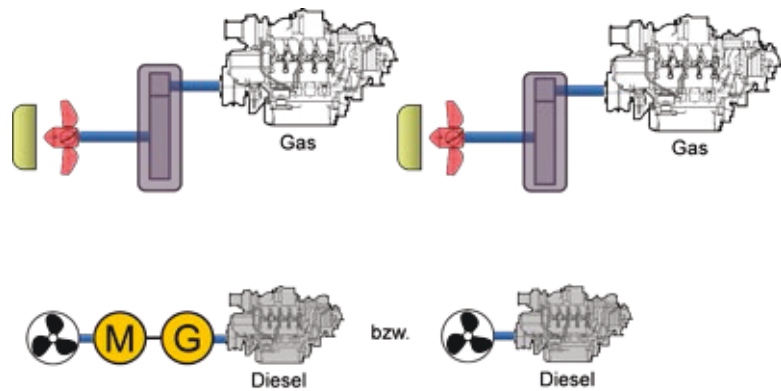


Abbildung 9: K13, Zweischauber mit Gasmotor; Diesel, bzw. Diesel-elektrisches Bugstrahlruder

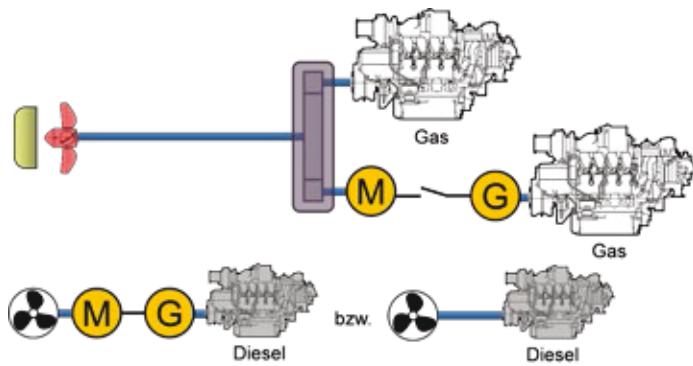


Abbildung 10: K5, Gasmotor als Hauptantrieb mit Power-Take-In Gasmotor; Diesel, bzw. Diesel-elektrisches Bugstrahlruder

Für die Simulation von beliebigen Antriebskonzepten von LNG-Binnentankschiffsentwürfen wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt. Ziel war die Optimierung des jeweiligen Konzepts hinsichtlich des Wirkungsgrads und  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes. In der konzeptionellen Entwurfsphase wurde zunächst eine Vielzahl verschiedener Antriebslösungen generiert und nach verschiedenen Kriterien qualitativ bewertet. Für fünf ausgewählte Konzepte wurde dann ein detailliertes Simulationsmodell erstellt. Die Konzepte umfassten neben Konzepten mit einem Gasmotor als Hauptmaschine auch Gas-elektrische Konzepte. Zum Vergleich wurde ein reines Diesel-Antriebskonzept erstellt.

Die Simulationen erforderten die Entwicklung eines umfangreichen modularen Baukastens mit allen systemrelevanten Komponenten wie Getriebe, E-Motoren, Generatoren, Verbrennungsmotoren und weiteren Nebenaggregaten. Um das Verhalten des Gesamtsystems bei einer Fahrt tatsächlich berechnen zu können, werden neben den Modellen für die eigentlichen Komponenten des

Antriebs auch Modelle für das Schiff, den Fahrer und die Strecke benötigt. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein empirisches Schiffsmodell erstellt, dessen Basis die am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) durchgeführten hydrodynamischen Messungen bilden. Vereinfacht ließ sich das Schiffsmodell auf folgenden Zusammenhang reduzieren. Das Schiffsmodell erhält als Eingangsgröße die Drehzahl des Propellers und liefert auf Basis der gemessenen Propulsionskurven die dazugehörige Geschwindigkeit des Schiffs sowie das sich ergebende Propellermoment. Das Fahrermodell wählt unter Berücksichtigung der Wassertiefe diejenige Geschwindigkeit, die den besten Kompromiss zwischen kurzer Reisedauer und geringem Energieverbrauch darstellt. Für eine Fahrt von Rotterdam nach Stuttgart ergeben sich dann beispielsweise die in Abbildung 11 gezeigten Geschwindigkeits- und Lastprofile. Auf Basis dieses umfangreichen Modells wurden Optimierungen für verschiedene Antriebssystemtopologien durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Simulationsumgebung sowie weitere Ergebnisse finden sich im Abschlussbericht des Projektpartners MTU Friedrichshafen [4].

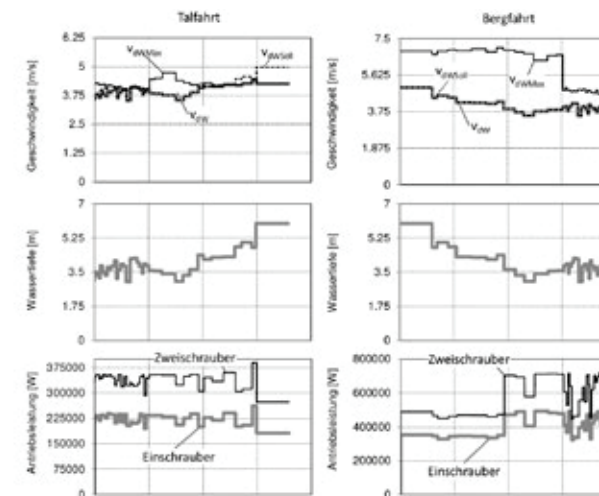


Abbildung 11: Zeitabhängige Geschwindigkeits- und Lastprofile für die Tal- und Bergfahrt

### Fertigungsverfahren zum Bau und zur Umrüstung

Neben Neubauprojekten wurden auch Möglichkeiten zur Umrüstung bestehender Schiffe untersucht. Es stellte sich heraus, dass sich nahezu alle Gütermotorschiffe für den Umbau eignen würden. In Einzelfällen müssten allerdings aufgrund des hohen Gewichts der Ladungstanks Verstärkungen der Schiffsstruktur im Bereich der Auflagerpunkte der Tanks vorgenommen werden [8].

Für ein Neubauprojekt wurden die Quer- und Längsfestigkeit der Schiffsstruktur untersucht und ein Hauptspant wurde konstruiert (siehe Abbildung 12). Die Fertigung oder Umrüstung des Schiffes und der Einbau der Tanks auf der Werft wurde als unproblematisch identifiziert, solange ausreichend Krankapazitäten zur Verfügung stehen.

Generell werden LNG-Tanks vom jeweiligen Zulieferer an Board installiert, so dass keine besonderen Kenntnisse der Werft erforderlich sind; eine gewisse Erfahrung im allgemeinen Tankschiffbau ist jedoch als sehr vorteilhaft anzusehen. Weitere Details zum LNG-Binnentankschiffbau finden sich im Abschlussbericht der Universität Duisburg-Essen [2].

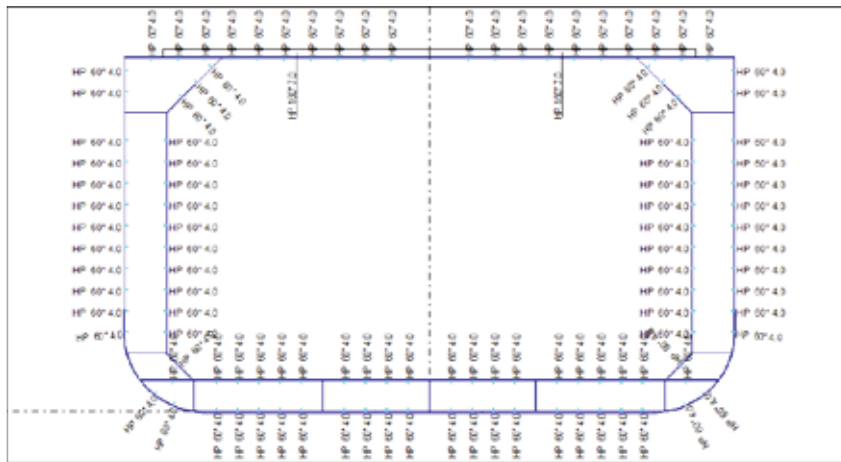


Abbildung 12: Steifen im Bereich des Hauptspantes

### Sicherheitskonzepte

Im Gegensatz zur Seeschifffahrt ist die Verwendung von LNG in der Binnenschifffahrt kaum vorhanden. Daher wurden sicherheitstechnische Untersuchungen durchgeführt, die die besonderen Eigenschaften und das Fahrtgebiet eines Binnenschiffs berücksichtigen. Der Entwurf für das LNG- und Gassystem wurde ausgeführt in Anlehnung an MSC 285(86) [7] sowie den Entwurf von Anhang T der Rheinschiffsuntersuchungsordnung und den „Sonderbestimmungen für Fahrzeuge, auf denen Antriebs- oder Hilfssysteme installiert sind, die mit Brennstoffen mit einem Flammpunkt von 55 °C oder darunter betrieben werden“ [5].

Ein zusätzliches Sicherheits-Kriterium für die Vermeidung von Gasleckagen ist die Umsetzung des Prinzips der „zweiten Barriere“ für LNG- und Gassysteme; z.B. gasführende Rohrleitungen in doppelwandiger Ausführung, Gasdruckregelstrecke (GVU) für Gasdruckregelung in einem Gehäuse oder

technische Einrichtungen für LNG Verdampfung zu Gas in einem gesonderten Raum zur Brennstoffaufbereitung (Fuel Preparation Room).

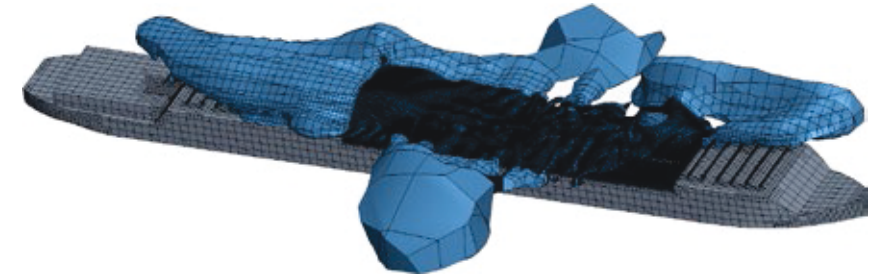


Abbildung 13: Methanausbreitung nach 14s bei Abriss der Ladeleitung

Insbesondere das Risiko eines LNG Austritts im LNG Brennstoff- und Ladungssystem als Folge eines technischen Fehlers wurde durch die Auslegung redundanter Systeme im gesamten gasführenden Bereich weitestgehend minimiert. Die für den LNG Binnentanker entworfenen LNG Tank- und Gassysteme wurden im Rahmen einer Gefahrenanalyse (HAZID) untersucht. Die HAZID Analyse erfolgte auf Basis des Konzeptentwurfs allgemein, ohne Berücksichtigung von speziellen schiffsbetrieblichen Zuständen (z.B. Lade- und Löschvorgang, Schiff an der Pier ohne Ladungsumschlag, Schiff in Fahrt, etc.).

Es wurden für das LNG Binnentankschiff drei Szenarien für eine mögliche Gasausbreitung mittels Strömungsberechnungen untersucht, die aufgrund einer Störung oder eines Schadenfalls entstehen könnte (siehe Abbildung 13).

Die drei Schadensszenarien sind:

- Abblasen des Gases mittels Abblasemast bei Stillstand und bei Schiff in Fahrt
- Ein Riss in einer Rohrleitung während des Be- und Entladens
- Abriss der LNG Hauptleitung während des Ladungsumschlags

Teilweise schlossen die Untersuchungen Wind aus verschiedenen Richtungen ein.

Ein wichtiges Ergebnis war die Tatsache, dass die Entstehung einer gefährlichen Gaskonzentration an Bord im Falle eines Unfalls nahezu ausgeschlossen werden kann. Die vollständige Sicherheitsuntersuchung des Projektpartners DNV GL sowie weitere Ergebnisse des Teilvorhabens finden sich in dessen Abschlussbericht [6].

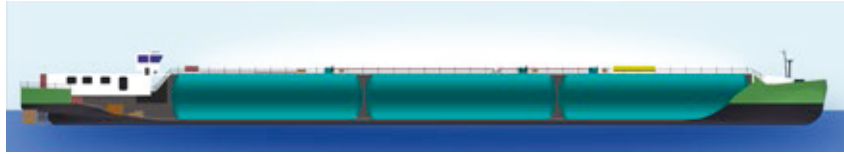


Abbildung 14: Impression des Entwurfs für das Neckarschiff

## Zusammenfassung

Im Projekt BinGas wurde ein ganzheitlicher Entwurf eines neuen LNG-Binnentankerschiffstyps, welcher LNG als Ladung und Treibstoff nutzt, entwickelt. Dabei wurden alle relevanten Faktoren, wie die hydrodynamische Optimierung des Rumpfes, die Auslegung eines sicheren Tanksystems und dessen Infrastruktur, die Modellierung eines passenden und umweltfreundlichen Antriebssystems sowie die Fertigung auf einer Binnenschiffswerft betrachtet. Begleitet wurden die Arbeiten durch ständige sicherheitstechnische Revisionen und die Umsetzung neuester Vorschriften und Regularien.

Durch gezielte Aufgabenteilung konnten im Verbundvorhaben vielfältige neue Kenntnisse über den Bau und den Betrieb von LNG-Binnentankerschiffstypen sowie über den allgemeinen Transport und die Verwendung von LNG gewonnen werden.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens sowie dem Projektträger Jülich für die stets konstruktive fachliche und administrative Betreuung. Ebenfalls gilt der Dank den Bearbeitern des Verbundprojektes, M. Radisch, H. Hartmann, S. Sigmund, T. Guesnet, Dr. R. Henn, R. Kaiser, W. Förster, Dr. J. Eichmeier, H. Pewe und G. Friederich.

Weiterhin danken wir dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Herr Weiner) und den assoziierten Partnern für die fachliche Diskussion und Beratung ohne die das Vorhaben nicht realisierbar gewesen wäre.

## Literatur

- [1] Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR); „Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (ADN)“, 2016
- [2] El Moctar, B., Dahlke, F., Radisch, M., Hartman, H. Sigmund, S.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung von LNG-Tank und Nutzungstechnologien für Binnenschiffe (Fkz: 03SX354A)“, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [3] Friedhoff, B.; Guesnet, T.; Kaiser, R.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Logistische und hydrodynamische Untersuchungen für den LNG-Transport mit Binnenschiffen (Fkz: 03SX354B)“, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST), Duisburg, 2016
- [4] Boog, M., Eichmeier, J.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung eines Simulationsprogramms für die Antriebsanlage von LNG- Binnentankerschiffen (Fkz: 03SX354C)“, MTU Friedrichshafen GmbH, Friedrichshafen, 2016
- [5] Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR); „Binnenschiffverkehrsuntersuchungsordnung (BinSchUO)“, 2016
- [6] Scholz, B., Pewe, H., Friederich, G.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung von Sicherheitskonzepten für den LNG-Transport mit Binnenschiffen (Fkz: 03SX354E)“, DNV GL, Hamburg, 2016
- [7] International Marine Organisation; „Resolution MSC.285(86): Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations in Ships“, 2009
- [8] Hitzbleck, K., Jacobs, J., Tempel, T.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung zum Bau und Umrüsten von LNG-Tankerschiffen, AP 4.3 (Fkz: 03SX354D)“, Neue Triton Schiffswerft, Duisburg, 2016

## HEPP – Hocheffiziente Produktionsplanung für Prototypenkompetenz

Förderkennzeichen: 03SX365

Dirk Steinhauer (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG)  
Prof. Dr.-Ing. Markus König, Thomas Hilfert (Ruhr-Universität Bochum)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, Dr.-Ing. Axel Friedewald,  
Jan Niklas Sikorra, Moritz Alexander Haux  
(Institut für Produktionsmanagement und -technik,  
Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Michael Hübler, Andreas Roppelt  
(Center of Maritime Technologies e.V.)  
Ilka Habenicht (SimPlan AG)

### Einleitung

Spezialschiffe dominieren seit einigen Jahren die Auftragsbücher der deutschen Werften. Aufgrund seiner technologisch führenden Rolle ist der deutsche Schiffbau in diesem Markt noch wettbewerbsfähig. Jedoch stoßen internationale Wettbewerber zunehmend in den Spezialschiffbau vor. Um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Werften zu erhalten, muss auch zukünftig die sichere Einhaltung von Lieferterminen bei Minimierung des Ressourcenaufwandes gewährleistet werden. Dabei fällt der Produktionsplanung eine entscheidende Rolle zu, in welcher schon früh die Weichen für die Produktion gestellt werden. Durch eine durchgängige, digitale Produktionsplanung wird die Planungssicherheit signifikant ausgebaut. Zentrale Bestandteile einer digitalen Produktionsplanung sind eine einheitliche Plattform zur Vernetzung verschiedener Informationsquellen und die Simulation. [1]

Der Spezialschiffbau ist gekennzeichnet durch eine geringe Seriengröße, viele Schiffe werden als Unikat gebaut. Die Prototypkompetenz einer Werft spielt im Spezialschiffbau daher eine entscheidende Rolle. In der frühen Planungsphase der schiffbaulichen Unikatfertigung steht die Produktionsplanung vor den Herausforderungen einer unzureichenden Datengrundlage, -verfügbarkeit und -qualität. So sind notwendige Planungsdaten nicht vorhanden, unvollständig oder unzureichend detailliert. Aufgrund der Verwendung von Erfahrungs- und Schätzwerten sind Daten mit Unschärfen behaftet. Hierdurch wird die Planungssicherheit reduziert. Zudem sind Planungsdaten häufig nicht strukturiert und liegen verteilt über mehrere IT-Systeme vor. Dies verursacht Inkonsistenzen und führt somit zu zusätzlichen Arbeiten. Somit existiert ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung des Planungsaufwands

bei gleichzeitiger Steigerung der Aussagekraft der Planung und der Wahl eines günstigen Detaillierungsgrades.

Insbesondere die simulationsgestützte Produktionsplanung ist geeignet, Lieferzeiten abzusichern sowie potenzielle Ressourcenengpässe zu identifizieren und zu überwinden. Um jedoch die Leistungsfähigkeit der Simulation voll nutzen zu können, werden umfangreicher Eingangsdaten zum Produkt, den Produktionsprozessen, den Ressourcen und weiteren Randbedingungen benötigt. Aus diesem Grund wird die Simulation bisher in der frühen Phase nur partiell genutzt.

Ziel des Verbundvorhabens HEPP war die Entwicklung von Methoden zur Aufbereitung, Prüfung und Verbesserung von Planungsgrundlagen, um eine durchgängige simulationsgestützte Produktionsplanung für Prototypen zu ermöglichen. Dafür wurden folgende Methoden und Werkzeuge entwickelt:

- Digitale Plattform zum vernetzten Informationsaustausch
- Werkzeug zur Aufbereitung von Planungsdaten für die Simulation
- Generatoren zur Erzeugung von Bauteildaten und Produktionsplänen
- Konzept zur Integration von Unschärfen in die Simulation

Folgende Partner bildeten das Konsortium des Verbundvorhabens HEPP:

- Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG (Koordinator)
- Meyer Werft GmbH
- Center of Maritime Technologies e.V.
- SimPlan AG
- Ruhr-Universität Bochum (Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen)
- Technische Universität Hamburg-Harburg (Institut für Produktionsmanagement und -technik)

Im Rahmen dieses Beitrags werden zunächst die entwickelten Demonstratoren beschrieben und dann deren Anwendung und Zusammenwirken anhand von zwei exemplarischen Planungsszenarien erläutert.

## Digitale Plattform zum vernetzten Informationsaustausch

Komplexe Systeme mit tief verschachtelten Zusammenhängen in ein Datenformat zu konvertieren, welches gleichweg dynamisch und dennoch strukturiert ist, stellt eine große Herausforderung dar. Im ersten Schritt des HEPP-Projektes wurden hierzu alle verfügbaren und notwendigen Planungsdaten, die in verschiedenen Planungsphasen verfügbar sind, analysiert. Die resultierenden Planungsdaten wurden an Hand ihrer Bedeutung für die Produktionsplanung klassifiziert.

Komplexe Abhängigkeiten zwischen heterogenen Informationen können mit Hilfe einer Ontologie beschrieben werden. Eine Ontologie beschreibt die Zusammenhänge zwischen einzelnen Komponenten unter Verwendung einer Graphenstruktur [1]. Abbildung 1 zeigt die komplexen Zusammenhänge der Ontologie, der relevanten Planungsdaten einer frühen Entwurfsphase. Jedes Rechteck bezeichnet eine Entitätsklasse, während uni- und bidirektionale Verknüpfungen zwischen den Klassen mit verschiedenfarbigen Linien kenntlich gemacht sind.

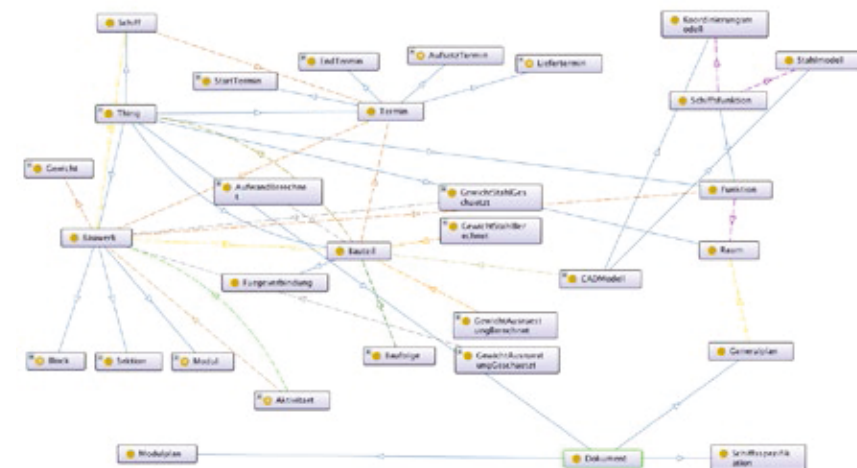


Abbildung 1: Ausschnitt aus der HEPP-Ontologie

Abbildung 2 zeigt einen Teilausschnitt der Ontologie. Die Planung orientiert sich anhand Fertigung einzelner Bauwerke, wie z.B. Blöcke, Module und Sektionen. In frühen Phasen erfolgt die Produktionsplanung unter anderem anhand der geschätzten Gewichte für den Stahlbau und die Ausrüstung sowie der Funktion des Bauwerks. Darauf sind einzelne Aktivitäten zu definieren, für welche mit Hilfe der Simulation Termine berechnet werden können. Die Ontologie beschreibt nur alle möglichen Verknüpfungen zwischen wesentlichen Informationen. Für jedes Bauwerk sind dann einzelne Instanzen zu

bilden und die Verknüpfungen zu konkreten Informationen, wie z.B. Gewichten, aufzubauen. Auf Basis der Verknüpfungen kann zum Beispiel die Konsistenz und Vollständigkeit der vorhandenen Planungsdaten geprüft werden.

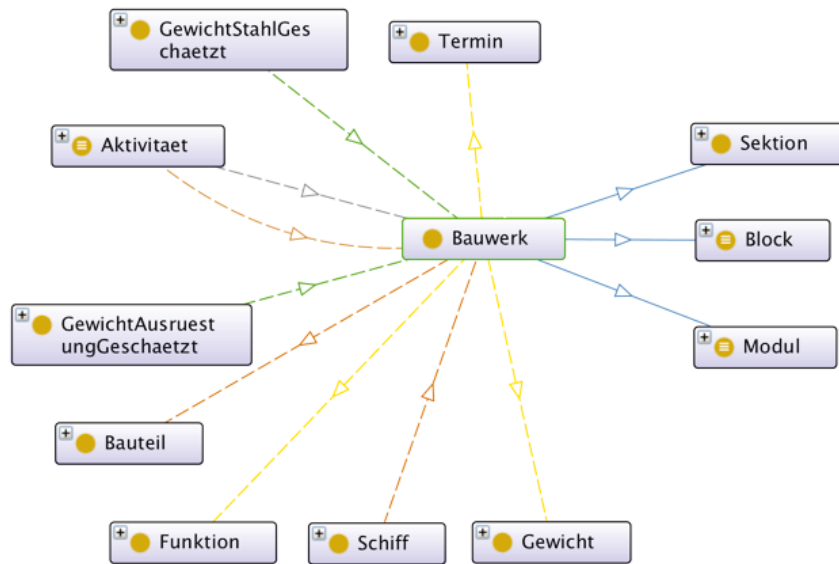


Abbildung 2: Ausschnitt aus der HEPP-Ontologie

Auf Basis der Ontologie werden die Planungsdaten aus den vorhandenen Systemen der Werften extrahiert, verknüpft und in einer relationalen Datenbank gespeichert. Die Verknüpfung und Verwaltung der relevanten Planungsdaten basiert ausschließlich auf der zuvor definierten Ontologie. Mit Hilfe von verfügbaren Softwarewerkzeugen kann die Ontologie auf die speziellen Bedürfnisse der Werften angepasst werden [2]. Die Ontologie bildet ebenfalls die Regelbasis für die weitere Bewertung der Planungsdaten.

Zur Anbindung der vorhandenen Informationssysteme der Werften, zur Verknüpfung der Planungsdaten und zur Bereitstellung der verknüpften Planungsdaten für Systeme der Produktionsplanung wurde die HEPP-Plattform konzeptioniert und prototypisch evaluiert. Abbildung 3 zeigt den Aufbau der gesamten HEPP-Plattform mit allen derzeit integrierten Softwarekomponenten und Datenbanken.

Die zentrale HEPP-Plattform stellt eine REST-konforme API zur Verfügung, welche mit vielen Bibliotheken und System standardisiert angesprochen werden kann. Mit dem HEPP Client können neue Projekte und Planungsstände gelegt, Importe und Exporte durchgeführt sowie bereits bestehende Daten modifiziert werden. Zusätzlich wird den Planern über das HEPP Admin Inter-

face eine einfache Webanwendung bereitgestellt, mit der bestimmte Kennzahlen und Performanceindikatoren, wie z.B. der Status von Terminen für Bauwerke, schnell abgefragt werden können.

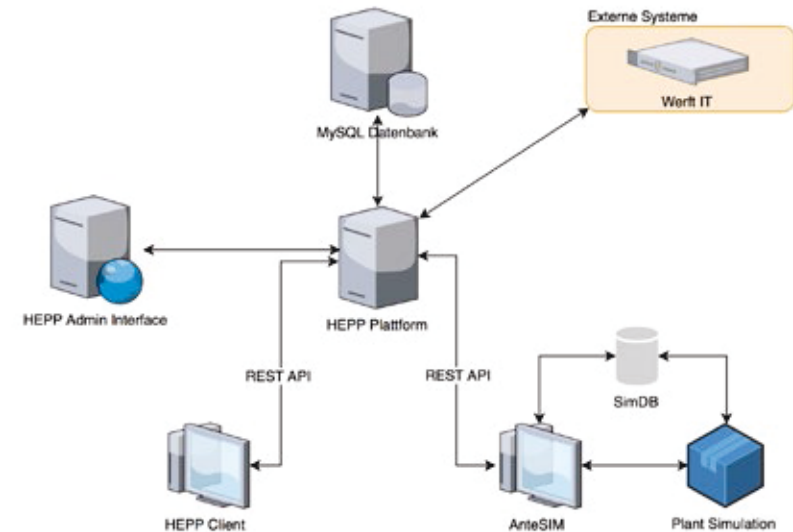


Abbildung 3: Übersicht HEPP-Plattform

### Integration von Unschärfen

Unschärfen sind ein charakteristisches Merkmal der Produktionsplanung in der Unikatfertigung [4]. Sie reduzieren die Planungsgenauigkeit und beeinflussen die Qualität und Robustheit der Produktionsplanung signifikant [5]. Ein Teilziel des Forschungsprojekts war es daher, Transparenz über die Unschärfen, ihre Auswirkungen und Ursachen zu schaffen, damit diesen gezielt begegnet werden kann.

In Experteninterviews wurde zunächst analysiert, in welchem Umfang die Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten mit Unschärfen behaftet sind und wie deren Ausprägung je nach Planungsphase und -fortschritt variiert. Die Planungsdaten streuen dabei innerhalb bestimmter Wertebereiche. Als Beispiel wurden die geschätzten Gewichte für Stahlbau und Ausrüstung sowie die davon abhängigen Auftragszeiten für die Montage einzelner Produktkomponenten als unscharfe Planungsdaten identifiziert. Weiterhin wurde die Korrelation zwischen der Qualität der Eingangsdaten und der Ausprägung der Unschärfen untersucht. Als Ergebnis wurde die Datenqualität als Kennzahl zur Bewertung der Unschärfen ausgewählt. Die Datenqualität erfasst, inwieweit die Planungsdaten die Anforderungen der Planung hinsichtlich

ausgewählter Merkmale erfüllen (Vgl. [6]). Die Fachabteilungen bewerten die Eingangsdaten anhand der Qualitätsmerkmale Genauigkeit, Vollständigkeit, Glaubwürdigkeit und Objektivität.

Um Expertenwissen abbilden und in Kennzahlen übertragen zu können wurde ein Fuzzy Modellierungsansatz gewählt. Zur Beschreibung der unscharfen Planungsdaten wurden Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Eine Zugehörigkeitsfunktion wird durch den vorgegebenen Wertebereich der unscharfen Planungsdaten und den durch den Planer angenommenen Wert definiert.

Die Auswirkungen der Unschärfen wurden mit Simulationsstudien untersucht. Die Simulation kann allerdings nur auf Basis konkreter Werte erfolgen. Die unscharfen Planungsdaten müssen somit wieder in Eingangsdaten umgewandelt werden, die in der Simulation verwendet werden können. Im Rahmen des Vorhabens HEPP wurde dafür ein Fuzzy-Simulationsbaustein konzipiert, welcher diese Funktion erfüllt.

Bei der Bestimmung der konkreten Werte werden der angenommene Planwert, der Wertebereich und die Datenqualität des Bausteins berücksichtigt. Der Wertebereich, in dem der konkrete Wert liegen kann, wurde als Funktion der Datenqualität und des in der Zugehörigkeitsfunktion vorgegebenen Bereiches berechnet. Dazu wird die Zugehörigkeitsfunktion durch eine Gerade parallel zur x-Achse auf Höhe der Datenqualität geschnitten (Alpha-cut). Für die Datenqualität 1 liegt die Gerade auf Höhe des Maximums der Zugehörigkeitsfunktion und für Datenqualität 0 auf Höhe der x-Achse. Die Schnittpunkte der Zugehörigkeitsfunktion mit dieser Geraden bestimmen den Wertebereich. Der Wert wird auf Basis einer Verteilungsfunktion ermittelt. Es können eine Gleichverteilung oder eine Verteilung, deren Dichtefunktion aus der Zugehörigkeitsfunktion abgeleitet wurde, verwendet werden. Durch die Durchführung mehrerer Simulationsläufe kann ermittelt werden, welche Auswirkungen unscharfe Planungsdaten mit einer gegebenen Datenqualität haben.

Die Auswirkungen der Unschärfen werden anhand auftrags- und ressourcenbezogener Kennzahlen evaluiert. Zentrale Kennzahlen sind die Termintreue, die Terminabweichung, die Auftragszeit, die Durchlaufzeit sowie die Mitarbeiter- und Maschinenauslastung. Diese Kennzahlen werden mittels geeigneter Diagramme (Säulendiagramm, Histogramm, Durchlaufdiagramm) visualisiert. Für ein Simulationsszenario einer bestimmten Datenqualität können die Worst- und Best-Case-Szenarien dargestellt werden. Zudem besteht die Möglichkeit mehrere Simulationsszenarien mit verschiedener Datenqualität einander gegenüberzustellen (siehe Abbildung 4).

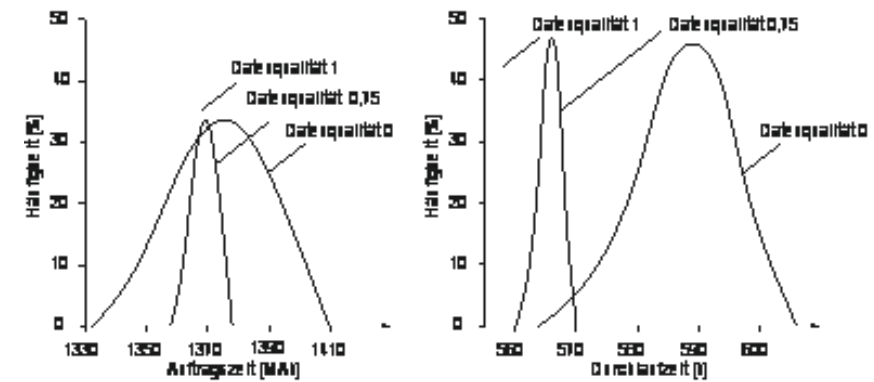


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung der Auswirkung von Datenqualität auf die Auftragszeit und die Durchlaufzeit eines Auftrags [7]

Der Planer sieht, in welchen Planungsprozessen die Datenqualität die Einhaltung der logistischen Zielgrößen gefährdet und kann darauf aufbauend Maßnahmen zur Verbesserung der Datenqualität oder zur Erhöhung der Robustheit der Planung anstoßen.

### Teiledaten- und Plangenerierung

Bereits vor Vertragsabschluss, in der frühen Phase eines Neubauprojekts müssen Planer den Durchlauf des Schiffes durch die Fertigung unter gegebenen Randbedingungen bestimmen. Zu diesem frühen Zeitpunkt der Planung schätzen die Planer Durchführungszeiten und interne Liefertermine auf Basis bereits gebauter Schiffe. Die geschätzten Durchführungszeiten für die einzelnen Bauwerke und deren Abgangstermine bilden die Basis für eine Bauplatzbelegungsplanung. Diese frühe Planung erfolgt ohne exakte Kenntnis über die Detailkonstruktion des Schiffes. Für die Planung wird daher eine Schätzung der Durchführungszeit durchgeführt, die auf der Annahme des Planers über die in einem Bauwerk enthaltenen Teile basiert. Aufgrund der vielen getroffenen Annahmen und großen Datenunsicherheiten ist die Planung ungenau (vgl. [8]).

Damit die Pläne in der frühen Phase der Planung die spätere Realität in der Fertigung besser abbilden können, müssen Schätzfehler reduziert werden. Dies kann durch die Ableitung von Schiffskomponenten aus ähnlichen Entwürfen erfolgen. Hierfür wurde im Projekt HEPP ein Tool entwickelt, das die Erzeugung von Konstruktionsdetails für die Produktionsplanung auf Basis parametrisierbarer Vorlagen ableitet [9]. Das Tool ermöglicht es, bestehende Konstruktionsdaten, mit Parametern eines neuen Schiffes zu versehen und sich somit für die beschriebenen Bauwerke eine Stückliste erzeugen zu

lassen, anhand derer Durchführungszeiten in der Fertigung ermittelt werden können. Im Nachhinein kann die erzeugte Stückliste mit der realen Stückliste abgeglichen werden, um die Fehlerrate der Schätzung für die Zukunft zu verringern.

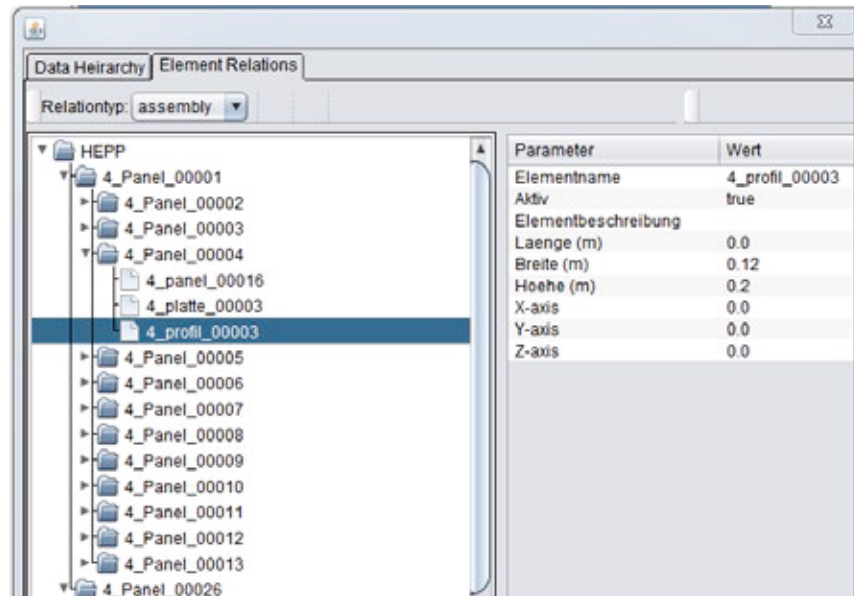


Abbildung 5: Generierte Teile [9]

Mithilfe der berechneten Durchführungszeiten kann eine Bauplatzbelegungsplanung durchgeführt werden. In HEPP wurde ein lineares Optimierungsmodell entwickelt, welches Aufträge unter Berücksichtigung bestimmter Restriktionen geeigneten Bauplätzen zuordnet [10].

Der entwickelte Algorithmus berücksichtigt dabei nur die wichtigsten Randbedingungen der Fertigung und liefert dem Planer eine valide Startlösung. Der Planer kann auf Basis der Startlösung einen optimalen Produktionsplan erarbeiten.

### AnteSim

AnteSIM wurde als Assistenzsystem zur Bearbeitung, Generierung und Visualisierung der Simulationsdaten entwickelt. Es bildet dabei einen Teil der SPSI-Architektur (Shipyards Planning and Support Interface), bestehend aus GUI, Datenbank und Simulationswerkzeug (siehe Abbildung 6). Die Struktur der Datenbank baut auf den Ergebnissen des Verbundvorhabens GeneSim (FKZ 03SX274) auf [11].

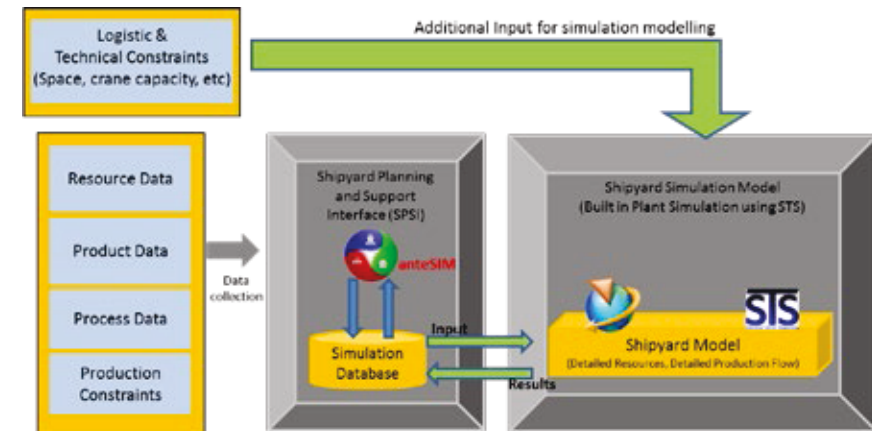


Abbildung 6: Das Assistenzsystem AnteSim

Mittels AnteSim können Daten zum Produkt, zur Planung, zum Prozess und zu den Ressourcen aufwandsarm aufbereitet und in die Simulationssoftware Plant Simulation übertragen werden. Die Simulationsergebnisse können anschließend in AnteSim importiert und visualisiert werden. Damit erlaubt AnteSim Anwendern ohne Simulationsexpertise die Vorteile der ereignisdiskreten Simulation zu nutzen und die komplexen Planungsaufgaben, wie diese im Schiffbau sowie der Unikatfertigung allgemein vorzufinden sind, bewältigen zu können.

Zur Darstellung und zum Editieren der Simulationsdaten stehen unterschiedliche Perspektiven zur Verfügung:

- **Elements:** Die Elements-Perspektive erlaubt es Produktdaten versionsbezogen unter Berücksichtigung der hierarchischen Struktur, der Angabe eines Elementtyps und benutzerdefinierter Attribute zu importieren und exportieren und diese anschließend bei Bedarf weiter aufzubereiten. Den einzelnen Elementen können zuvor definierte Prozessmuster zugeordnet werden. Ferner lassen sich Reihenfolgebedingungen automatisch generieren und editieren, wobei Fügeverbindungen generiert werden können. Für die Reihenfolgebedingungen stehen Filter- und Sortierfunktionen sowie Mechanismen zur Vermeidung von Inkonsistenzen zur Verfügung.
- **Volumes:** Innerhalb der Volumes-Perspektive lassen sich die Elemente in Form von sog. Boundingboxen darstellen. So wird eine dreidimensionale Darstellung der Elemente anhand des umschließenden Quaders erreicht.
- **Processes:** Innerhalb dieser Perspektive können sämtliche Prozessmuster, die innerhalb der eigenen Produktion stattfinden, in einer Pro-



zessbibliothek angelegt werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Wissen erfahrener Mitarbeiter, z.B. hinsichtlich der Prozessdauern, an einer zentralen Stelle gesammelt und jederzeit wiederverwendet werden kann.

- **Resources:** In dieser Perspektive erfolgt die Definition der Ressourcen, Qualifikationen, Schichten und Betriebskalender. Im Anschluss an die Definition können den Ressourcen individuell die entsprechenden Qualifikationen, Schichten und Betriebskalender zugeordnet werden.
- **Types:** Hier hat der Anwender die Möglichkeit die Elementtypen festzulegen, welche bei der Definition der Elemente und Prozesse verwendet werden können.
- **Studies:** Hier erfolgt die Definition und Verwaltung der zu untersuchenden Simulationsstudien samt Szenarien, Experimenten und Simulationsläufen.

## Szenarien

Im Rahmen des Projektes wurden die entwickelten Demonstratoren an vier verschiedenen Szenarien evaluiert. Stellvertretend werden hier die Szenarien Projektierung und Auftragserteilung vorgestellt.

### Szenario 1 – Projektierung

In diesem Szenario wird die frühe Planungsphase der Auftragsabwicklung „Projektierung“ betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt sind nur sehr wenige, grobe Informationen vorhanden. Es wird angenommen, dass basierend auf dem Generalplan zunächst die Blockteilung des Schiffes erfolgt ist. Trotz der wenigen Informationen wird die Schiffskörpermontage unter Berücksichtigung des einzuhaltenden Liefertermins des Schiffes unter Einsatz der entwickelten Prototypen geplant. Dabei werden die Aufsetztermine der einzelnen Blöcke ermittelt, welche anschließend Grundlage für die weitere Planung vorgelagerter Bereiche sind, so z.B. der Blockmontage und der Sektionsmontage.

Zur Ermittlung der Aufsetztermine einzelner Blöcke im Dock werden zunächst die Produktdaten des aktuellen und des Vorgängerschiffes über die HEPP-Plattform in die Simulationsdatenbank importiert. Die Informationen des Vorgängerschiffes werden ebenfalls importiert, um die tatsächliche Auslastung im Dock zu berücksichtigen. In Abbildung 7 ist beispielhaft ein Kreuzfahrtschiff bestehend aus einzelnen Blöcken im 3D-Viewer in AnteSim dargestellt.

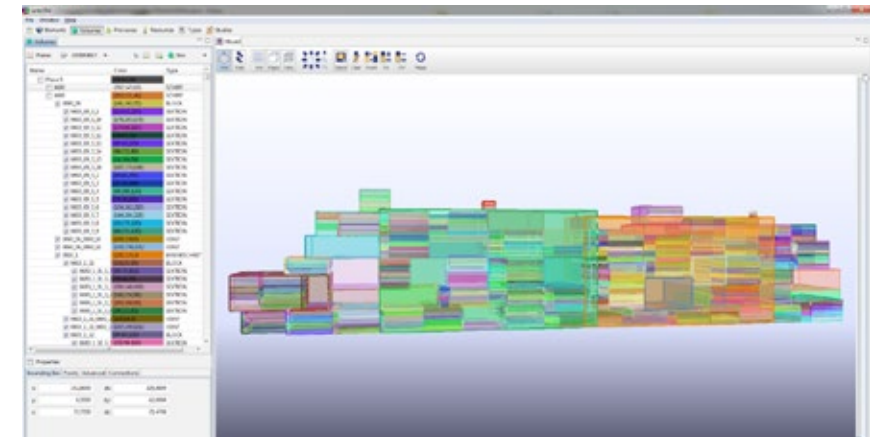


Abbildung 7: Volumenansicht eines Kreuzfahrtschiffes in AnteSim

Nach Import der Produktdaten erfolgt in AnteSim die Zuweisung der Prozessmuster. Die Prozessmuster umfassen dabei sämtliche Prozesse der Schiffskörpermontage inklusive standardisierter Abhängigkeiten. Dazu gehören das Positionieren, Heften und das Verschweißen der Blöcke sowie Ausrüstungsarbeiten an Bord des Schiffes. Anschließend werden die Aufsetzreihenfolgebedingungen für die Blöcke und der zugehörigen Schweißverbindungen unter Vorgabe eines Startblocks automatisch erzeugt. Dabei beruht der Algorithmus zur Erzeugung der Reihenfolgebedingungen auf einer Strategie, bei der ausgehend vom Startblock die Nachfolger zu allen Seiten hin expandieren. Insgesamt wurden für dieses Beispielszenario 546 Bedingungen erzeugt und auf Zirkelbezüge hin automatisch überprüft.

Zur Ermittlung der Aufsetztermine der einzelnen Blöcke unter Berücksichtigung des mit dem Kunden vereinbarten Liefertermins für das Schiff wurde das Simulationsmodell für die Schiffskörpermontage herangezogen. Dort sind die festen Ressourcen und die damit zusammenhängende Logistik im Dock modelliert. Das Schiff ist in zwei sogenannte Bauabschnitte eingeteilt, welche jeweils ungefähr die Hälfte aller Schiffsböcke umfassen. Die untersuchte Baustategie lässt sich in den folgenden Schritten beschreiben:

- Beginn des Baus des ersten Bauabschnittes parallel zum Vorgängerschiff, um Zeit zu sparen.
- Sobald der erste Bauabschnitt aus den einzelnen Blöcken zusammengesetzt und schwimmfähig ist, wird er aus dem Dock herausgeschwommen und der Bau des zweiten Bauabschnittes wird begonnen (siehe Abbildung 8).

- Nach der Fertigstellung des zweiten Bauabschnittes und des Vorgängerschiffes verlassen beide zunächst das Dock.
- Anschließend werden beide Bauabschnitte wieder in das Dock eingeschwommen und miteinander verschweißt. Die restlichen Blöcke werden aufgesetzt.

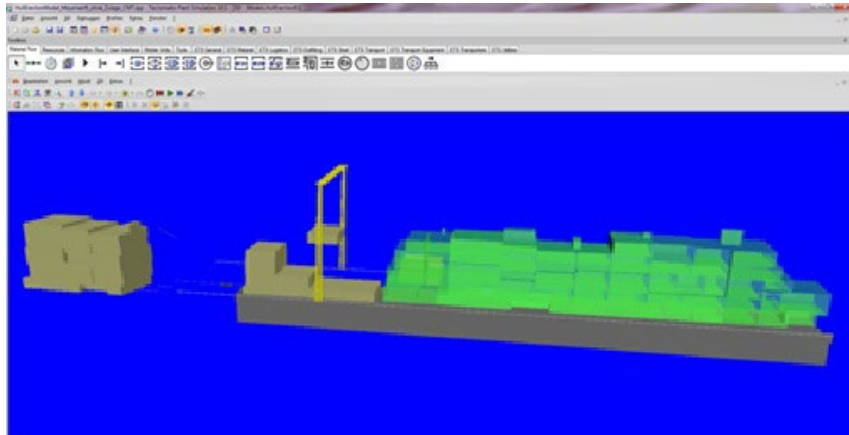


Abbildung 8: Bauabschnitte eines Kreuzfahrtschiffes im Simulationsmodell

Neben der Fläche im Dock wurden weitere zur Verfügung stehenden Ressourcen wie Kran und Personal unter Beachtung von Schichtmodellen und Betriebskalender im Simulationsmodell berücksichtigt. Die Aufsetztermine der Blöcke und der Fertigstellungstermin des Schiffes wurden während des Simulationslaufs automatisch protokolliert und anschließend in die Simulationsdatenbank übertragen, sodass diese in AnteSim sowie in der HEPP-Plattform zu Verfügung stehen.

## Szenario 2 – Auftragserteilung

Nach der Auftragserteilung durch den Kunden liegen folgende Informationen vor: Blockteilung, Reihenfolge und Aufsetztermine der Blöcke sowie Datenqualität dieser Bauwerke. Zusätzlich ist bekannt, dass einer der Blöcke eine geringe Datenqualität aufweist. In dieser Planungsphase gilt es die Bauplatzbelegungsplanung für die Blockmontage durchzuführen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die drei Schritte Datenaufbereitung, Simulation der Blockmontage und Plan generieren ausgeführt. Folgende Demonstratoren wurden dabei eingesetzt: AnteSim, HEPP-Plattform, Simulationsdatenbank, Simulationsmodell, Fuzzy-Baustein und Plangenerator.

Zuerst wurden die Blockbezeichnungen, Blockmaße und Blockteilungsregeln aus der HEPP-Plattform in AnteSim importiert. Aus diesen Daten wurden mit dem Teilegenerator Sektionsbezeichnungen, Sektionsmaße, Schweißstöße und Baufolgen erzeugt. Den Sektionen wurde ein Prozessmuster zugewiesen. Außerdem wurden benutzerdefinierte Attribute für den Block mit der geringen Datenqualität ergänzt, um diese Unschärfe bei der Kalkulation der Durchführungszeit berücksichtigen zu können. Anschließend wurden mit einem Simulationsmodell, das die Montage der Sektionen zu einem Block abbildet, die Durchführungszeiten der Blöcke ermittelt und die Ergebnisse in die Simulationsdatenbank übertragen. In diesem Modell war der Fuzzy-Baustein integriert, welcher für den Block mit der geringen Datenqualität drei Durchführungszeiten (Mittelwert, Minimum, Maximum) ermittelte. Im letzten Schritt wurde der Plangenerator gestartet. Dieser bestimmte aus den Durchführungszeiten und den Aufsetzterminen der Blöcke eine optimale Bauplatzbelegung und exportierte diese in die HEPP-Plattform. Anschließend wird die Bauplatzbelegung in einem Werfttool visualisiert (siehe Abbildung 9).

Datum						
A	B230	S010	S040	S060	S130	
B	B050		B130	B170	S050	
C		A030			B010	
D	B030		B110	S110		S150
E	B130	R010		S170		S220
F			A010			
G		S030		S120		S160
H	B070		B190		B210	B250

Abbildung 9: Exemplarische Bauplatzbelegungsplanung

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Durchführungszeiten des Blocks mit geringer Datenqualität auf die Bauplatzbelegung zu untersuchen, wurde der Plangenerator mehrfach ausgeführt. Drei Vorteile ergeben sich gegenüber dem klassischen Vorgehen: der Plangenerator reduziert den Aufwand zur Erzeugung einer Bauplatzbelegungsplanung signifikant, die mittels Simulation erzeugten Durchführungszeiten sind präziser und durch die Integration der Unschärfen können frühzeitig die Auswirkungen der unvollständigen Information abgeschätzt werden.

## Fazit

Das Verbundvorhaben HEPP hatte zum Ziel, durch die Entwicklung von Methoden und Konzepten eine durchgängige simulationsgestützte Produktionsplanung von Prototypen im Schiffbau zu ermöglichen.

Die entwickelte HEPP-Plattform vernetzt unterschiedliche Datenquellen miteinander. Zudem wird die Qualität der Daten bewertet und der Planungsfort-

schritt erfasst. Hierdurch werden Inkonsistenzen reduziert und die Datengrundlage für den Planungsprozess wird insgesamt verbessert. Die entwickelten Datengeneratoren gestatten es, in der frühen Phase der Planung Produktdaten bzw. Prozessdaten zu erzeugen und diese für weitere Planungsschritte zu benutzen. Das entwickelte Werkzeug AnteSim befähigt den Anwender Planungsdaten mit zusätzlichen Informationen für die Simulation aufzubereiten, verschiedene Simulationsstudien durchzuführen und diese anschließend auszuwerten. Durch das entwickelte Konzept zur Integration der Unschärfen in die Simulation ist es nun möglich, die Auswirkungen der Unschärfen im Planungsprozess zu quantifizieren. Außerdem können gezielt Maßnahmen zur Handhabung von Unschärfen ergriffen werden. Die in HEPP entwickelten Konzepte und Demonstratoren wurden bei den beteiligten Werften mit Realdaten validiert. Gemeinsam ermöglichen die Konzepte eine simulationsgestützte Produktionsplanung in der frühen Phase der Unikatfertigung. Hierdurch wird die Basis für die Einhaltung der logistischen Zielgrößen geschaffen. Um die logistische Zielerreichung anschließend in der Produktion zu gewährleisten, muss auch die Fertigungssteuerung den besonderen Ansprüchen der schiffbaulichen Unikatfertigung Rechnung tragen. Dafür gilt es in zukünftigen Forschungsprojekten Konzepte zu entwickeln.

## Literatur

- [1] BMWi-Förderprogramm: Maritime Technologien der nächsten Generation – Das Forschungsprogramm für Schiffbau, Schifffahrt und Meerestechnik. www.BMWi.de, Berlin, 2011.
- [2] Maedche, A.: *Ontology Learning for the Semantic Web*. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Volume 665, 2003.
- [3] Protégé: The Protege Project. <http://protege.stanford.edu>, letzter Zugriff am 29.09.2016.
- [4] Gruß, R.: *Schlanke Unikatfertigung Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production*. Wiesbaden: Gabler Verlag 2010.
- [5] Werners, B.; Thorn, J.: *Supply Chain Planning bei Nachfrageunsicherheit*. In: *PPS Management* 7 (2002) 2, S. 51–54.
- [6] Hinrichs, H.: *Datenqualitätsmanagement in Data Warehouse-Systemen*. Dissertation Universität Oldenburg, 2002.
- [7] Steinhauer, D.; Sikorra, J. N.; Haux, M. A.; Friedewald, A.; Lödding, H.: *Processing incomplete data for Simulationbased Production Planning in Shipbuilding*. *Journal of Simulation special issue* (erscheint demnächst).
- [8] R. Lee Storch, C. P. Hammon, H. M. Bunch, R. C. Moore, *Ship Production*. (1995)
- [9] Sikorra, J. N.; Friedewald, A.; Lödding, H.: *Early estimation of work contents for planning the one-of-a-kind-production by the example of shipbuilding in 2016 International Conference on Computer and Digital Manufacturing (ICCDM); Proceedings, Chiang Mai 2016*
- [10] Sikorra, J. N.; Glöckner, R.; Friedewald, A.; Lödding, H.: *Scheduling for Assembly Sites in Shipyards Using Linear Optimization in: RINA (Hrsg.): International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2015 (ICCAS 2015) Papers Volume I, Bremen 2015, S. 117-125, ISBN 978-1-909024-33-5*
- [11] Steinhauer, D.; Soyka, M.; Duchêne, B.: *„GeneSim – Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation“*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben GeneSim 2009-2011, gefördert vom BMWi mit dem Förderkennzeichen 03SX274

## **INKOV – Entwicklung innovativer Kolben- und Ventillösungen mit Werkstoffverbunden in Schiffsmotoren**

Förderkennzeichen: 03SX364

Dipl.-Ing. Peter Kolbe (Gesenschmiede Schneider GmbH Aalen)  
Dipl.-Ing. André Wagner  
(Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Bludszuweit  
(MET Motoren- und Energietechnik GmbH)  
Dipl.-Ing. Henrik Specht (WTZ Roßlau gGmbH)

Projektkoordinator:

Gesenschmiede Schneider GmbH Aalen

Entwicklung von Werkstoffen und Hybridbauteilen für Kolben und Ventile in thermisch hochbelasteten Schiffsmotoren

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Entwicklung hybrider Werkstoffverbunde für thermisch hoch belastete Schiffsmotoren

MET Motoren- und Energietechnik GmbH

Neue Auslegungs-, Dimensionierungsverfahren und Fertigungstechnologien für Schiffsmotorenkolben mit hybriden Werkstoffkombinationen

WTZ Roßlau gGmbH

Entwicklung von Prüfverfahren und -vorschriften zur Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses von Schiffsmotorenkomponenten aus hybriden Werkstoffen

### **Gesamtziel des Vorhabens**

Der Kern des Vorhabens besteht in der Entwicklung von dynamisch und thermisch hochbelastbaren Motorbauteilen durch den Einsatz von Werkstoffverbunden, die den Anforderungen künftiger Schiffsmotoren generationen gerecht werden. Um den strengen zukünftigen Emissionsgrenzen in der Schifffahrt (IMO TIER III) zu entsprechen, wurde im Verbundvorhaben ebenfalls der Einsatz von emissionsarmen Gasmotoren behandelt.

Ökonomische und ökologische Belange stehen bei innovativen Lösungen im Vordergrund, um sich den Herausforderungen des 21. Jahrhunderts an die Seeschifffahrt zu stellen.

## Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Als wichtiger Bezug zu den förderpolitischen Zielstellungen des Forschungsprogramms „Maritime Technologien der nächsten Generation“ ist beim Vorhaben das Zusammenwirken von industriellen Partnern mit wissenschaftlichen Institutionen zu benennen, mit dem Ziel über zu erarbeitende Alleinstellungsmerkmale die Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Verbundprojektpartner zu steigern sowie die Kompetenz der maritimen Wirtschaft zu erhöhen und deren Produktivität zu steigern. Durch das Zusammenwirken der Verbundpartner ist gesichert, dass grundlegende industrielle Aufgabenstellungen in der nötigen Tiefe unter Berücksichtigung der ganzen Komplexität untersucht wurden und entlang der gesamten Wertschöpfungskette geforscht wurde.

Die so zu erwartenden grundlegenden Erkenntnisse für die Entwicklung innovativer Schiffsmotorenkomponenten bestehend aus neuartigen Werkstoffverbunden und den dazugehörigen neuartigen Fertigungstechnologien zur Reduzierung der Abgasemissionen nach IMO TIER III fließen in die maritimen Zukunftsprogramme ein, stärken die maritime Wirtschaft nachhaltig und leisten einen bedeutsamen umweltschonenden Beitrag. Neben dem zu erwartenden Know-how-Zuwachs und -vorsprung für die beteiligten Partner werden mit den gewonnenen grundlegenden Erkenntnissen weitere angewandte Forschungen angestoßen, die zu leistungsfähigen neuen Verfahren und leistungsfähigen Produkten führen

## Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Als mögliche Zielrichtung wird einerseits der weitere Betrieb mit kostengünstigem Schweröl gesehen, andererseits auch Diesel und Gas. Das bedeutet jedoch eine aufwändige Abgasnachbehandlung. Die damit verbundenen Lasterhöhungen sind sehr groß und können durch die gegenwärtigen Brennraumkomponenten nicht mehr ertragen werden. Genau auf diesen zukünftigen Bedarf ist die Zielstellung dieses Vorhabens gerichtet. Hybridbauteile mit örtlich maßgeschneiderten Werkstoffeigenschaften sollen die zukünftigen neuen hohen Anforderungen erfüllen. Das Vorhaben soll dafür die erforderlichen Dimensionierungs- und fertigungstechnologischen Grundlagen schaffen, um die spätere Entwicklung der neuen Komponenten wirksam zu unterstützen.

Eine zweite Zielstellung betrifft die Anwendung von kostengünstigem Erdgas im Schiffsbetrieb anstelle von Schweröl. Der umwelttechnische Vorteil besteht darin, dass moderne Gasmotoren zukünftige Emissionsanforderungen ohne Abgasnachbehandlungen erfüllen. Um die hohen Zuverlässigkeits- und

Lebensdaueranforderungen im Schiffsbetrieb zu erfüllen, müssen jedoch auch die Brennraumkomponenten der gegenwärtigen Gasmotoren neu entwickelt werden. Das Verbundprojekt zielt darauf ab, auch für diese Entwicklungsrichtung die erforderlichen Dimensionierungsgrundlagen und Fertigungstechnologien zu erarbeiten.

## Angestrebter Fortschritt im Vergleich zum Stand der Technik, wissenschaftlich-technische Risiken

Der angestrebte Fortschritt im Vergleich zum Stand der Technik besteht im Vorhaben vor allem in der simulationsgestützten Auslegung und Neugestaltung von höchstbelasteten Brennraumbauteilen für Schiffsmotoren auf Basis von neuartigen reibgeschweißten hybriden Werkstoffverbunden und Fertigungstechnologien einschließlich der werkstofftechnischen Qualitätssicherung auf Basis neuer Prüfmethode und -prozesse, welche die hohen zukünftigen Emissionsanforderungen nach IMO TIER III erfüllen müssen und das Potenzial für eine weitere Reduzierung der Emissionen bei verbesserter Wirtschaftlichkeit des Schiffsbetriebes besitzen.

Im Einzelnen werden die durch umformtechnische Prozessketten hergestellten Motorkomponenten möglichst endkonturennah gefertigt. Bei der konstruktiven Gestaltung und bauteilspezifischen Auslegung können den Motorkomponenten partiell definierte Eigenschaften zugeordnet werden, die auf eine Reduzierung des Beanspruchungsniveaus und eine damit verbundene Verlängerung der Lebensdauer hinwirken.

Angestrebt werden Werkstoffverbunde aus niedrig legierten Stählen, kombiniert mit Hochtemperaturlegierungen für speziell hochbeanspruchte Bereiche an Kolben- bzw. Ventilen.

Diese Art der Werkstoffverteilung entspricht einer belastungsgerechten Anpassung der Bauteiloberfläche an den differenzierten Wärmeeintrag aus dem Verbrennungsprozess. Der Einsatz von Sonderlegierungen kann dabei speziell angepasst und minimiert werden. Diese Ergebnisse sollen dann ebenfalls auf andere brennraumnahe Bauteile, wie Kompressionsring, Laufbuchse, Ventilsitzring und Zylinderkopf übertragen werden, um einen wärmedichteren Brennraum zu schaffen.

Daraus erschließt sich für Großmotoren für den maritimen Bereich eine signifikante Verbesserung des Wirkungsgrades und der damit einhergehenden Kraftstoffökonomie sowie die Verlängerung der Lebensdauer von besonders hochbelasteten Bauteilen.

Das wissenschaftlich-technische Risiko besteht vorrangig in dem Neuheitsgrad und im grundlegenden Charakter der geplanten gemeinsamen Forschungsaktivitäten.

Stahlwerkstoff und verschiedene hochwarmfeste Werkstoffe sind somit nicht grundlegend erforscht und bilden damit ein großes Risikopotenzial.

Die Herstellung und der Einsatz von reibgeschweißten hybriden Werkstoffverbunden für Großmotorenkomponenten sind prinzipiell neu.

Die Erarbeitung geeigneter Simulationsmodelle und die damit verbundene Anpassung vorhandener Softwarelösungen bzw. -verfahren für den Umformvorgang stellt dabei eine deutliche Grauzone dar, die durch entsprechende Forschungsaktivitäten untersetzt wurde.

### Arbeitsteilung der Projektpartner am Gesamtprojekt

#### Arbeitsschwerpunkt 1

Gesensschmiede Schneider GmbH Aalen

Entwicklung von Werkstoffen und Hybridbauteilen für Kolben und Ventile in thermisch hochbelasteten Schiffsmotoren

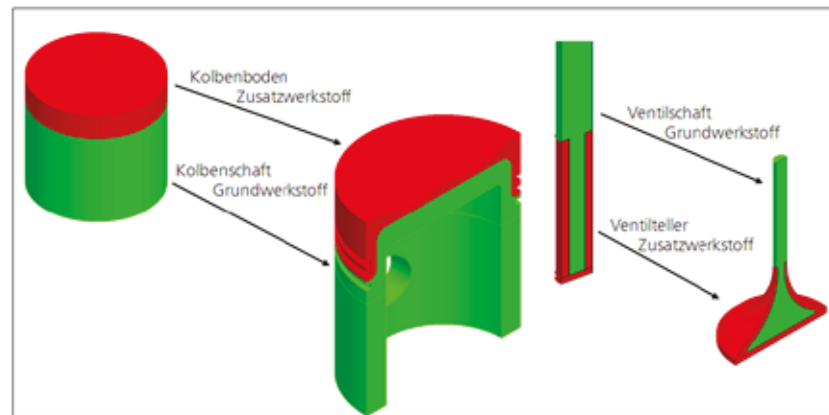


Abbildung 1: Werkstoffverbund - Demonstratorbauteile

Die Gesensschmiede Schneider GmbH ist ein wichtiger Zulieferer für den Bereich Großmotoren im internationalen Markt.

Mit ihren 450 Mitarbeitern und ihrer 125-jährigen Tradition des Schmiedens ist er ein geschätzter Lieferant für Kunden der maritimen Industrie (MTU, MAN, CAT, L'ORANGE, Wärtsilä).

### Entwicklung eines neuartigen, hochtemperaturbelastbaren Werkstoff MCG 3

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von mechanisch und thermisch hochbelastbaren Bauteilkomponenten, z.B. Kolben und Ventile. Diese sollen umformtechnisch herstellbar sein. Es wurde der Stahl mit dem Markennamen MCG 3 entwickelt.

Bei Einsatztemperaturen größer 500 °C bis ca. 650 °C kann dieser Werkstoff die geforderten thermomechanischen Eigenschaften, sowie die Anforderungen an die Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit garantieren.

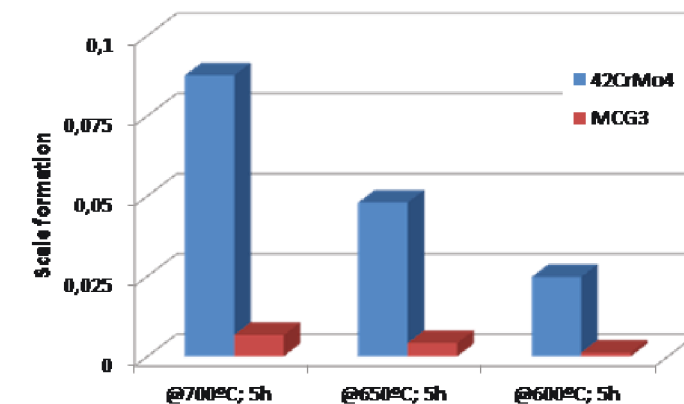
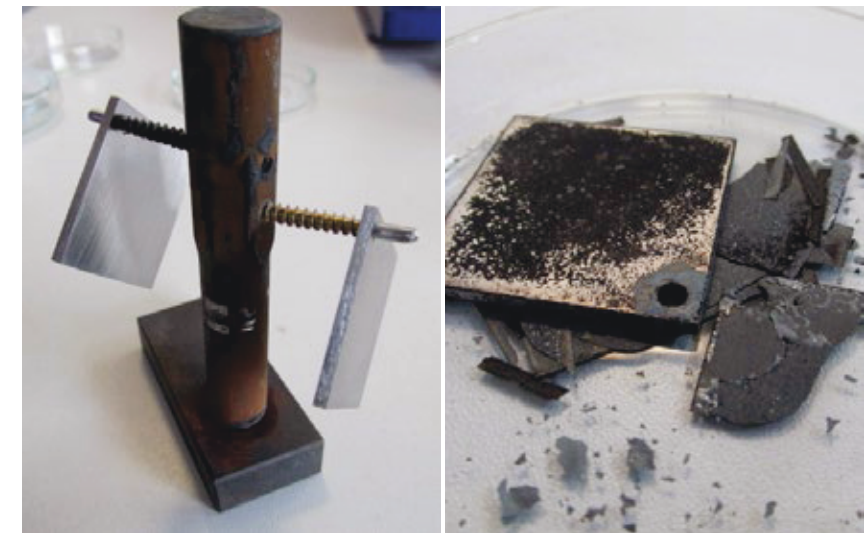


Abbildung 2: Vergleich der Oxidationsbeständigkeit von Proben 42CrMo4 und MCG3

Der Innovationscharakter liegt im Ferrosilizium, welches dem 42CrMo4 mit 3% zu legiert, wird und dem Stahl seine neuen verbesserten Eigenschaften gibt.

Grade	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Cu Al Ti		Nb	N					
MCG3	0,40	0,70	2,00	-	-	0,90	-	0,15
- - -	-	-						
	0,43	0,85	3,00	0,015	0,030	1,15	0,25	0,25
	0,030	0,020	0,040	0,0100				

Tabelle 1: chemische Zusammensetzung MCG3

Es kann festgestellt werden, daß der Werkstoff MCG3 mindestens genau so gute und bessere mechanische, statische und dynamische Eigenschaften im Vergleich zum Vergütungsstahl 42CrMo4 aufweist. So fällt z. B. die Zug-Druck-Wechsel- festigkeit erst bei Temperaturen größer 400 °C merklich ab.



Abbildung 3: Finales Design mit druckfestem Gehäuse, eingebauter Platine, Sensor, Flanschanschlüssen und Subsea-Steckverbinder.

Mit diesem Werkstoff ist es nun möglich, hochtemperaturbeständige, oxidationsbeständige und druckfeste Motorkolben zu schmieden, die für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> reduzierte Motoren z.B. im Schiffbau erforderlich sind.

MCG3 ist gut schmiedbar und lässt sich über das Reibschweißverfahren auch mit anderen Stahlsorten verbinden.

Dauerstandeigenschaften wie Umlaufbiegewechselfestigkeit und Zug-Druck- Wechselfestigkeit sind auch bei erhöhten Temperaturen im Vergleich zum 42CrMo4 deutlich erhöht.

MCG3 erzeugt 10 - 20-mal weniger Zunder als 42CrMo4 bei Kolbenbetriebstemperaturen. MCG3-Kolben können unbeschadet 100 °C höher bei Betriebstemperaturen arbeiten als Kolben aus 42CrMo4 Emissionen, wie Feinstaub, Stickoxide und CO<sub>2</sub> werden reduziert und somit trägt MCG3 zur nachhaltigen Umweltschonung und -erhaltung bei.

Darüber hinaus ist MCG3-Stahl schmiedbar und schweißbar durch Reibungsschweißung, was für heutige industrielle Fertigungsprozesse von Schmiedekolben zu vernünftigen Kosten geeignet macht.

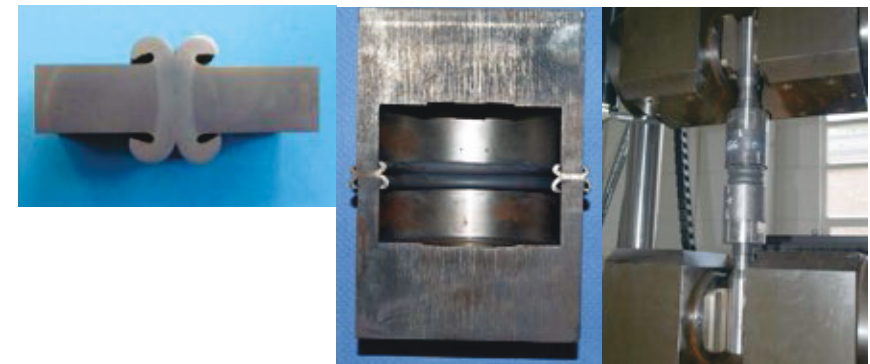


Abbildung 4 : Reibschweißverbindung MCG3 mit MCG3 mit Demonstrator- teil

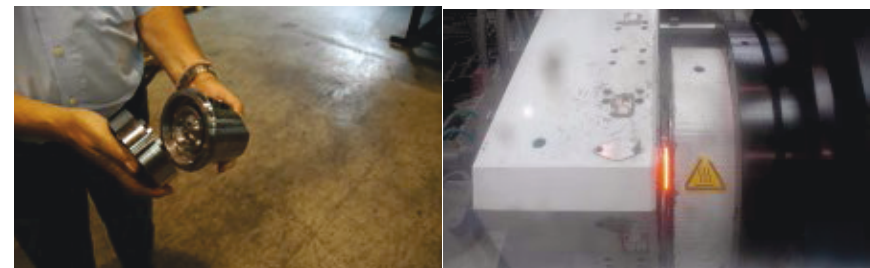


Abbildung 5: Reibschweißteile, Oberteil MCG3 und Unterteil MCG3 Reib- schweißung auf Schwungradreibschweißmaschine bei GSA

Als Werkstoffkombinationen kamen die Varianten MCG3 mit MCG3, MCG3 mit EN-GJS-700, MCG3 mit 38MnVS6, 42CrMo4 mit EN-GJS-700 und EN-GJS-700 mit EN-GJS-700 zur Anwendung

Bei den Werkstoffkombinationen bringt MCG3 mit MCG3 die höchsten Belastungswerte, an der Kombination MCG3 mit 38MnVS6 liegen die ermittelten Werte nur geringfügig darunter. Ein deutlicher Abfall der Festigkeitswerte ergibt sich mit der Kombinationen MCG3 bzw. 42CrMo4 mit EN-GJS 700. Den geringsten Festigkeitswert zeigt die Kombination EN-GJS-700 mit EN-GJS-700.

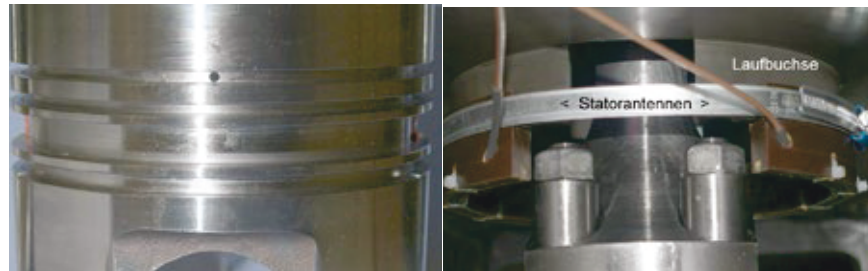


Abbildung 6: Kolben aus MCG3 im Prüfmotor im WTZ

Mit Hilfe der Motorenversuche konnten die theoretischen Berechnungen verifiziert werden und der Nachweis der Einsatzfähigkeit von reibgeschweißten Kolben dieser Größenordnung und des neuen Werkstoffes MCG3 bewiesen werden

Einsatzgebiete sind Motorenkomponenten für Schiffe, PKW und LKW, Pumpen, Leichtbau bei Bauteilen mit Temperatur- und Korrosionsbelastung.

### Herstellung eines explosivaufgepanzerten, umgeformten Ventils für Großmotoren

Ventile mit Aufpanzerung im korrosions- und temperaturbelasteten Bereich sollen durch den Einsatz von speziellen Werkstoffverbunden aus Hochtemperaturlegierungen mit klassischen Kolben- bzw. Ventil-Stahlwerkstoffen umformtechnisch herstellbar sein. Bei Einsatztemperaturen größer 500 °C bis ca. 650 °C können diese Werkstoffverbunde die geforderten thermomechanischen Eigenschaften sowie die Anforderungen an die Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit garantieren.

Dabei wird die kinetische Energie beschleunigter Körper beim Zusammenstoß mit dem Grundkörper zum Plattieren ausgenutzt. Das Auflageblech bzw. -rohr wird mit Sprengstoff belegt und im kleinen Abstand zum Grundkörper

positioniert. Nach dem Einleiten der Initialzündung detoniert der Sprengstoff, eine Detonationsfront bewegt sich längs über den Auflagekörper. Mit hoher Geschwindigkeit kollidiert der Auflagekörper mit dem Grundkörper und bewirkt eine feste stoff- oder formschlüssige Materialverbindung auf atomarer Ebene. Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes der Metalle werden lokal und kurzzeitig erzeugt. In der Berührungzone der Werkstoffe setzt ein kurzzeitiges Fließen ein, um dem Detonationsdruck auszuweichen. Somit kommt es prozessbedingt in Detonationsrichtung zu einem wechselseitigen Aufstauen und Ineinanderschieben grenznaher Schichten, wobei idealerweise eine turbulente Bindezone mit wellenförmigem Profil in der Bindungszone entsteht.

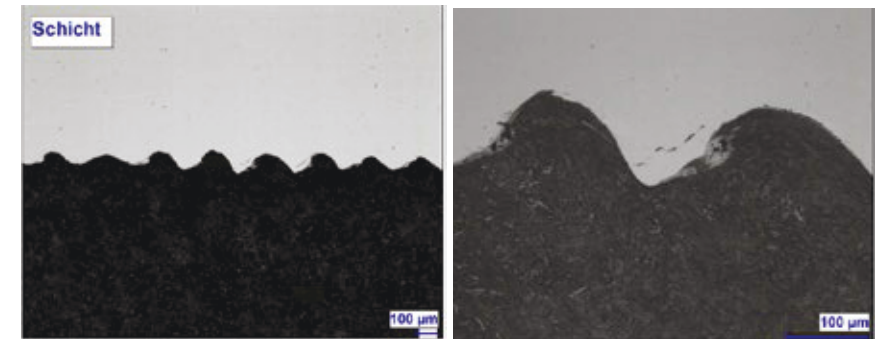


Abbildung 7: Turbulente Ausbildung der Bindezone einer Explosionsplattierung

Der Vorteil des Sprengplattierens gegenüber dem thermischen Fügen liegt darin, dass die Bindung aufgrund der kinetischen Energie erfolgt und somit keine intermetallischen Phasen entstehen, welche ein zu meist unter Belastung sehr sprödes Verhalten aufweisen. Es können nahezu alle Metallwerkstoffe miteinander gefügt werden. Die einzige Voraussetzung ist eine ausreichende Duktilität des Auflagematerials bei der Detonation.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten gemeinsam auf dem BAM-Versuchsgelände in Baruth



Abbildung 8: Testgelände der BAM in Baruth



Abbildung 9: Versuchsaufbau, präpariert zum Explosivplattieren von rohrförmigen Bauteilen



Es wurden verschiedenste Parameter variiert. Der Versuchswerkstoff reagierte unter Schockbelastung mit dem gelatinösen Sprengstoff Riodin HE (Hersteller: maxam Deutschland GmbH) gegenüber dem pulverförmigen Sprengstoff Amonita 2I unterschiedlich. Beste Ergebnisse wurden mit dem Sprengstoff Amonita 2I erreicht, da für das Ausbilden einer stabilen turbulenten Strömung zwischen den Plattierpartnern die hohe Konstanz der Detonationsgeschwindigkeit entscheidend beiträgt.

Professionelle Betreuung durch fachkundige BAM-Mitarbeiter und beste Bedingungen bei höchstem Sicherheitsstandard auf dem BAM-Testgelände gewährleisteten die erfolgreichen Versuchsdurchführungen. Der Versuchsstand gestattete wetterunabhängiges Arbeiten und der Versuchsaufbau erwies sich als optimal für diese Plattierungen und ist geeignet für das Erzielen gerader Proben großer Länge.



Abbildung 10: Explosivplattierter Grundkörper für ein Schiffsdieselmotor-Ventil

Im Ergebnis konnten Ventilgrundkörper mit einer Panzerung aus einem speziellen hochwarmfesten Werkstoff hergestellt werden, der noch spanend fertigbearbeitet werden muss.

## Arbeitsschwerpunkt 2

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Entwicklung hybrider Werkstoffverbunde für thermisch hoch belastete Schiffsmotoren,

Das Fraunhofer IWU entwickelte innerhalb des Teilprojektes die gesamte Herstellungstechnologie sowie die dazugehörigen Prozesskettenmodelle zur Umformung hybrider Werkstoffverbunde, beginnend bei der Auswahl geeig-

netter Sonderlegierungen und deren Kombination mit den Grundwerkstoffen. Es wurden dabei verschiedene Fügeverfahren untersucht und beurteilt. Ziel dieser Grundlagenuntersuchungen war es, ein Fügeverfahren zu finden, welches eine qualitativ hochwertige, homogene Verbindung von Grund- und Zusatzwerkstoff unter seriennahen Bedingungen verspricht. Die gefertigten Werkstoffverbunde wurden anschließend in verschiedenen Umformprozessen weiter verarbeitet und zu Bauteilkomponenten, wie beispielsweise Kolbenboden bzw. Ventilen geformt. Dabei rückte die gesamte umformtechnische Prozesskette in den Fokus der Prozessentwicklung. Zu Projektbeginn wurde eine Vielzahl theoretischer Untersuchungen durchgeführt, welche durch numerische Umformsimulationen spezifiziert und schließlich durch praktische Versuchsreihen an skalierten Modellen abgeglichen und verifiziert wurden. Nach den zu erwartenden Iterationsschleifen sollte eine theoretisch und praktisch nachgewiesene fundierte Prozesskette zur umformtechnischen Herstellung von Testkörper- bzw. Musterbauteilen entstehen. Mittels dieser sollten die wesentlichen Herstellungsparameter und Prozessfenster erarbeitet und definiert werden.

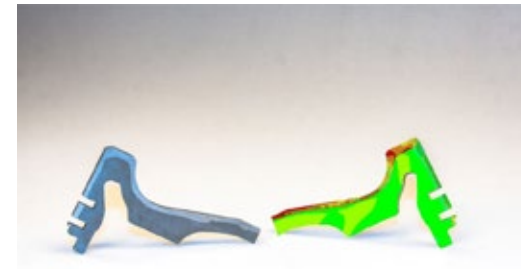


Abbildung 11. Vergleich eines umgeformten Kolbenbodens aus dem Experiment (links) sowie als Ergebnis der numerischen Simulation (rechts)

## Stand der Technik – Hybride Werkstoffverbunde

Für moderne Hochleistungswerkstoffe ist neben Festigkeit und Gewicht besonders die Temperaturbeständigkeit ein Thema, das zunehmend in den Mittelpunkt der Forschung rückt. Um Bauteile für erhöhte Einsatztemperaturen nutzen zu können, liegt der Schwerpunkt vermehrt auf hybriden Werkstoffverbunden auf Basis von Metallen. Die grundlegende Herstellung von Werkstoffverbunden steht aktuell im Zentrum zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Nach derzeitigem Stand der Wissenschaft und Technik haben sich in Folge von diversen Untersuchungen, die Verfahren des Verbundgusses, des Verbundschmiedens und des Schweißens zur Verbundherstellung etabliert. Verbundgießen ist eine Fertigungstechnologie, bei der die

zu verbindenden Werkstoffe entweder auf Grund einer Reaktion zweier flüssiger Phasen, oder durch eine Festkörperreaktion mit einem flüssigen Medium verbunden werden. Vorteil derartiger Systeme ist, dass sie in nur einem Prozessschritt erzeugt werden können. Daneben lassen sich rein metallische Werkstoffverbunde durch Verbundschmieden herstellen. Dies gewährleistet eine form-, stoff- und/oder kraftschlüssige Verbindung der beiden Metalle, die parallel zur bildsamen Formgebung generiert wird. Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft, wodurch es zu einer unlösbaren Verbindung des Grundwerkstoffes unter Einwirken thermischer Energie und eines Zusatzwerkstoffes kommt. Die beiden Werkstoffe werden in einen flüssigen Zustand überführt und bilden nach dem Erstarren eine festhaftende Verbindung.

Die Problematik bei Verbundschmiedevorgängen besteht in den unterschiedlich zu fügenden Werkstoffen und den somit stark voneinander abweichenden Werkstoffeigenschaften. Als größte Herausforderung bei hybriden Verbunden stellten sich die Temperaturen dar. So muss beispielsweise der Mantelwerkstoff auf seine Umformtemperatur gebracht werden, während das Kernmaterial eine gewisse Temperatur nicht übersteigen darf. Feuerhack zeigt durch verschiedene Versuche bezüglich der Umformbarkeit von Al-Mg-Werkstoffverbunden deren großes Potential als Halbzeuge für Warmmassivumformvorgänge. Insbesondere betrachtete er mittels numerischer Modellierungen deren Umformbarkeit, die mit den im Anschluss durchgeführten richtungsabhängigen Stauchversuchen sehr gut korrelierten.

Seitdem die prinzipielle Machbarkeit von Umformvorgängen mit Werkstoffverbunden nachgewiesen werden konnte, wurden zunehmend spezifische Verbunde untersucht. Bezogen auf ihre Einsatzigenschaften rückten Superlegierungen in den Fokus, an denen seit ihrer Einführung großes Interesse an der Erforschung ihrer Eigenschaften besteht.

## Ergebnisse und Diskussion

In umfangreichen Versuchsreihen wurden die Eigenschaften der auf die verschiedenen Weisen hergestellten Verbunde untersucht und bewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Grundlagenversuchen, wurden Demonstratorbauteile hergestellt, welche durch zahlreiche Tests ihre Eignung als Hochleistungsmotorkomponenten nachweisen mussten und auch konnten. Im Einzelnen wurden die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse ermittelt. Eine erste Charakterisierung des Verbundes erfolgte nach dem Auftragschweißen. Sie beinhaltete die Untersuchung mittels GDOES. Es zeigte sich, dass Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung der Nickellegierung René41 nach dem Schweißen in erheblichem Maße entstanden sind.

Diese sind durch die Eigenheiten des PTA-Prozess zu begründen. Bedingt durch die geringe Schichtdicke der aufzubringenden Legierung und der hohen Schweißstromstärke von 170 A kommt es zu einer starken Aufschmelzung des Grundwerkstoffes und zur Durchmischung von dem Grund- und Zusatzwerkstoff. Auf Grund dessen ist beispielsweise der Eisenanteil in der Schicht deutlich höher als im Ausgangspulver. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden die mechanischen Eigenschaften der Schicht in verschiedenen Zuständen ermittelt. Im ersten Schritt wurde dafür der Stauchversuch verwendet. Im geschweißten Zustand (René 41 PTA) lag die Stauchgrenze  $R_{p0,2}$  bei 20 °C bei nur 540 MPa (blau). Durch einen sich anschließenden Umformschritt konnte die Stauchgrenze auf 660 MPa (orange) gesteigert werden. Als noch wirkungsvoller erwies sich eine Wärmebehandlung nach folgendem Regime: Schweißen → Erwärmung auf 1100°C + Halten für 1h → Luftabkühlung → Erwärmen auf 760°C + Halten für 16h → Luftabkühlung. Auf diese Art und Weise konnten die Werte der ermittelten Stauchgrenze auf 740 MPa (grau) angehoben werden. Eine Steigerung dazu stellte die Kombination aus Umformung und Wärmebehandlung dar. Mit 870 MPa (gelb) wurden diesem Teilprojekt untersuchten Nickelbasislegierung ist René 41. Eine Nickelbasislegierung die vor mehr als 55 Jahren entwickelt wurde und im Laufe der Zeit in einer Vielzahl an Arbeiten untersucht wurde. Nach Studium der vorhandenen Literatur zeigte sich, dass auf dem Gebiet der Warmmassivumformung dieser Legierung noch Forschungsbedarf besteht, da verschiedene Problemstellungen nur teilweise oder noch gar nicht betrachtet wurden. Die Kenntnis des Verhaltens von Nickelbasislegierungen als Teil eines Verbundhalbzeuges ist nicht nur von grundlegendem werkstoffwissenschaftlichem Interesse, sondern auch von großer Bedeutung für Hochtemperaturanwendungen. Die Höchstwerte dieser Versuchsreihe erzielt. Um Aussagen zum Werkstoffverhalten unter Bedingungen wie sie am späteren Einsatzort vorliegen treffen zu können, wurden die gleichen Versuche bei 500 °C durchgeführt. Hier wurde die Bedeutung einer effektiven Wärmebehandlung deutlich. Sowohl bei dem geschweißten als auch bei dem geschweißten und geschmiedeten Zustand sinkt die Stauchgrenze ohne entsprechende Wärmebehandlung bei einer Stauchtemperatur von 500 °C deutlich auf 440 MPa bzw. 480 MPa ab. Durch die Wärmebehandlung bleibt das eingestellte Festigkeitsniveau auch bei erhöhten Temperaturen erhalten. Zu begründen ist dies mit der Bildung von temperaturbeständigen Ausscheidungen ( $\gamma'$ ) während des Wärmebehandlungsprozesses. Vergleicht man die Stauchgrenzen vom Grundwerkstoff 42CrMo4 und der Nickelbasislegierung bei 500 °C, wird so der Einsatz der Superlegierung als Deckschicht gerechtfertigt. Inwiefern sich ein Kompromiss aus den verschiedenen Wärmebehandlungen vom Stahl des Grundkörpers und der Nickellegierung auf die Stauchgrenze der Deckschicht auswirkt, wird mit der grünen Säule in Abbildung 2 dargestellt. Mit dem Regime: Lösungsglühen bei 1100°C + Halten für 1h → Luftabkühlung → Austenitisieren bei 840°C + Halten für 1h → Wasserabschreckung → Anlassen bei 550°C +

Halten für 1h → Luftabkühlung, konnte die Stauchgrenze bei 20°C auf 810 MPa bzw. bei 500°C auf 730 MPa angehoben werden. Dass die Wärmebehandlungsparameter für die Nickelbasislegierung nicht ganz optimal waren, zeigte sich in dem leichten Verlust der Warmfestigkeit. Trotzdem liegt diese auf einem sehr hohen Niveau.

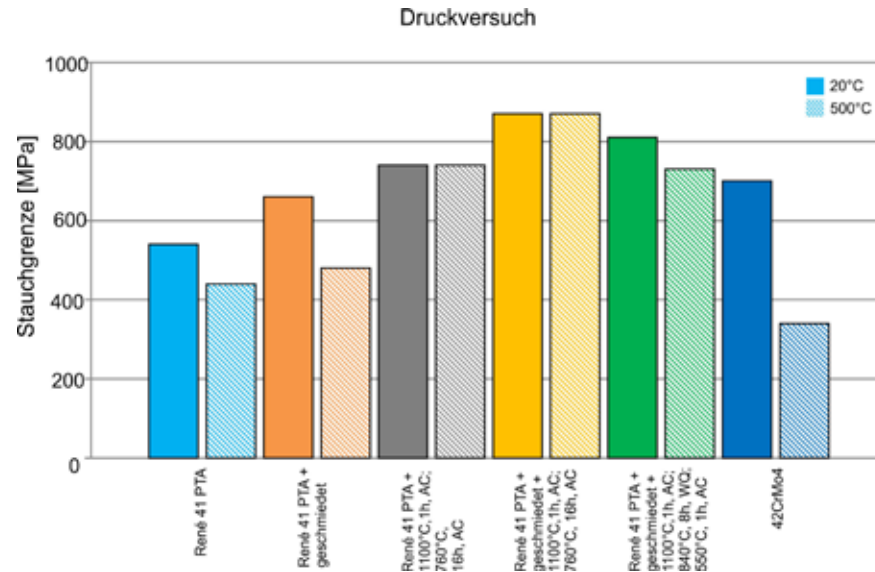


Abbildung 12: Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Stauchgrenze Rp0,2

Dennoch ist es notwendig, auch den Vergütungsschritt des Stahls im Wärmebehandlungsprozess mit zu berücksichtigen, wie sich in den ermittelten Werten der Haftfestigkeit (siehe Abbildung 13) zeigt. Die Haftfestigkeit des Werkstoffverbundes in den verschiedenen Zuständen, analog denen im Stauchversuch, wurde mit Hilfe eines Scherversuchs ermittelt. Nach dem PTA-Schweißen lag die Haftfestigkeit der Deckschicht bei 550 MPa (blau). Durch die Umformung des Verbundes steigt die Haftfestigkeit auf 600 MPa (orange). Die sich anschließende Wärmebehandlung, die für die Nickelbasislegierung optimal wäre, wirkte sich jedoch ungünstig die Haftfestigkeit aus, so dass lediglich Werte von 510 MPa (gelb) ermittelt wurden. Führt man stattdessen das auf den Werkstoffverbund optimierte Wärmebehandlungsregime durch, kann die Haftfestigkeit auf bis zu 720 MPa (grün) gesteigert werden. Die Ursache für die hohe Haftfestigkeit nach dem optimierten Wärmebehandlungsprozess, liegt in der hohen Festigkeit bzw. Härte beider Verbundpartner. Die Härte von René 41 betrug 330 HV10 und die des 42CrMo4 bei 300 HV10. Damit sind dem Verbund gleichermaßen hohe und ähnliche Härtewerte eigen. Führt man das Wärmebehandlungsregime für die Nickelbasislegierung optimal, waren zwar Härten von 352 HV10 erreichbar, jedoch sank

im gleichen Zuge die Härte des Stahls auf 184 HV10, sodass auch der gesamte Verbund an Haftfestigkeit verlor.

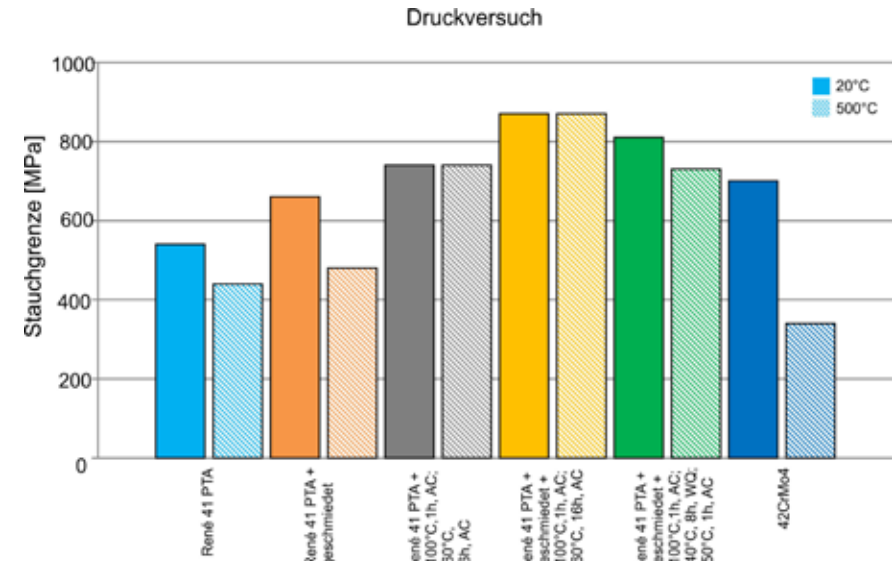


Abbildung 13: Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Haftfestigkeit des Werkstoffverbundes

Der Vergleich des umformend hergestellten Realbauteil, Kolbenboden, mit den Ergebnissen der Umformsimulation wies einen hohen Übereinstimmungsgrad auf (siehe Abbildung 14). In der Wandstärke des Zusatzwerkstoffes sind kaum Abweichungen erkennbar gewesen. Lediglich am unteren Rand traten geringe Differenzen zwischen Realbauteil und Simulation auf. Ist die Zusatzschicht beim Simulationsmodell gleichmäßig über der zylindrischen Mantelfläche verteilt, zeigt sich am realen Bauteil eine Verjüngung der Schichtdicke kurz vor dem unteren Rand. Die Oberflächenqualität der geschmiedeten Kolbenböden war in dem Maße hinreichend gut, dass nach der Zerspanung den Anforderungen genügende Bauteile vorlagen.

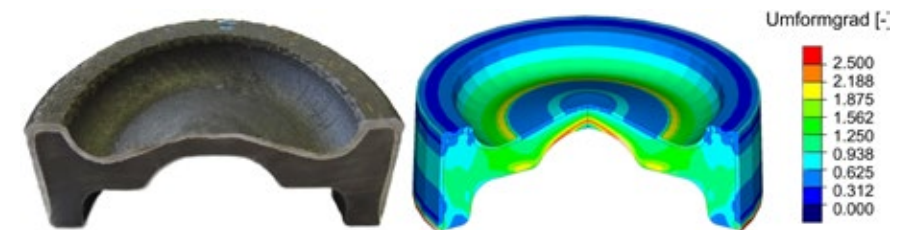


Abbildung 14: Vergleich Realbauteil mit Simulationsmodell

### Arbeitsschwerpunkt 3

MET Motoren- und Energietechnik GmbH

Neue Auslegungs-, Dimensionierungs- Simulationsverfahren und Fertigungstechnologien für Schiffsmotorenkolben mit hybriden Werkstoffkombinationen

Die extremen Zuverlässigkeitsanforderungen und die hohen Betriebsbelastungen haben konstruktiv zu sogenannten gebauten Kolben geführt. Bei dieser Bauweise übernimmt das Kolbenoberteil die Aufgabe, höchste thermische und mechanische Lasten aufzunehmen und besteht deshalb aus hochbelastbarem warmfestem Werkstoff. Das Kolbenunterteil leitet die durch den hohen Gasdruck entstehenden Kräfte vom Kolbenoberteil auf das Triebwerk weiter und erfüllt gleichzeitig die tribologischen Aufgaben im Gleitvorgang in der Zylinderbuchse.

Die Verbindung zwischen Kolbenober- und -unterteil erfolgt bisher über hochfeste Schraubverbindungen. Dieser komplizierte Aufbau erfordert einen hohen Fertigungsaufwand.

Im Projekt wurde untersucht, ob diese komplizierte Bauart durch eine aufwandsminimierte Reibschweißverbindung zwischen Kolbenober- und Unterteil ersetzt werden kann, wie sie bereits bei PKW- und NKW-Kolben realisiert wird.

Es wurde streng beachtet, dass jedes vorhergesagte Ergebnis durch eine experimentelle Prüfung abgesichert wird, bevor der nächste Simulationsschritt erfolgt. Schematisch ist diese effiziente, sichere, zeit- und kostensparende Entwicklungsmethodik dargestellt (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Projektverlauf mit durchgängiger Optimierung und experimenteller Evaluierung

### Reibschweisssimulation

Als wesentliche Ergebnisse liegen erstmalig evaluierte Simulationsmodelle für den Reibschweißvorgang vor, die eine Übertragung auf beliebig andere Reibschweißaufgaben zulassen.

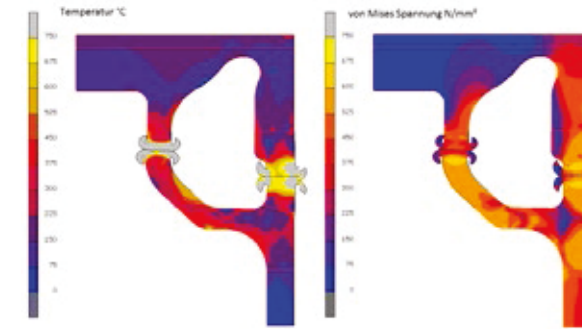


Abbildung 16: Ergebnisse, links: Temperaturfeld nach Reibschweißprozess (Temperatur °C), rechts: Eigenspannungen in kaltem Zustand (von Mises Spannung N/mm<sup>2</sup>)

Das Abbildung 17 zeigt das sich einstellende Temperaturfeld und den resultierenden Eigenspannungszustand in der Nähe der Reibschweißnaht im Querschnitt eines Versuchsteils.

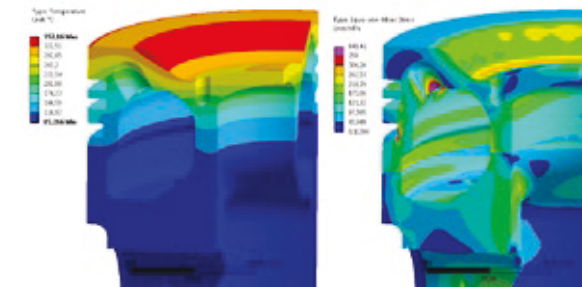


Abbildung 17: Ergebnisse aus Extremlastfall Temperaturfeld + Gaskräfte, links: Temperaturfeld °C, rechts: von Mises Spannung N/mm<sup>2</sup>

Ein wichtiges weiteres Simulationsmodell wurde für die Optimierung der Schweißnahtposition zwischen Kolbenober- und -unterteil entwickelt und erfolgreich evaluiert. Die Ergebnisse der Minimierung der Beanspruchungen sind einem Beispiel in Abbildung 17 zu entnehmen.

## Gusssimulation

Die entwickelte Gusssimulation für das Kolbenunterteil führte bereits im ersten Gießvorgang zu fehlerfreien Gussteilen und untermauerte damit die Treffsicherheit des entwickelten Gusssimulationsmodells und zeigte den Weg für eine deutliche Effizienz- und Qualitätssteigerung in der Gießerei (Siehe Abbildung 18).

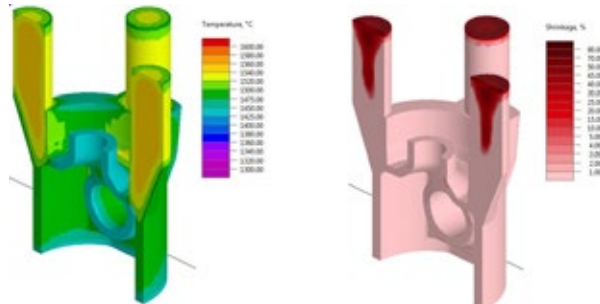


Abbildung 18: Ergebnisse der Gusssimulation für das Kolbenunterteil, links: Temperaturfeld °C nach 30s, rechts: Porositätsrisikozonen

Die simulationsgestützte Entwicklung einer Testeinrichtung für den vorbereiteten Kolben konnte erfolgreich von WTZ Roßlau umgesetzt und damit das Schadensrisiko im Versuchsmotor minimiert werden. Mit der Verknüpfung aller Simulationsmodelle zu einem Technologiedemonstrator für die Entwicklung, Fertigung und Erprobung eines neuartigen reibgeschweißten Leichtbau-Gasmotorenkolbens (siehe Abbildung 19) für den zukünftigen anspruchsvollen Einsatz im Schiffsbetrieb konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.



Abbildung 19: Versuchs- und Demonstrationskolben

Insbesondere konnte gezeigt werden, dass mit der konsequenten Nutzung einer durchgängig simulationsgestützten Entwicklung die Ergebnisrisiken reduziert, die Entwicklungszeiten erheblich verkürzt und die Testphase für simulationsgestützte Produktentwicklungen extrem vereinfacht werden können.

nen. Mit dieser neuartigen effizienten Entwicklungsmethodik konnte am Beispiel des Kolbens überzeugend gezeigt werden, wie ein Technologievorsprung für die europäische maritime Industrie erreicht und damit die Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Industrie gegenüber den starken Mitbewerbern aus Fernost sprunghaft erhöht werden kann.

## Arbeitsschwerpunkt 4

WTZ Roßlau gGmbH

Entwicklung von Prüfverfahren und -vorschriften zur Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses von Schiffsmotorenkomponenten aus hybriden Werkstoffen

## Grundlagenuntersuchungen an verschiedenen Werkstoffen

Der in der WTZ Roßlau gGmbH untersuchte Teilbereich befasst sich mit der Werkstoffauswahl und der Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften. Neben den klassischen Werkstoffen für Großkolben, wie dem Vergütungsstahl 42CrMo4, dem AFP-Stahl 38MnVS6 und dem Kugelgraphitguss EN-GJS-700 wurde ein neuer Werkstoff in die Untersuchungen einbezogen. Bei dem neuen Werkstoff handelt es sich um einen modifizierten Vergütungsstahl auf Basis von 42CrMo4, dessen Eigenschaften durch verschiedene Legierungselemente besonders in Richtung Schmedeeigenschaften und Warmfestigkeitsverhalten beeinflusst wurden. Der Werkstoff trägt die Kurzbezeichnung MCG3.

Die Dauerfestigkeitswerte, insbesondere für den MCG3, wurden mittels Treppenstufen-Verfahren bestimmt. Hierbei wurden verschiedene Proben aus dem Rohmaterial auf unterschiedlichen Spannungsniveaus geprüft und somit der Dauerfestigkeitsbereich eingegrenzt. Je nach Probenbruch wird der Spannungshorizont erhöht oder gesenkt. Zusätzlich erfolgten Prüfungen im Zeitfestigkeitsbereich, wo ebenfalls auf unterschiedlichen Spannungsniveaus Proben geprüft wurden. Diese Werte gingen direkt in die Erstellung der Wöhlerkurven ein (Spannungsniveau aufgetragen gegenüber den erreichten Lastwechselzahlen). Abbildung 20 gibt eine Wöhlerkurve für den Werkstoff MCG3 für eine Zug- und Druckwechselfestigkeitsbeanspruchung bei 20 °C wieder.

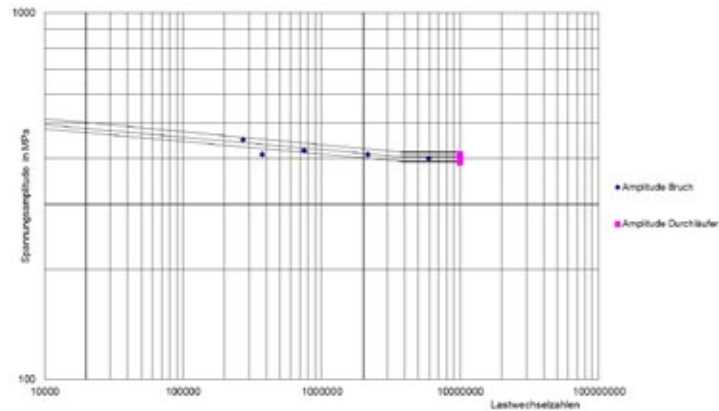


Abbildung 20: Wöhlerkurve für den Werkstoff MCG3 für eine Zug-Druck-Wechselfestigkeitsbeanspruchung

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Werkstoff MCG3 mindestens genau so gute und bessere mechanische, statische und dynamische Eigenschaften im Vergleich zum Vergütungsstahl 42CrMo4 aufweist. So zum Beispiel fällt die Zug-Druck-Wechselfestigkeit erst bei Temperaturen größer 400 °C merklich ab. Zusätzlich erfolgten Untersuchungen an Werkstoffkombinationen, wobei es um den Einfluss von Beschichtungsmaterialien auf das Verhalten von Kolbenwerkstoffen bezüglich Biegeeigenschaften ging. Hierbei wurden NIMONIC-Panzerungen auf dem Kolbenwerkstoff 42CrMo4 bezüglich Biegebeanspruchung untersucht.

### Werkstoffuntersuchungen im reibgeschweißten Zustand

Die Ergebnisse aus Abschnitt 1 wurden aufgegriffen und zusätzliche Untersuchungen an dem Werkstoff MCG3 im reibgeschweißten Zustand durchgeführt. Hier stellten sich an aus dem Vollmaterial entnommenen Rundproben ähnliche dynamische Festigkeitswerte (Zug-Druck-Wechselfestigkeit und Biege-wechselfestigkeit) wie bei nicht reibgeschweißten Proben ein. Dies lässt auf eine sehr gute Reibschweißreignung des MCG3 schließen. An geplanten reibgeschweißten Kolben gibt es auf Grund der Fertigungs- und Reibschweißgeometrie Bereiche, welche sich nach dem Reibschweißen nicht bearbeiten lassen (Shakerbereich im Innenraum). Aus diesem Grund wurden weitere Untersuchungen bezüglich des Oberflächeneinflusses der fertigungsbedingten Wulst durchgeführt. Hierzu erfolgte eine Probenentnahme aus Reibschweißhülsen, wobei die Reibschweißwulst für die dynamischen Zug-Druck-Wechselfestigkeitsprüfungen nicht abgearbeitet wurde. Auf Abbildung 21 ist eine entsprechende Probe dargestellt. Die Probengeometrie ließ auf dem Hochfrequenzpulsator nur eine Prüfung der Zug-Schwellfestigkeit zu. Die Prüfergebnisse konnten nur näherungsweise in Zug-Druck-Wechsel-

festigkeitswerte umgerechnet werden. Für die Zug-Druck-Wechselfestigkeit ergibt sich ein Wert von ca. 122 MPa, was einem Festigkeitsabfall gegenüber den vorher ermittelten Werten an Rundproben (ca. 400 MPa) von rund 70 % bedeutet.



Abbildung 21: Reibschweißprobe mit Wulst

Zur Ermittlung genauerer Dauerfestigkeitswerte für die Zug-Druck-Wechselfestigkeit wurde eine neue Prüfmethode entwickelt. Hierbei wurden Rundmaterialien verschiedener Werkstoffkombinationen durch Reibschweißung verbunden und entsprechend Einsatzbedingungen im Kolben einseitig abgedreht (Innenseite) und einseitig mit Reibschweißwulst (Außenseite) auf einer servohydraulischen Prüfmaschine geprüft. Abbildung 22 gibt den schematischen Versuchsaufbau wieder.

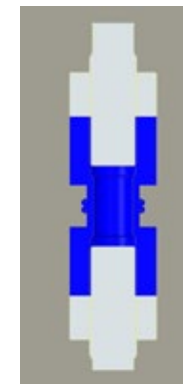


Abbildung 22: Schematischer Versuchsaufbau (Schnittdarstellung),

Als Werkstoffkombinationen kamen die Varianten MCG3 mit MCG3,

MCG3 mit EN-GJS-700, MCG3 mit 38MnVS6, 42CrMo4 mit EN-GJS-700 und EN-GJS-700 mit EN-GJS-700 zur Anwendung.

Bei den Werkstoffkombinationen bringt die Kombination MCG3 mit MCG 3 die höchsten Belastungswerte, an der Kombination MCG3 mit 38MnVS6 liegen die ermittelten Werte nur geringfügig darunter. Einen deutlichen Abfall der Festigkeitswerte ergibt sich mit der Kombination MCG3 bzw. 42CrMo4 mit EN-GJS-700. Die geringsten Festigkeitswerte zeigt die Kombination EN-GJS-700 mit ENGJS-700.

## Simulationen von Kolbenbelastungen an Pulsatorenprüfständen

Für die Pulsatorenversuche und für die Motorenversuche wurden zwei Varianten reibgeschweißte Kolben mit einem Durchmesser von 160 mm gefertigt. Die Kolbenvariante 1 (Kolbenkonstruktion entsprechend Einsatz mit Diesel-/Schwerölkraftstoff) bestand aus der Werkstoffkombination MCG3 als Kolbenober- und -unterteil. Da es sich um erste Versuche mit reibgeschweißten Kolben dieser Größenordnung handelt, wurden diese Kombinationen gewählt, um die thermischen Spannungen zwischen Oberteil und Unterteil möglichst gering zu halten. Die Kolbenvariante 2 (Kolbenkonstruktion entsprechend Einsatz für Gasbetrieb) bestand aus der Kombination MCG3 als Kolbenoberteil und einem austenitischen Stahlgusswerkstoff für das Kolbenunterteil. Der gewählte austenitische Gusswerkstoff weist einen ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie der MCG3 auf, sodass die Thermospannungen zwischen Kolbenoberteil und Unterteil möglichst gering gehalten werden. Auf dem Hochfrequenzpulsator und auf der servohydraulischen Prüfmaschine wurden die Zündkraftbelastung, die Massenkraftbelastung und Biegekraftbelastung (in Folge der Kolbensekundärbewegung) simuliert.

## Motorenversuche an zwei Varianten Kolben am Forschungsmotor FM16

Nach Übernahme aller Prüfergebnisse in die Berechnung und konkrete Auslegung und Fertigung der Versuchskolben wurden zwei Varianten Kolben im Forschungsmotor FM16 mit Dehnungsmessstreifen und Thermoelementen bestückt und im geschleppten und im befeuerten Betrieb eingesetzt. Der Forschungsmotor FM16 hat eine Nennleistung von 96 kW, eine Nenndrehzahl von 1200 min<sup>-1</sup> bei einem Kolbendurchmesser von 160 mm und einem Hub von 240 mm. Die Versuche an den beiden Kolben wurden bei Drehzahlen von 500 bis 1000 min<sup>-1</sup> und verschiedenen Lasten durchgeführt.

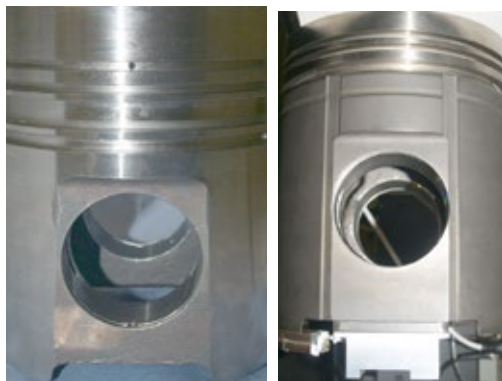


Abbildung 23: linke Seite: Kolben Variante 1 (Diesel- und Schwerölbetrieb), rechte Seite: Kolben Variante 2 (Gasbetrieb)

Mit Hilfe der Motorenversuche konnten die theoretischen Berechnungen verifiziert werden und der Nachweis der Einsatzfähigkeit von reibgeschweißten Kolben dieser Größenordnung und des neuen Werkstoffes MCG3 nachgewiesen werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Kernthema des Teilprojekts bestand in der Entwicklung dynamisch und thermisch hochbelastbarer Motorbauteile durch den Einsatz spezieller, hybrider Werkstoffverbunde, die den Anforderungen künftiger Großmotorengenerationen gerecht werden, wobei ökologische Belange im Vordergrund standen. In Auswertung der bisherigen Untersuchungen kann die Aussage getroffen werden, dass hybride Verbunde, bei Beachtung aller technologischen Prozessparameter beim Auftragsschweißen, der Erwärmungsstrategie vor der Umformung, beim Schmiedeprozess selbst und der definierten Wärmenachbehandlung, entsprechend dem zukünftigen Anforderungsprofil für Bauteile in schwerölbetriebenen Großmotoren herstellbar sind. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Simulationen ein vielseitiges Werkzeug zur grundlegenden Analyse der Verhältnisse im Verbund darstellen. So lassen sich Stellen kritischer Beanspruchung und Belastungen bestimmen und mögliche Versagensbereiche identifizieren. Mit Hilfe der Simulationssoftware konnten geeignete Strategien entwickelt werden, um den Umformprozess von hybriden Werkstoffverbunden realitätsnah abbilden zu können. So können beispielsweise Aussagen der bekannten Werkstoffe und dem neu entwickelten Werkstoff MCG3 über das Fließverhalten und der erzielten Umformgrade punktspezifisch getroffen werden. Die erfolgten Experimente korrelieren mit den Aussagen der Simulationen. Folglich kann durch eine numerische Abbildung des Prozesses bereits in der frühen Phase der Produktplanung und -entwicklung, eine gesicherte Aussage über den Prozessverlauf und die zu erwartenden Eigenschaften des Verbundbauteils getroffen werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde das Demonstratorbauteil, der Kolbenboden mit dem Kolbenhemd gefügt und fertigbearbeitet. Der Kolben wurde bezüglich seiner Temperaturwechselfestigkeit und in Langzeitversuchen auf verschiedenen Motoren- und Korrosionsprüfständen unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen getestet.

## Danksagung

Das Projektteam des „INKOV – Projekts bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und beim Projektträger Jülich für die Förderung des Vorhabens mit dem FKZ: 03SX364.

## SchiV 3.0 - Schiffssicherheit, Vermessung und Logistik

Förderkennzeichen: FKZ: 03SX352

Michael Moskopp, Matthias Breyer, VOMATEC;  
Frank Hartmann, Prof. Dr. Wilhelm Stork, KIT  
Ralph Zimmermann, André Schreiber, Frank Norda, MEYER WERFT

Projektkonsortium  
MEYER WERFT GmbH und Co. KG  
Institut der Technik für Informationsverarbeitung (ITIV)  
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
VOMATEC Innovations GmbH

Integriertes Indoor-Lokalisierungs- und Informationssystem zur Unterstützung der Arbeitsprozesse im Bau befindlicher Schiffe

### Einleitung

In einem immer ernsthafter zu führenden, globalen Konkurrenzkampf im Kreuzfahrtschiffbau, können deutsche Werften ihren Standortnachteil durch, z.B. hohe Lohnkosten, nur durch die stetige Erhöhung ihrer Produktivität ausgleichen. Hierbei darf die Sicherheit während des Baus der Schiffe auch nicht außer Acht gelassen werden.

Die Entwicklungen auf den Forschungsthemengebieten der IoT und Industrie 4.0 eröffnen dabei neue Möglichkeiten Bauprozesse und baubegleitende Prozesse (z.B. in der Planung oder Nachverfolgung) zu unterstützen. Die Generierung von Ortsinformationen durch Indoor-Lokalisierung stellt dabei ein Forschungsgebiet dar und ermöglicht die Steigerung von Effizienz und Effektivität in Geschäftsprozessen durch die Erweiterung um Ortsbezüge. Durch das Einbeziehen dieser neuen Technologien und den gezielten Einsatz ICT-basierter Werkzeuge für den Produktionsprozess, lässt sich die Produktivität von Werften erhöhen. Besonders in schiffbaulichen Aufgaben bei denen ortsbezogene Informationen erhoben oder verarbeitet werden, lassen sich hohe Produktivitätssteigerungen durch den Einsatz von ICT erzielen.

Im Projekt SchiV3.0 wurden insbesondere die für die Produktion nötigen Supportprozesse, die Intralogistik, sowie Absicherung und Vermessung eines im Bau befindlichen Schiffes, mit Hilfe eines softwarebasierten Informationssystems auf Basis ortsbezogener Dienste im Schiffsinnen optimiert.



## Optimierungspotential von Produktionssupportprozessen

Das Projekt SchiV 3.0 hatte die Erforschung eines integrierten Indoor-Lokalisierungs- und Informationssystems zur Unterstützung von ortsbezogenen Prozessen zum Ziel. Dabei wurde die Umsetzung dieses Indoor-Lokalisierungs- und Informationssystems unter Einsatz von Mobilien Endgeräten betrachtet.

Die mit einem mobilen Endgerät ausgestatteten Sicherheitsmitarbeiter können während ihres Rundgangs entdeckte Mängel und potentielle Unfallursachen unmittelbar im Informationssystem erfassen. Die so erhobenen Berichte werden automatisch mit Ortsinformationen versehen, wobei eine manuelle Ergänzung oder Korrektur möglich bleibt. Die so erfassten Hinweise werden automatisch oder teilautomatisch an die zuständigen Stellen weitergegeben. Mit Hilfe des elektronisch abgebildeten Workflows werden Berichte mit Eingabegeräten, wie z. B. Smartphones oder Tablet PCs online erstellt. Der Ist-Zustand liegt z. B. bei einem Schichtwechsel automatisch in Echtzeit vor und kann für die weitere Überwachung genutzt werden.

Im Bereich der Vermessung können durch das Informationssystem die Verwaltung und Pflege der Messdaten wesentlich vereinfacht werden. Besonders im Hinblick auf die Wiederfindung und Fortführung der Lebenszeitdokumentation eines Schiffes ist dieser Umstand interessant. Kameras, Laserscanner und andere Vermessungsgeräte können über existierende, standardisierte Schnittstellen an das Lokalisierungssystem angebunden werden, um Ortsinformationen und Meßergebnisse zusammenzuführen.

Für die Logistikprozesse ergeben sich ebenfalls signifikante Verbesserungen. Durch die optimierte Wegfindung werden Transportvorgänge vereinfacht. Das System unterstützt auch die Dokumentation der Warenflüsse beispielsweise durch die Möglichkeit ortsannotierter Fotos der bereitgestellten und unbeschädigten Materialien.

### Problemstellung

Problemstellungen/ offene Fragestellungen die das Projekt untersucht und beantwortet hat:

- Welche Prozesse können mit einer automatisierten Ortsreferenzierung unterstützt werden (Prozessanalyse)?
- Wie sieht eine digitale Prozessunterstützung mit mobilen Endgeräten aus?

- Welche Anforderungen ergeben sich bzgl. Usability von mobilen Applikationen?
- Wie kann ein Echtzeit Informationssystem für diese Prozesse realisiert werden?
- Welche Beeinträchtigungen gibt es für ein Kommunikationssystem unter den erschwerten Bedingungen und ungünstigen Geometrien im Schiffbau?
- Wie muss ein Lokalisierungssystem konzipiert werden unter den Rahmenbedingungen einer dynamischen, industriellen Umgebung?
- Welche minimale Infrastruktur ist für ein Kommunikations- und Lokalisierungssystem nötig?
- Wie kommt die Koordinate in den Block, bzw. das Schiff?

Zur Untersuchung dieser Problemstellungen wurden Forschungsarbeiten im Besonderen im Bereich der Prozessanalyse, dem effektiven Einsatz von mobilen Endgeräten, Koordinaten und Referenzpunkterzeugung, dem Verhalten von Kommunikations- und Lokalisierungslösungen in drahtlosen Sensornetzwerken, sowie zu der Kommunikation und Lokalisierung in einem dynamischem und stark metallischen Produktionsumfeld geleistet. Auch neue innovative Möglichkeiten der Datenhaltung, -verarbeitung und -visualisierung wurden erforscht.

### Grundlagen und Ziel von SchiV3.0

Die Kreuzfahrtschiffe der MEYER WERFT werden nach dem „Blockbau-Prinzip“ gefertigt. Das bedeutet, es werden zunächst kleinere Teile gefertigt, welche daraufhin zu immer größeren Einheiten zusammengesetzt werden. Zu Beginn werden im MEYER WERFT Laserzentrum einzelne Stahlplatten an einer Plasmabrennanlage zugeschnitten und verschweißt. Durch die Versteifung der Platten mit Profilen und Unterzügen entstehen die sogenannten Paneele. Die Paneele werden daraufhin mit Wänden ausgestattet und so zu Sektionen verarbeitet, welche nun unter anderem mit Kabelbahnen und Rohrleitungen vorausgerüstet werden. Die Sektionen haben auf der MEYER WERFT eine Länge von bis zu 30 Metern und ihre Breite entspricht meistens der halben Schiffsbreite bzw. maximal 30 Meter. Im Blockbau direkt neben dem Baudock – auf der sogenannten Zulage – werden ungefähr acht bis zehn Sektionen zu je einem Block zusammengebaut und weiter ausgerüstet. Die verschiedenen Blöcke werden schließlich in das Baudock gehoben, dort

miteinander verschweißt und ihre Schnittstellen abgearbeitet. Aus ungefähr 90 Blöcken, die jeweils bis zu 800 Tonnen wiegen können, entsteht auf diese Weise ein Kreuzfahrtschiff.

Ziel des Projekts SchiV 3.0 ist die gesamtheitliche Untersuchung und Umsetzung eines Lokalisierungs- und Informationssystems, das eine Personenlokalisierung und Informationsübermittlung auch unter diesen erschwerten Bedingungen und ungünstigen Geometrien im Schiffbau erlaubt. Konzeptionsziel war hierbei stets die Ergänzung von üblicherweise in der Bauphase vorhandenen Infrastrukturprozessen, wobei ein Lokalisierungs- und Informationssystem für eine effektive Unterstützung von ortsbezogenen Prozessen den Großteil der Bauphase des Schiffs abdecken muss.

## Ansätze und Projektverlauf

### Referenzpunktsystem

Als Grundlage für jegliche Lokalisierung wird zunächst ein Bezug in der realen Umgebung benötigt. Zu diesem Zweck wurde vom Fachbereich Vermessung im Rahmen des Projektes ein Referenzpunktsystem entwickelt, welches bereits in der Sektionsfertigung eingebracht werden kann.

Zur Vermarkung der Referenzpunkte wurden selbstklebende Zentrierringe für die Aufnahme von Zielzeichen, o.ä. entwickelt. Die Zentrierringe werden bereits in der Sektionsfertigung an der Oberseite von bestimmten bodennahen Bauteilen angebracht. Nach dem Wenden der Sektion an der Wendestation im Laserzentrum befinden sich die Bauteile hingegen an der Decke und wären damit deutlich aufwändiger (über Kopf) zu vermarken. Durch die Anbringung der Zentrierringe auf diesen Bauteilen ist sichergestellt, dass die Positionen über einen relativ lange Zeitraum im schiffbaulichen Prozess erhalten bleiben. Erst bei der Einbringung der Decke werden diese verdeckt und sind daraufhin nicht mehr nutzbar. Um die Einmessung mit verschiedenen Messinstrumenten zu ermöglichen, wurden unterschiedliche Zielzeichen aus der Vermessung mit entsprechenden Magnetadaptern ausgestattet, so dass diese passgenau in den Zentrierringen positioniert werden können. Die Entwicklung dieses Prozesses hat relativ viel Zeit in Anspruch genommen, da zunächst eine Vermarkung mit verschiedenen Anschweiß- und Klebebolzen untersucht und getestet wurde, was unter anderem zu arbeitssicherheitstechnischen Problemen geführt hat.

Im nächsten Schritt müssen den Referenzpunktpositionen die entsprechenden numerischen Schiffskoordinaten (XYZ) zugeordnet werden. In einem



Abbildung 1: Entwicklung des Referenzpunktsystems

vorangegangenen Innovationsprojekt wurde durch den Fachbereich Vermessung in Zusammenarbeit mit dem DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz) ein automatisierter Messplatz im MEYER WERFT Laserzentrum mit einer Software zur Sektionsanalyse entwickelt. Jede Sektion die den Messplatz passiert wird von fünf Laserscannern unter der Hallendecke in Höhe von 17 Metern erfasst und die daraus generierte Punktwolke wird automatisch mit dem dazugehörigen CAD-Modell verglichen. Nach der Transformation der Punktwolke in das Koordinatensystem des CAD-Modells lässt sich praktisch jeder aufgenommene Punkt in Schiffskoordinaten beschreiben. Im Rahmen des Forschungsprojektes SchiV 3.0 wurde die Software zur Sektionsanalyse um ein Modul zur automatischen Targetdetektion erweitert. Zunächst wurden Targets (Scanzielzeichen) in verschiedenen Größen und Formen angefertigt und untersucht, welche sich unter den gegebenen Bedingungen am besten erfassen lassen. In diesem Verlauf wurden schließlich Black- & White-Targets mit einem Durchmesser von 12 Zentimetern und einem Magnetadapter entwickelt. Diese Targets werden bevor die Sektion den Messplatz passiert auf den Zentrierringen angebracht und ihr Zentrum automatisch während der Sektionsanalyse ermittelt. Die Position der Referenzpunkte lässt sich auf diese Weise auf wenige Millimeter genau bestimmen. Um die ermittelten Informationen tatsächlich nutzen zu können, müssen diese weiter angereichert und vor Ort ausgelesen werden können. Hier war zunächst eine rein maschinell lesbare Beschriftung der Referenzpunkte vorgesehen. Zu diesem Zweck wurde seitens der Abteilung ICT eine Software entwickelt, mit der den Referenzpunktkoordinaten die dazugehörigen Topologieinformationen, wie „Schiff“, „Block“, „Sektion“, „Deck“, „Feuerzone“, „Spant“ und „Seite“ automatisch zugeordnet werden. Daraufhin werden spezielle Aufkleber mit Hinweisgrafiken und den o.g. Informationen in

Form eines QR-Codes sowie im Klartext ausgegeben. Im ersten Schritt wurden für die Codierung der Informationen DataMatrix-Codes verwendet, da diese dem Industriestandard entsprechen. Allerdings ließen sich die DataMatrix-Codes mit dem für die Evaluierung definierten Smartphones und den verwendeten Algorithmen der mobilen Applikation (siehe Mobile Applikation) schlechter auslesen. Die Klartextinformationen wurden hinzugefügt, um allen Mitarbeitern einen direkten Mehrwert durch die Beschriftung der Referenzpunkte zu bieten.

Der Prozess zur Einbringung der Referenzpunkte besteht aus folgenden Arbeitsschritten: Anbringen der Zentrierringe für die Referenzpunkte, Aufnahme und Auswertung der Sektion → Ermittlung der Referenzpunktkoordinaten, Ergänzen der Referenzpunktinformationen um Topologieinformationen, Ausdruck der Beschriftung mit Lokalisierungsinformationen, Etikettierung der Referenzpunkte. In einer Testphase vom April bis zum Dezember 2015 wurden ungefähr 500 Sektionen von zwei verschiedenen Kreuzfahrtschiffen mit Referenzpunkten ausgestattet, wobei pro Sektion ungefähr zehn Referenzpunkte eingebracht wurden.

Die Positionstreu der eingebrachten Referenzpunkte kann über den gesamten Fertigungsprozess (Sektion → Block → Schiff) nicht gewährleistet werden und eine Aussage über die Genauigkeit der ermittelten Koordinaten lässt sich erst nach einem längeren Untersuchungszeitraum treffen. Unter diesen Voraussetzungen, wurden die Anwendungsszenarien des Fachbereichs Vermessung in diesem Projekt nicht weiter forciert und der Fokus stattdessen auf die Szenarien der Schiffsicherheit und Logistik gelegt. Bei den Szenarien der Schiffsicherheit und Logistik ist lediglich eine Genauigkeit von wenigen Metern erforderlich, wofür der zu betreibende Aufwand des oben beschriebenen Mess- und Analyseprozesses zu hoch wäre. Alternativ wurde für diesen Zweck ein Planungsprozess auf Basis der CAD-Daten entwickelt. Hier werden in dem 3D-Modell der Sektion vorab Punkte definiert und auf Basis derer SOLL-Koordinaten die Beschriftung für die Referenzpunkte erzeugt.

Die Beschriftung lässt sich nun anhand der entsprechenden Zeichnungen auf einige Zentimeter genau ohne Einmessung in der Sektion, dem Block, oder dem Schiff einbringen. Ein ähnlicher Prozess wurde auch für die Beschriftung der Feuerschutz- und Schottschiebetüren entwickelt.

### **Lokalisierungssystem**

Auf Basis des Referenzpunktsystems und des damit verbundenen Koordinatensystems wurde ein Lokalisierungssystem konzipiert, aufgebaut und untersucht. Unter Berücksichtigung der dynamischen, industriellen Umgebungs-



*Abbildung 2: Einbringung Zentrierring und Beschriftung in Sektion*

bedingungen und der anwendungsbezogenen Charakteristika konnten hybride Lokalisierungsansätze als alleinig anforderungserfüllend identifiziert werden. Durch die Kombination eines absoluten und relativen Lokalisierungssystems, kann sowohl eine Langzeit stabile und in einem absoluten Koordinatensystem referenzierte Lokalisierung, als auch ein Trade-Off zwischen Kosten, Aufwand und Genauigkeit erzielt werden. Das konzipierte Lokalisierungssystem kann je nach Ausbaustufe als aktives vollautomatisiertes Lokalisierungssystem oder teil-automatisiertes Lokalisierungssystem verwendet werden. Hierfür werden aktive oder passive Landmarken an den Referenzpunktpositionen des Referenzpunktsystems ausgerichtet und dienen der Referenzierung, der Initialisierung sowie der Positionsstützung im Koordinatensystem entlang einer gelaufenen Trajektorie. Mittels einer aus den Landmarken gewonnenen, Initialen Position und Ausrichtung kann dann im weiteren Verlauf der Bewegungspfad mittels einer Fußgängerkoppelnavigation gewonnen werden. Die fortlaufend aktuelle Position erfährt durch die typische Charakteristik einer Koppelnavigation, als relativer Lokalisierungsansatz, eine zeitliche Drift in Position und Orientierung, welcher durch das Einbeziehen einer neuen Landmarkenposition als absolute Lokalisierungsinformation korrigiert werden kann. Die Fußgängerkoppelnavigation basiert auf einer am Fuß getragenen inertialen Maßeinheit, die die Beschleunigungen und Drehraten der sich bewegenden Person aufnimmt und über eine Bluetooth-Schnittstelle dem mobilen Endgerät zur weiteren Daten- und Signalverarbeitung zur Verfügung stellt. Um die Infrastruktur in Form von Landmarken zu minimieren wurden in diesem Kontext applizierbare Stabilisierungs-Algorithmen untersucht und umgesetzt.

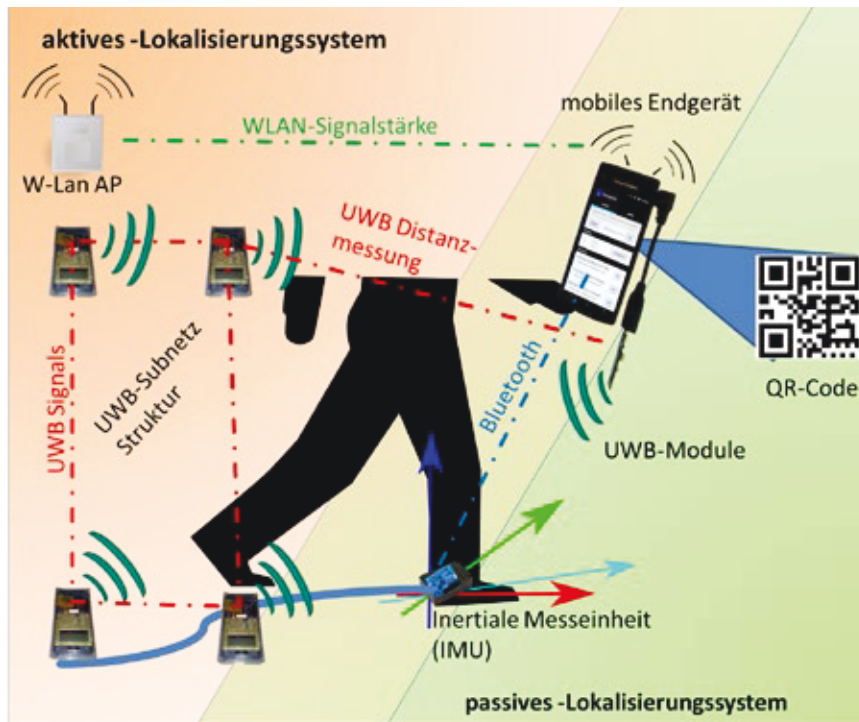


Abbildung 3 Aktives und passives Lokalisierungssystem als unterschiedliche Ausbaustufen eines hybriden Lokalisierungssystems

### Passive Lokalisierung

Um den Installationsaufwand und die Kosten gering zu halten, wurde ein passives Lokalisierungssystem als minimales hybrides Lokalisierungssystem realisiert. Die hierfür ausgebrachten passiven Landmarken wurden als optische Marker mittels QR Codes realisiert. Zum Beginn einer gewünschten Lokalisierung muss ein Mitarbeiter sich an einem QR-Code mittels eines Scans mit dem mobilen Endgerät referenzieren. Dabei wird die Position des QR-Codes ausgewertet und durch Ausrichten zu dem QR-Code wird die horizontale Lage bestimmt. Anschließend werden dem Mitarbeiter die Bewegungstrajektorie und sein aktuelle Position in Echtzeit dargestellt. Durch wiederholtes Scannen eines neuen QR-Codes entlang seiner Trajektorie kann er seine Position und Lage an der Landmarke referenzieren und korrigieren, und somit aktiv der inhärenten Drift der Fußgängerkoppelnavigation entgegenwirken. Durch den manuellen Prozess des Abscannens eines QR-Codes wird hier von einem teil-automatisierten Lokalisierungssystem gesprochen.

### Aktive Lokalisierung

Durch das Ausbringen zusätzlicher Hardware kann die Referenzierung und Stützung der Position und Lage automatisiert werden. Hierfür wurde im Projekt ein UWB Sensornetzwerk mit den dazugehörigen UWB Knoten entwickelt. Diese ermöglichen die Messung von Distanzen zwischen zwei Knoten mit einer Genauigkeit im cm Bereich. Durch die Verarbeitung von mehreren Distanzen mittels Trilaterationsalgorithmen und einer zeitlich gestaffelten Verarbeitung dieser Daten, können dann die aktuelle Position und horizontale Lage ermittelt werden. Um den infrastrukturellen Aufwand zu begrenzen wurde im Projekt die Verwendung von räumlich inhomogenen Netzwerkarchitekturen und deren Auswirkung auf eine hybride Lokalisierung untersucht. Im Projekt hat sich speziell für den Schiffbau die Verwendung von UWB-Toren, die entlang des Schiffsmittengangs platziert sind, als geeignet herausgestellt.

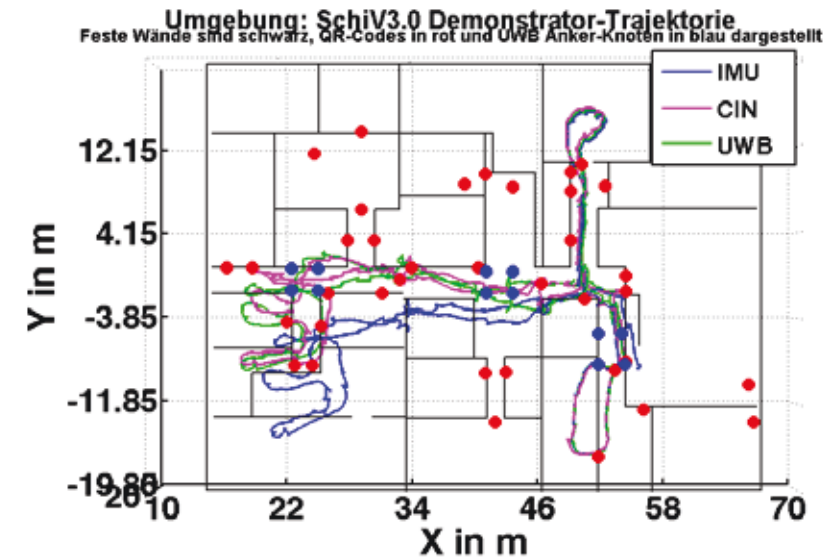


Abbildung 4: Trajektorie aufgenommen während der Demonstrator-Evaluation. Die schwarzen Linien stellen dabei den Grundriss dar. Die Kurve in Blau wurde durch IMU-Daten gewonnen, die rosa Kurve stellt die stabilisierte passive Lokalisierung mit Check-Ins an QR-Codes (rote Punkte) und die grüne Kurve die aktive Lokalisierung mit UWB Knoten (blaue Punkte) dar.

Abbildung 4 zeigt das Lokalisierungsergebnis einer gelaufenen Trajektorie während der Demonstrator-Evaluation. Der Grundriss der Testumgebung ist vereinfacht durch die schwarzen Linien dargestellt. Die roten Punkte in dieser Karte stellen die Referenzpunkte dar, die durch QR-Codes eine Positionsreferenz bereitstellen. Die blauen Punkte sind UWB Knoten die, wie zu

sehen ist, in UWB-Tore gruppiert sind und aktiv eine Ortsreferenzierung ermöglichen. Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist driftet die blaue Kurve, die die relative Lokalisierung, gewonnen aus inertialen Messdaten darstellt, mit der Zeit. Durch die oben beschriebene Kombination aus relativen und absoluten Positions- und Orientierungsinformationen lässt sich das Lokalisierungsergebnis stabilisieren. Für das passive teil-automatisierte Lokalisierungssystem (rosa Kurve) stellen die gescannten QR-Positionen entlang der Trajektorie die absoluten Positionsinformationen dar. Für das aktive vollautomatisierte Lokalisierungssystem (grüne Kurve) werden die absoluten Stützinformationen mittels der UWB Knoten über eine Trilateration gewonnen. Für aktive und passive Lokalisierung konnte eine mittlere Abweichung an den Referenzpositionen von weniger als 1,3 m festgestellt werden.

### Kommunikation im Schiff

Auf Grundlage der durchgeführten Anforderungsanalyse und der Sicherheitsbestimmungen für Brandmeldeanlagen konnte ein low-data-rate drahtloses Netzwerk als Erweiterung der Brandmeldeanlage ausgeschlossen werden. Im Besonderen zur Erfüllung der erhobenen Bandbreitenanforderungen für bestimmte Services wurde WLAN (IEEE802.11) und LTE als mögliche Kommunikationstechnologien auf der Werft und im Schiff

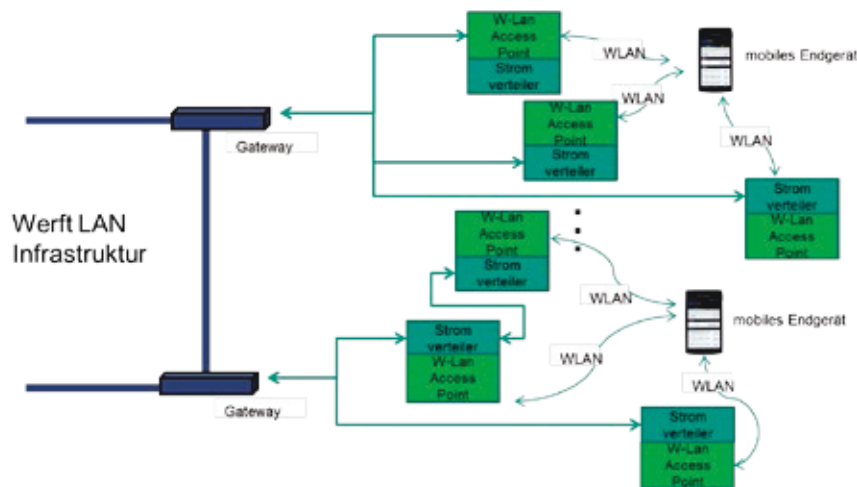


Abbildung 5: Konzept eines flächendeckenden Kommunikationssystems für die Anbindung an Bestandssysteme .

identifiziert. Zurzeit wird auf der Werft für Kommunikation neben CB Funk auch ein GSM Mobilfunknetz eingesetzt. Hier würde sich also ein Umstieg auf den neueren Mobilfunkstandard LTE, der ausreichende Datenraten er-

möglichen kann, anbieten. Ein weiterer Vorteil für eine Mobilfunk-basierte Kommunikation ist die zentralisierte Topologie eines Mobilfunk- Kommunikationsnetzes. Im Besonderen durch Vorteile in den Hauptaspekten, der möglichen Bandbreite und der Adaptierbarkeit des Kommunikationssystems, wurde für das Projekt WLAN als Kommunikationstechnologie ausgewählt. In Zusammenarbeit mit der Meyer Werft wurde ein Konzept entwickelt, das eine flächendeckende WLAN Versorgung auf dem Schiff/im Block garantieren soll. Bei der Konzeption wurde besonders auf geringen Infrastrukturoverhead und die Integrierbarkeit in bestehende Infrastrukturprozesse geachtet. Abbildung 5 zeigt das entwickelte Kommunikationskonzept. Dabei werden WLAN Access Points in die zur Bauzeit bestehende Stromverteilerinfrastruktur eingebracht und mittels der bestehenden/neuen Verkabelung mit einander vernetzt.

Diese implementierte Kommunikationsarchitektur wurde in einem Vor-Ort-Versuch analysiert. Der Versuch wurde in zwei Phasen angelegt, zum einen wurde die drahtlose Kommunikation mit WLAN im Schiff untersucht, zum anderen wurden Technologien für ein robustes Netzwerk zwischen Access Points untersucht. Für die Tests der drahtlosen Kommunikation wurden auf einem Block WLAN Access Points ausgebracht und diese miteinander in der bestehenden Stromverteiler Topologie vernetzt. Mittels einer Testplattform wurden die erzielbaren Bandbreiten und die Verfügbarkeit auf dem Block gemessen. Die Abdeckungsanalyse ergab, dass in 97% aller Messpunkte eine

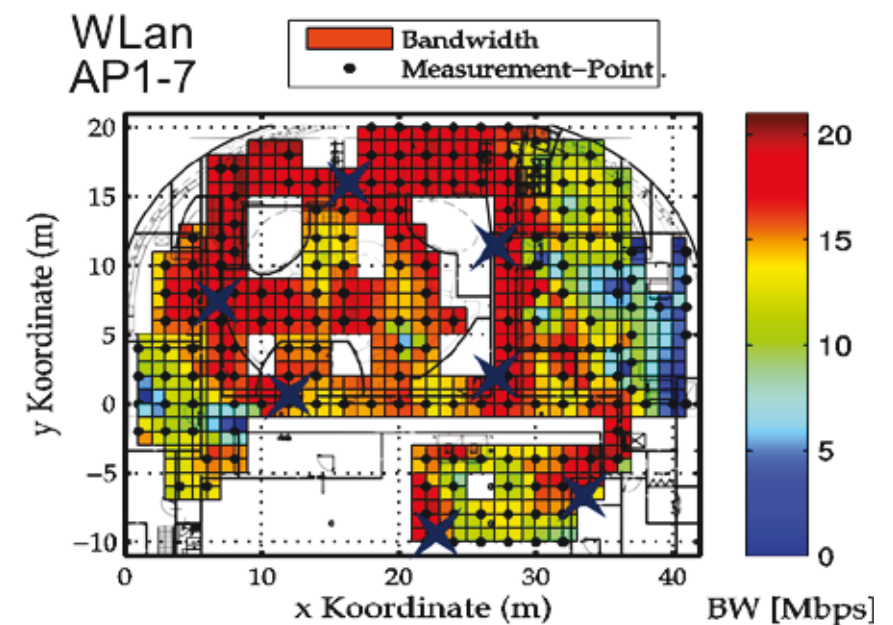


Abbildung 6: Maximale netto Datenraten mit örtlicher Verteilung auf einem Deckabschnitt

Datenübertragung aufgebaut werden konnte. Bei der Analyse zu erzielbaren Bandbreiten mit Wlan (IEEE802.11 b/g) konnte gezeigt werden, dass eine maximale netto Datenrate von 20.4 Mbps möglich ist. Die ermittelte mittlere Datenrate betrug 17.2 Mbps. Die maximale Bandbreite der Kommunikation über dem Ort ist in Abbildung 6 dargestellt.

## Mobile Applikation

Auf Grundlage einer durchgeführten Prozess- und Anforderungsanalyse wurden mehrere Arbeitsprozesse identifiziert welche mittels mobiler Applikationen unterstützt werden können. Schwerpunkt bildete dabei die Untersuchung von Verbesserungspotentialen durch eine IT-gestützte Ortsreferenzierung. Ausgehend von den Prozessen in den Fachabteilungen Logistik und Schiffssicherheit wurden Anforderungen erhoben und jeweils mehrere Evaluations-szenarien erarbeitet. Außerdem wurden auf dieser Grundlage jeweils grafische Benutzeroberflächen (GUI) sowie ein Workflows zur Abbildung der erhobenen Prozesse erstellt (siehe Abbildung 7). Innerhalb mehrerer durchgeführter Evaluationen wurde einerseits die Benutzerfreundlichkeit der im Demonstrator realisierten Konzepte überprüft, andererseits die Deckung der aus den Anforderungen extrahierten Informationsbedarfe festgestellt. Als Ergebnis der Evaluationen sowie aus Anpassungen der ursprünglich erhobenen Prozesse ergaben sich iterative Anpassungen an den Benutzeroberflächen und Workflows.

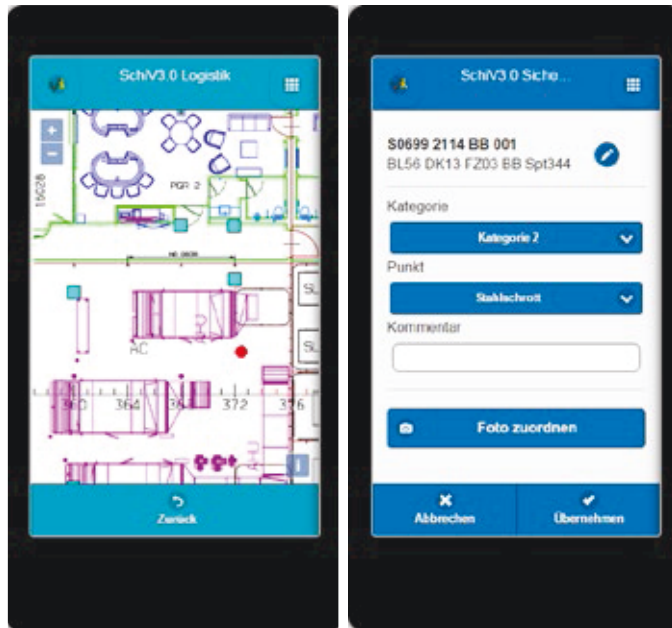


Abbildung 7: Benutzeroberfläche der mobilen Applikationen. Deckplan mit Darstellung der aktuellen Position für den Fachbereich Logistik (links) sowie Eingabemaske zur Erfassung von Sicherheitsvorfällen für den Fachbereich Sicherheit (rechts)

Damit die umgesetzte mobile Applikation in dem vorgegebenen Umfeld einer Schiffsbaustelle betrieben werden kann wurde die Applikation parallel zu den Iterationsschritten der Prozessabbildung in das Kommunikations- und Lokalisierungssystem eingebettet. Hierzu waren u.a. folgende Schritte notwendig:

- Anbindung an die Bestandssysteme der Werft
- Anbindung an das Lokalisierungssystem
- Abbildung verschiedener Referenz- und Koordinatensysteme
- Optimierung der passiven Lokalisierung

## Anbindung an die Bestandssysteme der Werft

Zum Austausch von aktuellen Arbeitsdaten (Referenzpunkte, Blockbau, Blockplan) zwischen den mobilen Applikationen und den Bestandssystemen der Werft wurden verschiedene Schnittstellen implementiert. Um gegenseitige Abhängigkeiten gering zu halten wurde eine lose Kopplung der Systeme auf Webservice-Technologie umgesetzt.

Da im Schiffsrumpf die Kommunikation aufgrund des Stahlbaus unterbrochen sein kann, war eine wichtige Anforderung die Unabhängigkeit und Robustheit der Applikation. Dazu wurde ein performater und asynchroner Datenabgleich mit den angebundnen Bestandssystemen umgesetzt. So ist auch bei Ausfall der Kommunikationsinfrastruktur ein eingeschränktes Weiterarbeiten mit der mobilen Applikation möglich.

## Anbindung an das Lokalisierungssystem

Zur Integration der Fußgängerkoppelnavigation sowie des aktiven Lokalisierungssystems (UWB) diente eine Kommunikationsbibliothek welche in den mobilen Applikationen eingebunden wurden.

## Abbildung verschiedener Referenz- und Koordinatensysteme

Da sich beim Schiffsbau die Blöcke (Teile des Schiffs) dynamisch je nach Ausbaustatus und Dockbelegungsplan an verschiedenen Orten befinden können, ist es in einer georeferenzierten Darstellung des Generalplans eines Kreuzfahrtschiffes notwendig, unabhängig vom Weltkoordinatensystem zu sein. Um dies zu erreichen, wurde eine entsprechende Kartenprojektion aufgebaut, welche nicht auf der Oberfläche der Erde (Weltkoordinaten) basiert.

Zielsetzung war daher, ein eigenes kartesisches Koordinatensystem umzusetzen, welches in den mobilen Applikationen verwendet werden kann. Insbesondere um anschließend die Ortsangaben in Relation zum Schiffsraum (Schiffsnummer, Block, Deck, Spant) zu unterstützen, war die Allgemeingültigkeit der Realisierung zu beachten.

Voraussetzung ist, dass für jedes Schiff ein aufbereiteter Generalplan vorhanden ist. Dieser muss nicht geographisch eingemessen sein (aufgrund der Unabhängigkeit zum Weltkoordinatensystem), lediglich eine Zoomstufen-Abbildung ist notwendig (1 Meter entspricht x Pixeln in der Rastergrafik).

### **Optimierung der passiven Lokalisierung**

Zur passiven Lokalisierung werden zweidimensionale Codes mit der Fotokamera der mobilen Endgeräte erfasst und innerhalb der mobilen Applikation dekodiert. Bei den Evaluationen hat sich gezeigt, dass die angebrachten Codes aufgrund der Verschmutzung schlecht lesbar waren. Zur Verbesserung der Erfassungsqualität der Codes bei den gegebenen ungünstigen Umweltbedingungen, wie sie auf den Bauplätzen der Schiffe vorzufinden sind, wurden Tests zur Fehlertoleranz bei Verwendung unterschiedlicher Code-Arten sowie der Einfluss der Länge der codierten Zeichenfolge untersucht (u.a. DataMatrix- und QR-Codes). Hierbei wurden erhebliche Unterschiede bei der Auslesequalität festgestellt. Bei den gegebenen Bedingungen und mit Endconsumer-Geräten haben sich QR-Codes als sehr zuverlässig erwiesen.

### **Fazit**

Die Prozesse auf der MEYER WERFT entwickeln sich kontinuierlich mit einer hohen Geschwindigkeit weiter und somit gab es im Zeitraum des Forschungsprojekts SchiV 3.0 auch zahlreiche weitere Entwicklungen in den Bereichen Vermessung, Schiffssicherheit und Logistik. Aufgrund dessen und den Erkenntnissen aus dem Projekt selbst, wurden auch die Evaluierungsszenarien mehrfach angepasst.

Es wurden insgesamt drei größere Evaluierungen mit unterschiedlichen Szenarien auf der Werft durchgeführt. Für die ersten beiden Tests im Juli und Dezember 2015 in der realen Umgebung wurden jeweils ein Block der Kreuzfahrtschiffe „Ovation of the Seas“ und der „Genting Dream“ vorbereitet. Die letzte Evaluierung im August 2016 wurde auf dem im Ausbau befindlichen Kreuzfahrtschiff „Genting Dream“ durchgeführt. Für die Versuche wurde von der Abteilung ICT eine Modellumgebung mit Demonstrationsdaten geschaffen, mit der die IT-Bestandssysteme der MEYER WERFT simuliert werden konnten.

Die Schiffssicherheit und Logistik der MEYER WERFT sehen in den entwickelten Konzepten ein großes Potential für die Weiterentwicklung ihrer bestehenden Prozesse. Bei Umsetzung kann eine ordnungsgemäße Ablieferung von Materialpaketen in der Logistik auf einfache Art und Weise belegt und dokumentiert werden. Auch die Aufnahme, Dokumentation und Meldung von Sicherheitsmängeln durch die Schiffssicherheit ließe sich vereinfachen und beschleunigen. Auf der MEYER WERFT gibt es aktuell größere Umstrukturierungen in der ICT-Landschaft aufgrund der Angleichung der verschiedenen Werftstandorte und der Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0. Die Integration der Ergebnisse in die bestehende Umgebung stellt somit auch in nächster Zeit noch eine Herausforderung dar.

### **Danksagung**

Das SchiV3.0 - Konsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und beim Projektträger Jülich für die Förderung des Vorhabens mit dem FKZ: 03SX352

## FlexMoT – Flexible Umweltmonitoring-Plattform für Notfall- und Langzeiteinsätze im Offshore-Bereich

Förderkennzeichen: 03SX342

Matthias Lunge, Carsten Frank, Peer Fietzek, Daniel Esser  
(Kongsberg Maritime Contros GmbH)

Thomas Ruth, Stefan Audersch, Prof. Uwe Freiherr von Lukas  
(Fraunhofer IGD)

Volker Nuppenau, Manfred Kühn, Frank Appel, Dr. Gerd Schriever  
(Oktopus GmbH)

Dr. Uwe Rudolf (LEONI Special Cables GmbH)

Dr. Sascha Flögel, Dr. Olaf Pfannkuche (GEOMAR Kiel)

### Einleitung

Zielsetzung für das 2013 gestartete Projekt FlexMoT war die Entwicklung eines flexiblen Monitoring-Tools als Langzeitmesssystem, sowie als Notfallsystem mit geringstem Rüstaufwand und schneller Datenverfügbarkeit. Zusätzlich sollte die Möglichkeit bestehen, temporär vertikal (profilierend) in der Wassersäule messen zu können, wozu Messungen mit einem Fahrstuhl-Float vorgesehen wurden. Das Monitoring-System soll schwerpunktmäßig im Bereich der Umweltüberwachung im Umgebungswasser von Offshore Öl- und Gasproduktionsplattformen und Offshore-Windanlagen, aber auch für andere Messaufgaben unter Wasser, für wissenschaftliche Dauermessungen sowie zur Gewässerüberwachung genutzt werden können. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Baukastensystems, welches in der Lage ist, mit Modulkomponenten unterschiedliche Einsätze und Anforderungen zu bewältigen. Die modulare Systemstruktur soll die Anbindung unterschiedlicher Sensoren und Messgeräte ermöglichen und findet sich nicht nur auf Seiten der Hardware sondern auch in der zu entwickelnden Software zum Management, Auswertung und Visualisierung der erfassten Daten wieder. Das Projekt FlexMoT wurde im Verbund durch die Unternehmen Kongsberg Maritime Contros GmbH (ehemals CONTROS Systems & Solutions GmbH, Konsortialführer), Oktopus GmbH und LEONI ELOCAB GmbH, sowie den Forschungseinrichtungen Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD (Projektkoordination) und GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel zwischen 2013 und 2015 durchgeführt.

Das Vorhaben wurde vor dem Hintergrund gestartet, dass durch die wachsende Expansion der Offshore-Exploration der Öl & Gas-Industrie, dem wachsenden gesellschaftlichen Umweltbewusstsein und Großunfällen wie dem



Macondo-Blowout 2010 im Golf von Mexiko (Deep Horizon Unglück) offenbar wurde, wie groß der Bedarf für Umweltmonitoring-Technik ist, die besser und schneller einsetzbar, rekonfigurierbar und benutzbar ist (modulares Grundkonzept, geringe Rüstzeiten, lange Standzeiten) und zugleich größere Bereiche abdecken und eine schnelle Datenverfügbarkeit bieten kann. Zudem war der anvisierte industrielle Markt für funktionierende und langzeit-taugliche Monitoringinstrumente aufgrund der hohen Ölpreise sehr vielversprechend. Ziel war es, ein entsprechendes flexibles und modulares System zu entwickeln, welches die entscheidenden Schwächen bisheriger Systeme umgeht und auch für den Einsatz durch nichtwissenschaftliche Anwender (Industriekunden) geeignet ist.

### Gesamtarchitektur

Zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips wurde aus den 3D-Modellen der strukturellen Komponenten Renderings erzeugt (Abb. 1).

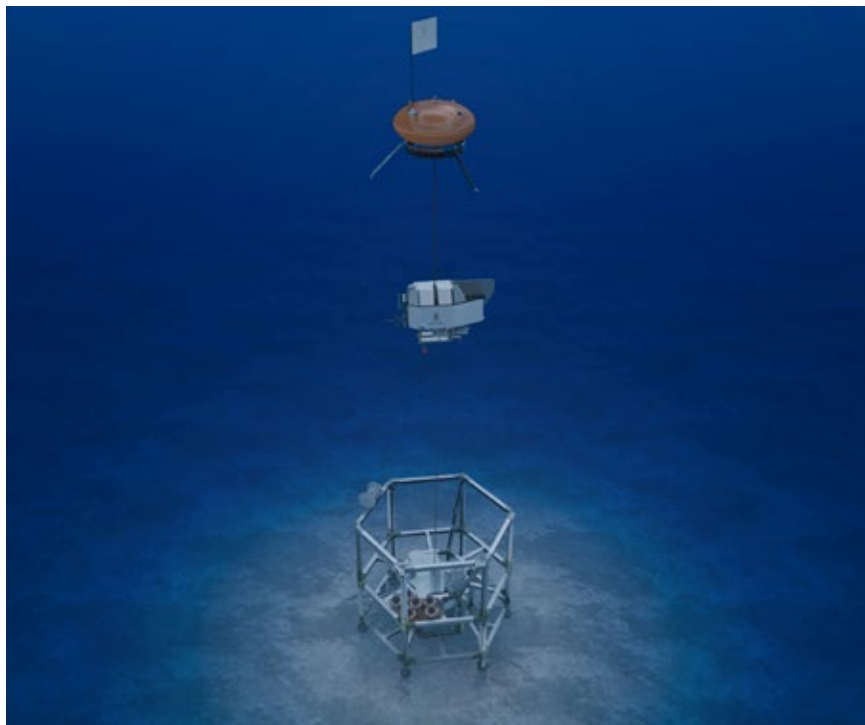


Abbildung 1: Rendering eines aktiven FlexMoT-Profiler-Systems.

In der Abbildung ist die Arbeitsposition des Systems dargestellt. Im unteren Teil befindet sich die Basisstation (Oktopus). Diese beherbergt eine Master-Unit

mit Datenlogger zur Ansteuerung von Sensoren und weiteren Komponenten. Zusätzlich sind im Basisgestell eine zentrale Energieversorgung mit Schnittstellen für den Profiler und andere Verbraucher sowie der Kurierspeicher mit kleinen Datenkurieren angebracht. Am Kletterseil (LEONI) befindet sich auf halber Höhe der Profiler oder Fahrstuhl (KM Contros), der ebenso mit Sensorik bestückt ist. Eine Kopfboje (Oktopus) strafft das Seil an dem der Profiler auf und ab fährt. Vor und während des Deployments sind sowohl Profiler als auch Kopfboje im Basisgestell gepackt, so dass ein kompakter Transport und eine unkomplizierte Ausbringung möglich sind. Über einen Release-Mechanismus kann die Kopfboje so ausgelöst werden, dass sie bis an die Wasseroberfläche aufsteigt und eine rückstandslose Bergung des gesamten Systems per Kran oder Winde ermöglicht.

### Profilierende Sensorik

Im Rahmen des Projektes war KM Contros schwerpunktmäßig verantwortlich für die Entwicklung des Fahrstuhls und des darauf installierten Sensorpakets inklusive Entwicklung und Weiterentwicklung einzelner Sensorikkomponenten. Ein Sensorpaket, das sich in der Wassersäule auf und ab bewegt ist wichtig für ein effizientes Monitoringsystem da sich die Fahne einer bodennahen Leckage sehr unregelmäßig im Wasser ausbreitet und eine Messung nahe dem Meeresboden im Leckagefall nicht mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ein messbares Signal ergibt. Entsprechend besteht die Notwendigkeit bis zu einem gewissen Grad die Wassersäule mit zu beobachten. Dies kann dadurch gelöst werden, dass eine nach oben schwimmende Sensorkette an einer Lander-Basisstruktur befestigt wird. An dieser Kette müssten in regelmäßigen Abständen Sensoren angebracht werden um eine ausreichende Abdeckung der Wassersäule zu erreichen. Das ist eine Lösung, die aus Kostengründen für viele Kunden nicht in Frage kommt, da neben den Sensoren auch das Kabel mit der in so einem Fall notwendigen Energie – und Datenversorgung sowie der dann mit zu verbauenden Schnittstellen eine vergleichsweise große Investition erfordert. Auch ist Ausbringung und die Einholung eines solchen Systems kompliziert und anfällig für Fehler oder Schäden.

Die Alternative zu einer Messkette ist die Verwendung eines Profilers, der ein entsprechendes Seil heraufklettert oder an ihm hoch schwimmt (z.B. durch Dichteänderung). Das System ist zwar technisch aufwändiger, da sich das Sensorpaket bewegen muss und daher ein wie auch immer gearteter Antrieb vorgesehen werden muss, aber die Anzahl der benötigten Sensoren ist deutlich geringer und das nach oben schwimmende Kabel deutlich einfacher aufgebaut als eine Sensormesskette. Daher wurde für FlexMoT dieser Weg gewählt. Die Frage nach dem zu verwendenden Antrieb ließ sich im Rahmen

des Projektes leicht beantworten, da ein Dichteantrieb zwar energetisch deutlich sparsamer ist, sich aber mit einem solchen Antrieb die Aufschwimmgeschwindigkeit und ein Parken des Profilers in einer bestimmten Wassertiefe nicht realisieren lassen. Entsprechend wurde ein steuerbarer mechanischer Klettermechanismus realisiert.

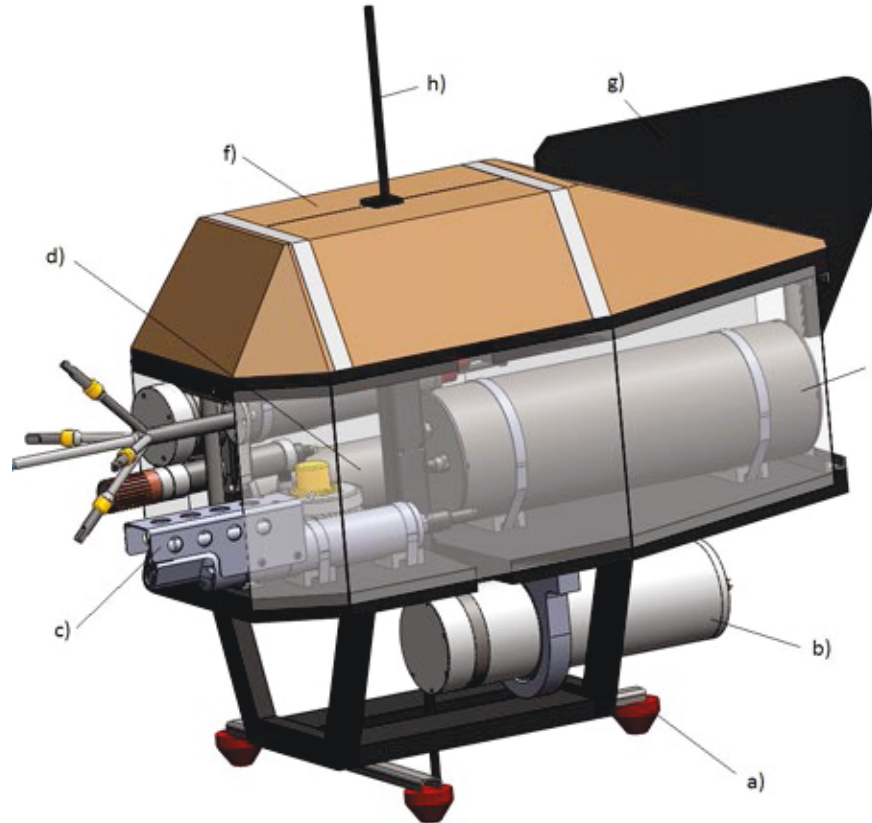


Abbildung 2: Modell des Fahrstuhls inkl. Sensorik. Weitere Erläuterungen zu den Beschriftungen finden sich im Text.

Der Profiler (siehe Abb. 2) besteht aus

- einem Rahmen (a), der alle Komponenten trägt und in den der Auftriebschaum (f) sowie eine Finne zur Stabilisierung (g) integriert ist,
- einer beweglichen Antriebseinheit (b), die das Profilieren an dem Führungskabel (h) ermöglicht,
- einem Sensorpaket (c), mit folgenden Sensoren
  - CTD (Druck, Temperatur, Salinität)

- HydroC™ CH4 (Methan)
- PAH-Sonde
- Strömungsmesser inkl. Magnetfeldkompass, Neigungs- und Beschleunigungssensor
- einem embedded System (Mastermind), das für alle Steuer- und Regelfunktionen zuständig ist (d) und
- einer Batterie (e) und dem Batteriemanagementsystem.

### Modular aufgebaute Basisstation

Die Konstruktion und Fertigung des Basisgestells, in welchem sich die Kuriere und weitere Komponenten befinden, stellte einen der Schwerpunkte von OKTOPUS dar. Im Zuge dessen wurde das modulare Profilsystem OktoMFS entwickelt und optimiert. Die mechanische Grundlage des FlexMoT-Systems ist das Basisgestell, welches alle ins Wasser auszusetzenden Komponenten beherbergt. Die Gestellprofile haben einen offenen Querschnitt, der so ausgelegt ist, dass das Gestell genügende mechanische Stabilität hat (mit ähnlichen mechanischen Werten, wie ein geschlossener Querschnitt) und gleichzeitig durch gute Zugänglichkeit eine sorgfältige Reinigung der einzelnen Profile (Entfernen von Salzwasser nach dem Einsatz) möglich macht und damit Korrosion an den Gestellkomponenten verhindert. Als Material für das Profilsystem OktoMFS wurde der Edelstahl 1.4571 ausgewählt. Dieser kann inklusive Prüfwerkzeug mit kurzen Lieferzeiten gut beschafft werden und hat ein angemessenes Preis-Leistungsverhältnis. Für einen kompakten, kostengünstigen und schnellen Transport ist das Basisgestell, bestehend aus C-Profilen und Knotenstücken, komplett zerlegbar, modular erweiterbar sowie jedes Einzelteil leicht austauschbar. Weiter können jegliche Anbauteile (wie z.B. Kameras, UW-Lampen) ohne das Schwächen der Profile (z.B. durch Bohrungen, Langlöcher) an jede erdenkliche Stelle montiert werden. Dies geschieht über Nutsteine, welche in die Träger geschoben werden und sich dann in der Öffnung des jeweiligen Profils einklemmen. Das Halbzeug der Profile ist ein Blech, welches mit Laser ausgeschnitten, gefaltet und an für die Stabilität entscheidenden Stellen verschweißt wird. Durch dieses besondere Verfahren zur Herstellung der Träger wird ein sehr stabiler Träger mit hoher Traglast und geringem Eigengewicht generiert. Die einzelnen Träger werden durch spezielle Eckverbinder und Knotenstücke verbunden. Für das FlexMoT-Basisgestell wurde die vorteilhafte Form einer Bienenwabe gewählt (Abb. 3). Bei dieser Form werden Kräfte gut von den Verbindungsstücken aufgenommen und das Gestell bekommt einen mechanisch stabilen Aufbau

für das gute Hantieren an Deck eines Schiffes. In der Mitte des Gestells ist genügend Platz für diverse Leinen und Kabel (Aufholleine, Fahrstuhlkabel, Notfall-Leine). Im äußeren Ring werden die Druckkörper mit der Elektronik, die Energieversorgung sowie verschiedene Sensoren platziert.

### Datenempfangsmodul und Datenmanagement



Abbildung 3: FlexMoT-Basisgestell in der 1. Ausbaustufe.

Im Projekt wurde für den Datenempfang und das Datenmanagement durch das Fraunhofer IGD primär ein Plugin-Framework entworfen und prototypisch umgesetzt. Auf Basis des Industriestandards OSGi für modulare Anwendungen wurden so Eigenschaften und Beschreibungen für sogenannte FlexMoT-Plugins ausgearbeitet. Zu den Plugin-Klassen gehören Sensor-, Datenhandling-, Visualisierungs- und System-Plugins. Für die Beschreibung der verschiedenen Plugins und ihrer Eigenschaften wurden verschiedene Taxonomien und Beschreibungsformate untersucht und evaluiert. Nicht für alle der Plugin-Klassen konnten geeignete Formate, Standards oder Taxonomien gefunden werden, so dass eigene XML-Beschreibungen entwickelt wurden, die sich an Taxonomien aus der aktuellen Forschungsliteratur orientieren bzw. diese in einem eigenen XML-Dialekt formalisieren. Für die Beschreibung der Sensoren hat sich SensorML als geeignet erwiesen, ein durch das OGC-Konsortium spezifiziertes Format zur Beschreibung von Sensoren und Sensorsystemen und Teil der SWE-Standards (Sensor Web

Enablement). Mit den reichhaltigen beschreibenden Metadaten der Plugins sind das Auflösen von Abhängigkeiten untereinander sowie (semi)automatische Auswahl geeigneter Operationen beim Datenhandling aber auch bei der Datendarstellung möglich. Erste Plugins (für ein durch KM Contros entwickeltes bzw. bereitgestelltes Grundsensor-Modul, d.h. für CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, Temperatur, PAH, Salinität) wurden entwickelt. Sie wurden auch verwendet um die Grundidee der automatischen Abhängigkeitsauflösung zu testen. Im Prototyp werden bei der Installation eines neuen Sensors (als Plugin) auch eventuell noch fehlende weitere Plugins automatisch nachinstalliert. Für die Bereitstellung der FlexMoT-Plugins an einem zentralen Ort wurden verschiedene Repository- und Updatemechanismen aus dem Umfeld von OSGi, Eclipse und RCP untersucht und evaluiert. Schlussendlich wurde der OBR-Ansatz von OSGi implementiert.

Bei den Arbeiten zum Datenmanagement wurde zum einen die Speicherung von Metadaten über die Sensorik und die konkrete Systemkonfiguration betrachtet, aber auch die Speicherung der eigentlichen Messdaten. Dazu gehören Rohdaten vom Sensor aber auch abgeleitete, aufbereitete Messdaten. Zudem wurden die Messdaten, ausgehend von Empfehlungen in der Literatur, unterteilt in Level 0 (Rohdaten, einzelne Datenlieferungen) und Level 1 (Aufbereitete Messdaten als kontinuierliche Zeitreihe). Für die verschiedenen möglichen Sichten auf die Messdaten wurde eine Taxonomie entwickelt, welche die methodische Grundlage für den Entwurf und die Beschreibung geeigneter Datenmodelle, gewünschte Zugriffsarten und Suchmöglichkeiten sowie die benötigten Visualisierungen bildete.

Für das Datenmanagement wurde ein Server (DataServer) erstellt, welcher mittels REST-Kommunikation und JSON-kodiert Messdaten sowie Metadaten, z.B. über die vorhandenen FlexMoT-Installationen und aktiven Sensoren bereitstellt. Die Daten des FlexMoT-Systems gelangen mittels Datenkurieren an die Wasseroberfläche und werden zunächst per GSM an den DataReceiver versendet, der diese entgegennimmt und dann an den DataServer zur Archivierung und Darstellung im Realtime Dashboard an den Endanwender weiterleitet (Abb. 4). Zur Übertragung der Daten wurde mit den Entwicklungspartnern ein gemeinsames Datenprotokoll (Angelehnt an NMEA 0183) entwickelt, welches nicht nur die Daten der verschiedenen Sensoren transportiert, sondern auch alle Betriebsinformationen und Statusmeldungen.

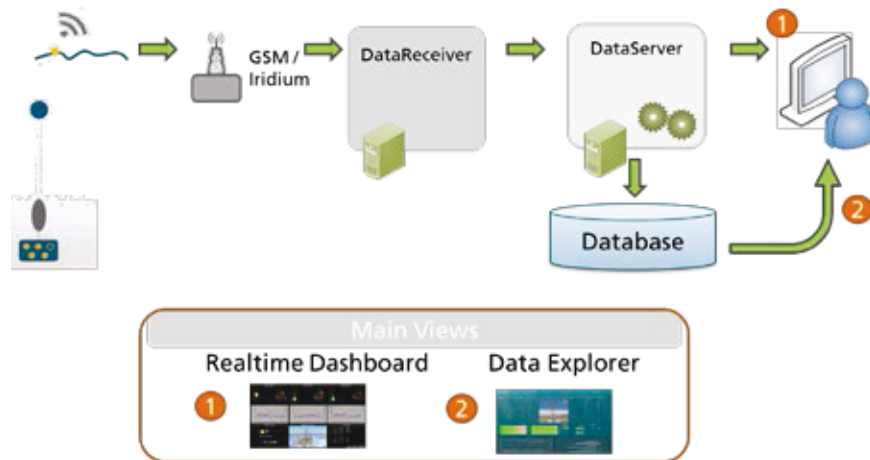


Abbildung 4: Grobarchitektur der Datenübertragung vom FlexMoT-Unterswassersystem bis zum Endanwender im Kontrollraum oder Labor.

### Datenvisualisierung und interaktive Datenauswertung

Ein Schwerpunktthema des Fraunhofer IGD war die Konzeption und Entwicklung von Komponenten für rein webbasierte, interaktive Datenvisualisierungen. Dazu wurden neben den Webtechnologien HTML 5 und JavaScript u.a. die Bibliotheken D3 (Data-driven Documents) und das 3D-Framework X3DOM [3] verwendet. Mit diesem Ansatz wird auch der Zugriff auf die Daten per Internet von verschiedenen Endgeräten möglich. Sowohl für die Plattformverwaltung/Konfiguration, das Near-realtime-Monitoring als auch die Datenanalyse wurden entsprechende Softwarekomponenten erstellt und für die Nutzung auf Touch-Displays an PCs und auf mobilen Tablets getestet. Mit dem Realtime Dashboard wurde dann auch während des zweiten Feldtestes (AL 459) sowohl der Systemzustand überwacht, als auch die initiale Konfiguration während der Test-Deployments des FlexMoT-Gesamtsystems vorgenommen. Für die Interaktion mit den GUIs wurde ein Hauptaugenmerk auf neue Bedienkonzepte gelegt. Daher sind die Oberflächen konsequent auf die Unterstützung von sogenannter Direct-Touch-Interaktion ausgelegt. So wurden z.B. sogenannte Radial-Menüs integriert, die laut aktueller Interaktionsforschung auf Touch-Displays intuitiver und schneller zu bedienen sind. Aufbauend auf den zuvor einzeln entwickelten Visualisierungsgrundlagen (Komponenten für dynamische Tiefenprofile, 4D-Visualisierungen für ADCP-Strömungsdatensätze, Komponenten für Bodensensordaten) wurde ein Realtime-Monitoring-Dashboard erstellt (Abb. 5). Dieses ist für die ständig aktualisierte Anzeige der aktuellen (und in einem gewissen Zeitfenster vorher erfassten) Sensor-Messdaten sowie des Systemstatus während eines Messeinsatzes konzipiert. Es stellt nicht nur aktuelle Sensormesswerte dar,

sondern auch Betriebsinformationen des Systems (Ladezyklen, Gesamtzustand, Anzahl gesendeter Kurier usw.) Das FlexMoT Realtime Dashboard ist also für den Betrieb in einem Kontrollraum, bzw. bei wissenschaftlichen Einsätzen für die Benutzung auf einem Tablet durch den diensthabenden Wissenschaftler gedacht. Als grundsätzliche Design-Richtlinien wurde hier darauf geachtet, nur einen Teil der gemessenen Daten übersichtlich darzustellen, immer den aktuellsten Zustand zu visualisieren (sowie eine begrenzte Historie für den schnellen Abgleich mit älteren Zuständen/Messungen) und den Zustand des Systems zentral sichtbar zu machen. Für die Darstellung werden 2D- und 3D-Darstellungen kombiniert. Neben den am Boden und in der Wassersäule erfassten Messdaten enthält die Darstellung auch aktuelle Wetter- und Seegangsinformationen sowie Informationen über die Tiden in dem Seegebiet.

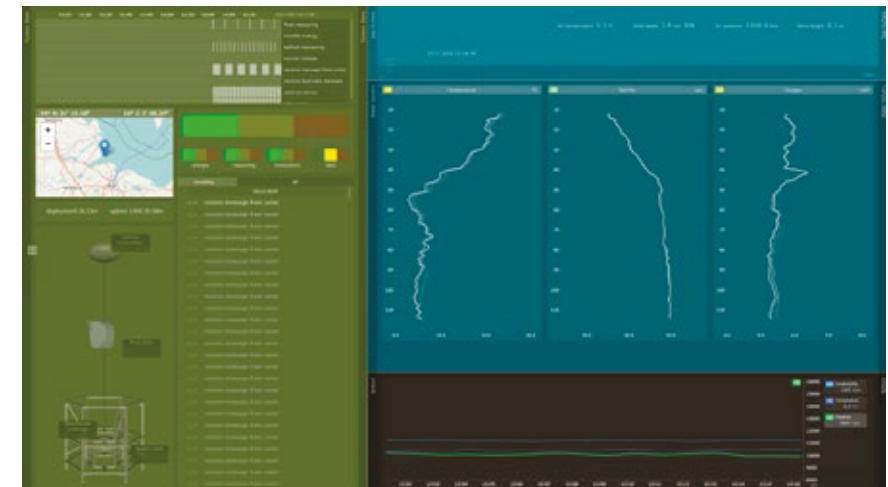


Abbildung 5: Realtime Dashboard zur Anzeige der aktuellsten Sensor-Messwerte und diverser Betriebsparameter, dem Gesamtzustand und Deployment-Informationen. Neben der Karte sind im linken Drittel Ampeln für den Status des Gesamt- und ausgewählter Teilsysteme angeordnet.

Für den Bereich „Datenanalyse“ wurde eine komplexe Softwarekomponente erstellt – der sogenannte FlexMoT Explorer View (FEV). Er ist für die eingehende und präzise visuelle post mortem-Analyse und Exploration aller vorliegender Daten nach einem Messeinsatz konzipiert (Abb. 6 und 7). Damit kann dann z.B. per Mauszeiger oder per Fingertouch ein konkreter Wert einer Messung in einer bestimmten Tiefe zu einer bestimmten Zeit erfragt werden und im Kontext aller anderen Parameter betrachtet werden. Für die Darstellung werden 2D- und 3D-Darstellungen kombiniert. Neben den am Boden und in der Wassersäule erfassten Messdaten enthält die Darstellung auch aktuelle und prognostizierte Wetter- und Seegangsinformationen an der Position des Sensorsystems.

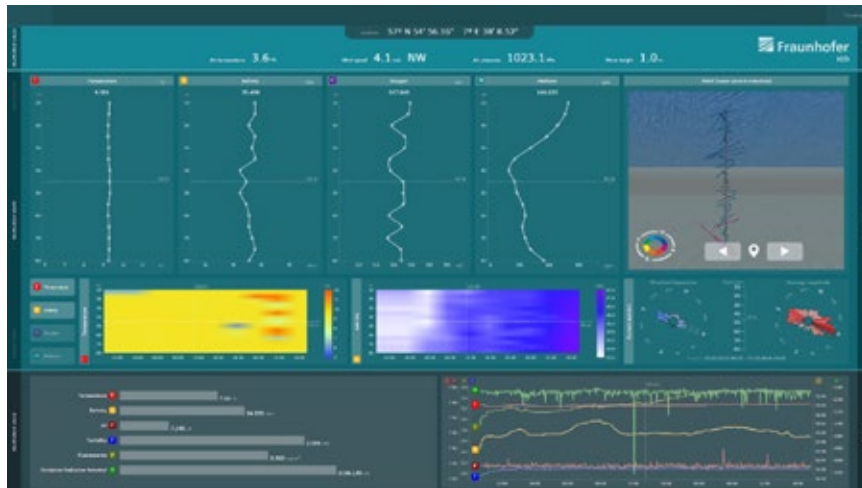


Abbildung 6: Der FlexMoT Explorer View (FEV), realisiert als interaktive Webvisualisierung. Im Screenshot wurden exemplarisch die während des ersten Feldtestes (AL 436) erhobenen Messwerte dargestellt.



Abbildung 7: Exploration der Messdaten durch direkte Interaktion mit den 2D- und 3D-Darstellungen des FEV auf einem 84"-MultiTouch-Display.

Die FEV-Komponente wurde mit einer umfassenden Nutzerstudie durch Fachanwender insbesondere hinsichtlich ihrer Praktikabilität getestet [4]. Ziel war es, zu untersuchen, ob die Verwendung von Direct-Touch-Interaktion zur Datenexploration geeignet ist und die Verknüpfung bzw. Synchronisierung von Daten verschiedener Sensoren in einem einzigen Visualisierungstool dazu beiträgt, Zusammenhänge besser zu erkennen und Aufwand und Zeit zur Auswertung der Daten zu verringern.

## Optimierung von Kabeloberflächenstrukturen

Zur Entwicklung von optimierten Oberflächenstrukturen von Kabeln durch LEONI ist im Jahr 2013 der Auftrag zur Beschaffung eines Messrahmens für den Windkanal veranlasst worden (Abb. 8).



Abbildung 8: Messrahmen mit eingespanntem Musterkabel im Windkanal

Damit konnten die ersten Vergleichsmessungen zwischen dem Anströmverhalten an einem Kabel und einem massiven Stab vorgenommen werden. Hintergrund dieser Messungen ist der Gedanke, dass möglicherweise die Fertigung von unterschiedlichen Oberflächenstrukturen mittels des ursprünglich vorgesehenen Extrusionswerkzeuges wesentlich aufwändiger und kostenintensiver ist als die analoge Herstellung von unterschiedlichen Stabgeometrien. Die durchgeführten Messungen sowohl mit dem Kabel als auch mit unterschiedlichen Stabmaterialien (Stahl, Aluminium und Kunststoff) ergaben die Möglichkeit, entsprechende Umrechnungen bei den Anströmwiderständen vorzunehmen. Diese Messarbeiten wurden am Windkanal der Universität Rostock im Rahmen einer studentischen Semesterarbeit durchgeführt. In einem ersten Los sind neun unterschiedliche Oberflächenformen für Kabeloberflächen definiert worden (Abb. 9). Auf der Grundlage der oben dargestellten Grundsatzuntersuchungen sind 8 Metallstäbe mit unterschiedlichen

Kabeloberflächengeometrien sowie ein runder Vergleichsstab gefertigt worden, die 2015 auf ihr Anströmverhalten geprüft wurden. Ziel war es hierbei, Geometrien zu finden, die es ermöglichen, den Anströmwiderstand des Kabels im frei hängenden Zustand, zum Beispiel an Bojen, zu reduzieren.



Abbildung 9: Prüfstäbe zur Vermessung der Optimierung von Kabeloberflächengeometrien.

Die durchgeführten Messungen ergaben, dass bei einer nicht rotationssymmetrischen Oberflächengestaltung eine Reduzierung des Anströmwiderstands um bis zu 25% zu erzielen ist. Dabei ist zu beachten, dass sich ein derart geformtes Kabel immer in die Strömung drehen muss um diese Reduzierung zu zeigen. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass diese Reduzierung sowohl bei einem Anströmwinkel von  $90^\circ$  als auch bei Anströmwinkeln von  $60^\circ$  und  $45^\circ$  erreichbar ist. Eine zweite getestete Oberflächengeometrie ist rotationssymmetrisch. Diese Geometrie führt zu einer Reduzierung des Anströmwiderstands von bis zu 30%, allerdings nur bei einem Anströmwinkel nahe  $90^\circ$ . Damit ist diese Geometrie aber sehr gut geeignet für strangförmige Konstruktionen, die sich im Wasser oder in der Luft befinden und senkrecht installiert wurden. Die Messergebnisse für den Fall der  $90^\circ$ -Anströmung sind in Abb. 10 dargestellt, wobei der 100%-Wert einem Rundstab entspricht.

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten soll geprüft werden, in wie weit sich derartige Kabeloberflächen wirtschaftlich fertigen lassen und welche konkreten Anwendungen hierfür relevant sind. Gleichzeitig ist es möglich, die gefundenen Oberflächengeometrien auch für andere Einsatzgebiete außerhalb der Kabeltechnik einzusetzen, zum Beispiel für die Optimierung von Türmen von Windkraftanlagen oder für die Adaptierung bei Verankerungsseilgeometrien.

## Verhalten des Anströmwiderstands von allen Musterstäben

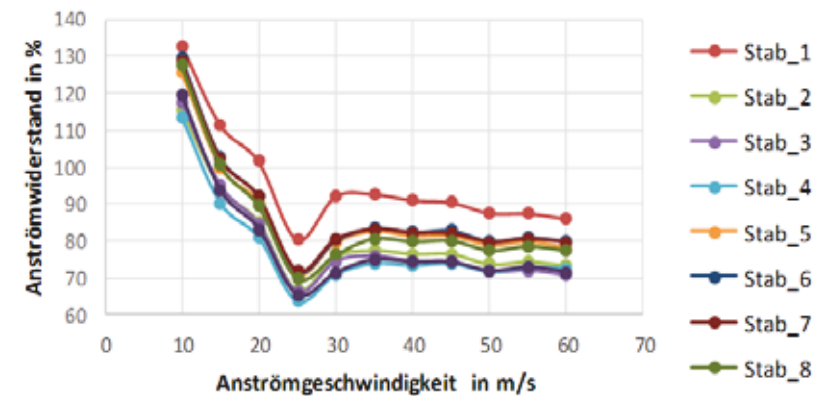


Abbildung 10: Anströmwiderstandskurven in Luft.

## Feldtests

Im Projekt sollte zum einen eine Erprobung der Entwicklungen auf ihre Unterwasser- und Einsatztauglichkeit hin stattfinden. Zum anderen sollte die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems nachgewiesen werden. Für diese Feldtests war es notwendig, mit einem geeigneten Schiff im angestrebten Einsatzumfeld, der Nordsee, und in typischen Wassertiefen der Kontinentalschelf-Offshore-Förderung zu testen. Das GEOMAR organisierte und stellte dafür das Forschungsschiff FS ALKOR und Schiffszeiten sowie wissenschaftliches Equipment für die Referenzmessungen zur Verfügung. Während der Ausfahrt AL 436 im Mai 2014 sollte der erste System-Prototyp in einem Gebiet mit starken Methanaustrittsquellen erprobt werden. Dafür wurde die sogenannte Well site 22/4b in der britischen AWZ ausgewählt, da dort seit einem Blowout im Jahr 1990 ein permanenter Gasaustritt vom Meeresboden in die Atmosphäre stattfindet [7]. Während der Fahrt wurden auch eine Vielzahl von parallelen CTD-Messungen durchgeführt, um einerseits Testdatensets für die Software zu erzeugen und andererseits Referenzmessungen für die profilierenden FlexMoT-Instrumente zu erhalten. Nach Trockentests des kompletten zweiten Prototyps inklusive der Datenübertragungspipeline mit GSM-Kommunikation wurde das System dann während der Ausfahrt AL 459 erneut im Feld getestet. Diese Erprobung fand im Juli 2015 in einem Arbeitsgebiet im südlichen Kosterfjord (Schweden), nahe der Insel Ramsö statt [8]. Anschließend wurde dieser Prototyp auch in einem Gebiet nahe Boknis Eck in der südwestlichen Ostsee erprobt. Bei diesen Tests wurden nicht nur die Deployment- und Release-Konzepte, sondern auch der Datentransfer von

der Basisstation am Meeresboden zum Datenempfangsserver mit den entwickelten Datenkurieren erprobt.

### Zusammenfassung

Die im Projekt FlexMoT durchgeführten Arbeiten und insbesondere der entwickelte Prototyp tragen dazu bei, im Sinne der förderpolitischen Ziele, die Entwicklung sicherer, wirtschaftlicher und intelligenter Systeme zur Überwachung, Monitoring und Inspektion im Meer voranzutreiben. Wie die im Rahmen von FlexMoT entwickelten Komponenten und insbesondere auch die Feldtestergebnisse zeigen, wird die Entwicklung intelligenter Systeme für die Meerestechnik zunehmend an Bedeutung gewinnen. Der verfolgte Ansatz und Systemgedanke, die einzelnen mechanischen, Sensor- und Software-Elemente eines solchen Systems ganzheitlich zu betrachten, ist vielversprechend und zeitgemäß. Auch in der Zukunft gilt es die Zuverlässigkeit und Robustheit von Monitoring-Systemen weiter zu erhöhen. Gerade in Zeiten niedriger Öl- und Gaspreise sind innovative Technologien gefragt.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Projektes sowie für die hervorragende Betreuung durch den Projektträger Jülich (ptj), namentlich bei Frau Dipl.-Ing. Barbara Grothkopp und Karla Haller.

### Literatur

- [1] M. Kühn, „Konzept und Prototyp für eine Daten- und Energieübertragungsstrecke in Meerwasser bei 150 bar Außendruck, master thesis, Kiel University of Applied Sciences, Kiel, 2013.
- [2] J. Behr, P. Eschler, Y. Jung and M. Zöllner, “X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model,” Proc. 14th Int. Conf. 3D Web Technol. (Web3D ,09), pp. 127-135, 2009.
- [3] T. Ruth, S. Audersch, L. Huber, U. von Lukas and J. Zabel, „Using direct-touch interaction for the visual exploration of profiling sensor data.“ Proc. OCEANS '15 MTS/IEEE GENOVA, pp. 1-8, 2015.
- [4] T. Ruth, S. Audersch, S. Kluge, U. von Lukas, “From sensor to situational awareness - An extensible software approach for the integrated management and visualization of environmental monitoring”, Proc. OCEANS '16 MTS/IEEE MONTEREY, 2016.
- [5] T. Ruth, M. Kühn, S. Audersch, V. Nuppenau, U. von Lukas, F. Appel and G. Schriever, “FlexMoT – A flexible and adaptable environmental monitoring platform for offshore applications”, Proc. OCEANS '16 MTS/IEEE MONTEREY, 2016.
- [6] O. Pfannkuche, „Short Report ALKOR Cruise No. 436: Field Tests of a novel Flexible Longterm Monitoring Tool (FlexMoT) at a benthic methane source in the northern North Sea, Kiel – Kiel: 02. - 09. 05. 2014,“ GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany, 2014.
- [7] S. Flögel, „Short Report ALKOR Cruise No. 459: Field Tests of a Flexible Longterm Monitoring Tool (FlexMoT) in the southern Kosterfjord, eastern Skagerrak, Kiel – Kiel: 03. - 09. 07. 2015,“ GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany, 2015.

## SMIS – Subsea Monitoring via Intelligent Swarms

Förderkennzeichen: 03SX348

Dr. Sven Hoog, Alexander Schormayer  
(IMPaC Offshore Engineering GmbH, Hamburg)  
Dr. Carl Thiede, (ENITECH Energietechnik - Elektronik GmbH, Bentwisch)  
Martin Kurowski, Erik Rentzow, Detlef Dewitz, Matthias Wulff,  
Prof. Bernhard P. Lampe, Prof. Torsten Jeinsch  
(Universität Rostock, Institut für Automatisierungstechnik)  
Sebastian Ritz, Florin Boeck, Matthias Golz, Prof. Gerd Holbach  
(Technische Universität Berlin, Institut für Land und Seeverkehr)  
Sergej Neumann, David Oertel,  
(Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozesskontrolle und Robotics)  
Prof. Joanna J. Waniek, Dr. David Kaiser  
(Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde)

### Zusammenfassung und Motivation

Das Projekt SMIS - Subsea Monitoring via Intelligent Swarms – befasste sich mit der Entwicklung eines innovativen Systems zum effektiven Monitoring großer Unterwasser-Areale, wozu Team-, bzw. Schwarmtechnologie genutzt wurde. Das Projekt wurde durch die Firmen IMPaC Offshore Engineering GmbH aus Hamburg (Projektkoordination), der Enitech GmbH aus Bentwisch, dem Institut für Automatisierungstechnik der Universität Rostock, dem Institut für Prozesskontrolle und Robotics (IPR) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), dem Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme der Technischen Universität Berlin sowie dem Leibniz Institut für Ostseeforschung, Warnemünde (IOW), bearbeitet. Die Förderung des Projektes begann am 01.01.2013 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Laufzeit war 42 Monate.

Im Projekt SMIS haben sich Ingenieure und Wissenschaftler zusammen gefunden, innovative Konzepte für das autonome Monitoring und die Erkundung der Unterwasserwelt auf Basis druckneutraler Technologie sowie von Teamalgorithmen zu entwickeln. Die Kernmodule der SMIS Entwicklungen lauten wie folgt [1]:

- ein Unmanned Surface Vehicle (USV), das als Relais-Station die Kommunikation von Land (via Satellit) oder vom Einsatzschiff zu den Missions-AUVs und der Seebodenstation (SBS) ermöglicht (verantwortlicher Partner: Uni Rostock)



- zwei Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) speziell konzipiert um Langstreckenerkundungen durchzuführen; Einsatzwassertiefe bis 6000m (verantwortlicher Partner: Enitech)
- eine autonome Seeboden-Station (SBS), ausgerüstet um die AUV-Batterien am Seeboden aufladen zu können, wodurch die AUVs deutlich längere Missionszeiten erzielen können; Einsatzwassertiefe bis 6000 m (verantwortlicher Partner: TU Berlin)
- eine Software zur Missionsplanung und -simulation, um sichere und effiziente Einsätze der SMIS Fahrzeuge sicherzustellen (verantwortlicher Partner: KIT)
- FEM Analysen für alle SMIS Fahrzeuge sowie die Dokumentation der Fahrzeuge, um sicherzustellen, dass diese die geltenden Vorschriften und Regelwerke einhalten; Gesamtprojektkoordination (verantwortlicher Partner: IMPaC)
- Wissenschaftliche Motivation für die Durchführung von Seekampagnen mit wissenschaftlichen Zielstellungen und zur Fahrzeugerprobung in der Ostsee und dem Nordost-Atlantik (verantwortlicher Partner: IOW)

Das SMIS Fahrzeugteam nutzt das Prinzip der Schwarm'intelligenz', doch gehören besonders auch die Langstreckentauglichkeit und die Einsetzbarkeit bis in 6000 m Tiefe zu den wichtigen Alleinstellungsmerkmalen des SMIS Systems.

Die im Projekt erstellten Schwarmalgorithmen basieren auf komplexer und modernster Kommunikationstechnik (Hardware und Software) und ermöglichen die Interaktion der Fahrzeuge untereinander, zwischen dem Einsatzschiff und dem USV, das als Relais-Station zwischen Über- und Unterwasser dient, sowie den AUVs und der SBS.

Das modulare Design des SMIS Systems erlaubt die missionsabhängige Konfiguration jedes SMIS Fahrzeugs, so dass sowohl wissenschaftliche als auch kommerzielle maritime Anwendungen adressiert werden können. Potentielle Märkte des SMIS Systems liegen demnach in den Bereichen Ressourcengewinnung, Hydrographie, Kabellegung und Pipelineverlegung, sowie der Überwachung der Unterwasserstrukturen der Offshore-Wind Industrie. Der hier genutzte Ansatz der Schwarmtechnologie wird die Effektivität der Unterwasserkampagnen deutlich erhöhen können und damit die Kosten für die Schiffseinsätze reduzieren helfen.

Die SMIS Fahrzeuge und Prozeduren wurden soweit wie möglich getestet, sowohl in Wassertiefen bis 200 m in der Ostsee aber auch während mehrerer Tiefwassermissionen im Nordost-Atlantik. Weitere Tests erfolgten in der Schlepprinne der TU Berlin und im Bodensee, um Teilaspekte und das gesamte SMIS Team zu erproben.

Im Folgenden wird das SMIS Konzept, die Entwicklungsgrundlagen und -strategien sowie die Erprobungen auf See vorgestellt, weitere Informationen sind auf der Projektwebseite unter [www.smis-monitoring.de](http://www.smis-monitoring.de) einzusehen.

### Autonomes Oberflächenfahrzeug (USV - Unmanned Surface Vehicle)

In der SMIS Flotte fungiert das USV als Kommunikationsknoten zwischen den Über- und Unterwasserkomponenten des SMIS Systems. Zu den Unterwasserfahrzeugen wird eine akustische Kommunikationsstrecke und zu der Leitwarte werden verschiedene terrestrische Funk- oder Satellitenverbindungen verwendet. Die verwendeten Technologien innerhalb des SMIS Systems ermöglichen einen Betrieb bis zu einer Woche, d.h. für das USV auch bei schlechten Wetterbedingungen. Folgerichtig waren die wichtigsten Entwicklungsaufgaben, bezogen auf das USV, ein hochseetüchtiges Fahrzeug mit einer effizienten und geräuscharmen Stromversorgung zu entwerfen und ein Fahrzeug-Automatisierungssystem zu realisieren, um ein hohes Maß an Autonomie zu erreichen.

Beim Entwurf des USV, lag der Fokus auf der Entwicklung eines Fahrzeugs mit reduzierten Bewegungen im Seegang, um eine zuverlässige akustische Kommunikationsverbindung bis zu einer Tiefe von 6000 m sicherzustellen [1]. Demzufolge wurde, angelehnt an das Small-Waterplane-Area-Konzept (SWA), ein flachgetauchter Rumpf mit drei die Wasseroberfläche durchstoßenden Türmen entworfen. Mit Ausnahme von drei Abteilen ist der Rumpf geflutet, wodurch zum einen ein selbstaufrichtendes Moment bei Überspülung und Kenterung generiert wird und zum anderen das Gewicht trotz der größeren Verdrängung minimiert wird.



Abbildung 1: Schnittdarstellung des USV (links); Manövrierversuche im Rostocker Hafen (rechts) (Quelle: Universität Rostock)

Die Untersuchung eines Konzepts mit einem getauchten Rumpf und einem Turm, wie es bereits bei anderen USV umgesetzt wurde, führte zu einer dynamischen Tauch- und Nickinstabilität in Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge und der Betriebsgeschwindigkeit. Daher wurde der einzelne Turm in drei Stützen aufgeteilt, die den Wasserfluss über den getauchten Körper leiten und zusätzlichen Auftrieb am Bug erzeugen. Auf diese Weise konnte die kritische Geschwindigkeit über die angestrebte Betriebsgeschwindigkeit von 4 Knoten angehoben werden [3]. Das hydrodynamische Verhalten wurde mit CFD-Methoden analysiert und in Freifahrtversuchen im Schlepptank der TU Berlin ausgewertet [4]. Abbildung 1 zeigt den finalen Entwurf des USV in der Schnittdarstellung sowie bei Manövrierversuchen im Hafen von Rostock.

Das Fahrzeug wurde entwickelt, um mehrere Tage autonom zu operieren. Folglich war die Automatisierung und autonome Steuerung des Fahrzeugs eine wesentliche Herausforderung, um die Zuverlässigkeit des gesamten SMIS Systems zu gewährleisten. Es wurde ein dezentrales Automatisierungskonzept erarbeitet und realisiert, welches die verschiedenen Komponenten und Geräte funktionell und örtlich trennt. Aufgrund der Schnittstellenvielfalt der Peripherie wurde das Schnittstellenhandling vom Bordcomputer, einem Industrie-PC, entkoppelt und ausgelagert. Dazu wurden verschiedene Schnittstellen im Multiplex-Verfahren gebündelt, in einem definierten Protokoll zusammengefasst und per Fahrzeug-Bus, in diesem Falle ein „Power-and-Ethernet“ (PaE) Bus, an die jeweiligen Busknoten verteilt. Innerhalb des Automatisierungssystems des USV wurden vier Grundmodule für (A) GNC - Planung und Führung (Guidance), Navigation sowie Steuerung und Regelung (Control), (B) Telemetrie, (C) die Energieverteilung und (D) Nutzlast definiert. Beim Ausfall bestimmter Module bleibt das Gesamtsystem funktionsfähig, was die Zuverlässigkeit deutlich erhöht. In dieser Weise werden alle in das SMIS System integrierten Sub-Systeme, ob über oder unter Wasser, als dedizierte Knoten behandelt und über ein neu entwickeltes einheitliches Daten- und Kommandohandling angebunden.

Das Energieversorgungssystem des USV basiert auf einem leistungsstarken hybriden Konzept, da das Fahrzeug für Langzeiteinsätze auch unter Verwendung performanterer Nutzlasten eingesetzt werden soll. Neben der Primärversorgung mit Lithium-Polymer Batterien (12 kWh) für Operationen bis zu zehn Stunden, kann eine Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) zugeschaltet werden, welche die Einsatzzeit auf bis zu sieben Tage erhöht. Dieses Hybridkonzept gewährleistet eine permanente Energieversorgung der Stellaggregate (Propulsion und Ruderdüse), des Automatisierungssystems und der variablen Nutzlast, wie dem Akustikmodem, einem Multi-Beam Sonar oder einem Sub-Bottom-Profilier.

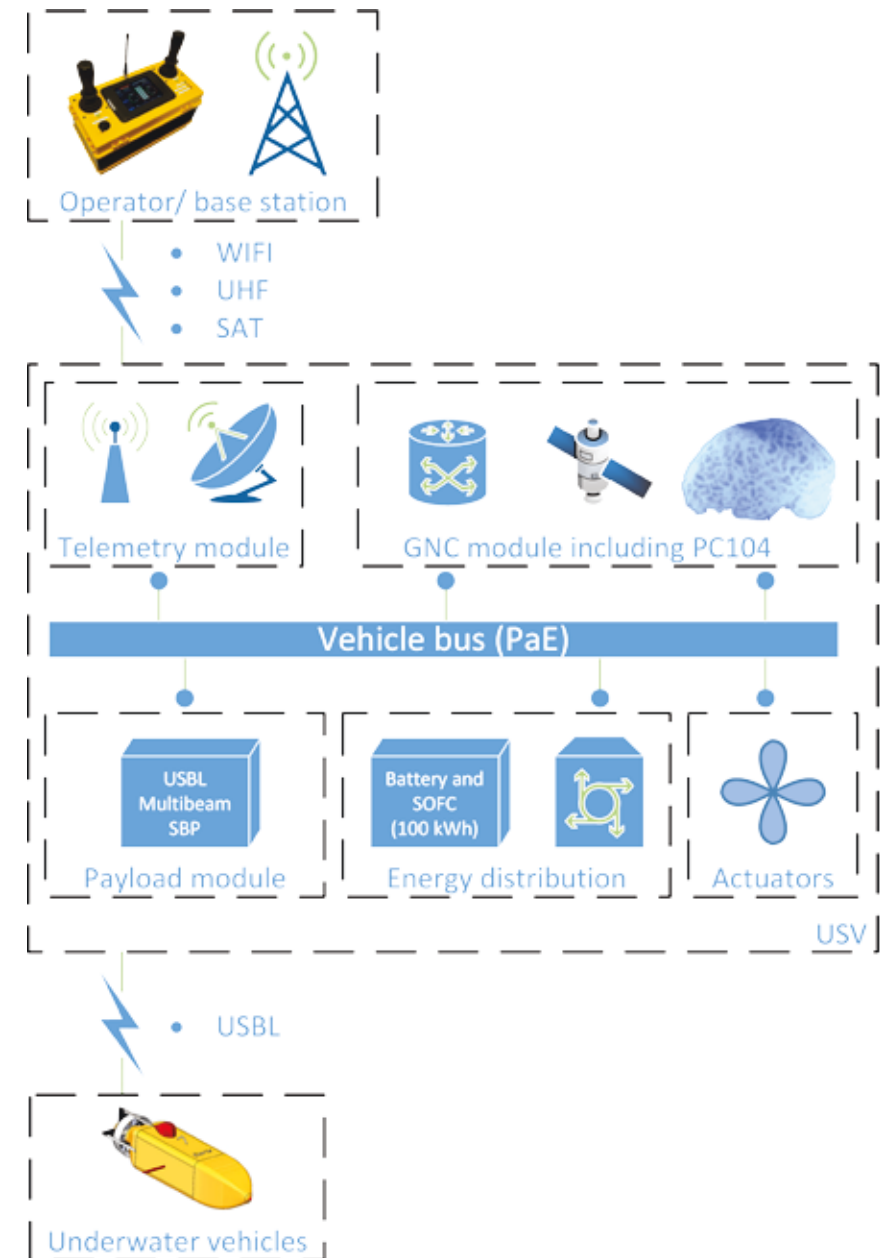


Abbildung 2: Automatisierungs- und Telemetrie-Konzept des USV (Quelle: Universität Rostock)

Das GNC-Modul ist mit einem Industrie-PC (Betriebssystem Simulink Real-Time) ausgestattet und verarbeitet alle Sensordaten, berechnet eine optimale Position oder Bahn unter impliziter Nutzung des Dynamikmodells

des Fahrzeugs und führt die Algorithmen der Low-Level-Regelung aus [5]. Für die Bestimmung von Position, Lage und Geschwindigkeit ist das USV mit zahlreichen Sensoren ausgestattet, darunter ein differentieller Mehrfrequenz-Satellitenempfänger (Multi-(D)GNSS System), ein Attitude Heading Reference System (AHRS) sowie ein Doppler Velocity Log (DVL) zur dualen Geschwindigkeitsmessung gegenüber dem umgebenden Wasser und gegenüber dem Meeresboden.

Das Telemetriemodul wird für die Realisierung der Luft- (WiFi, UHF, Iridium) zu-Wasser Kommunikation benötigt. Für die Unterwasserkommunikation und zur Lokalisierung der Unterwassergeräte des SMIS Systems ist das USV mit einem Niederfrequenz-Akustikmodem ausgestattet. Diese Modems nutzen Ultra Short Base Line (USBL) Technologie für die Bestimmung der Position des Kommunikationspartners.

Aufgrund der Autonomieanforderungen und des sich potentiell im Schiffsverkehr bewegenden USV, müssen drohende Kollisionen erkannt und verhindert werden. Dazu ist das Fahrzeug mit einem AIS-Empfänger (Automatic Identification System) ausgestattet. Unter Nutzung der AIS-Daten prädiziert das Kollisionserkennungssystem die Bahnverläufe der Schiffe in der Umgebung und kann so frühzeitig Anpassungen des Missionsverlaufes planen und zur Ausführung freigeben. Zusätzlich wird ein Nahbereichsradar zur Detektion und Verfolgung von Treibgut oder kleineren Fahrzeugen ohne AIS-System verwendet, um Gefährdungen im direkten Fahrzeugumfeld zu vermeiden.

### **Autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs - Autonomous Underwater Vehicles)**

Die Entwicklungen der SMIS AUVs basieren auf den Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten, in denen ENITECH Unterwasser-Fahrzeuge entwickelt, ausgerüstet und getestet hat. Die AUVs wurden so entwickelt und ausgerüstet, dass sie den Anforderungen der Basis of Design des SMIS Projektes gerecht werden. Eine maximale Missions - Wassertiefe von 6.000 m kann somit definitionsgemäß erreicht werden, was einem Druck von 600 bar und einer Betriebsdauer von mehr als 20 h entspricht. Die Länge der Fahrzeuge beträgt 3,6 m und die Masse etwa 1 t.

ENITECH entwickelte, baute und testete die Energie- und Antriebssysteme sowie das gesamte Softwarepaket für Bedienung und Anwendung der AUVs, die in drei Sektionen unterteilt wurden: Bug, Mittelsektion und Heck. Dies erlaubt es, einzelne Funktionen und Baugruppen für die einfache Wartung oder den Austausch, bestimmten Sektionen zuzuweisen.

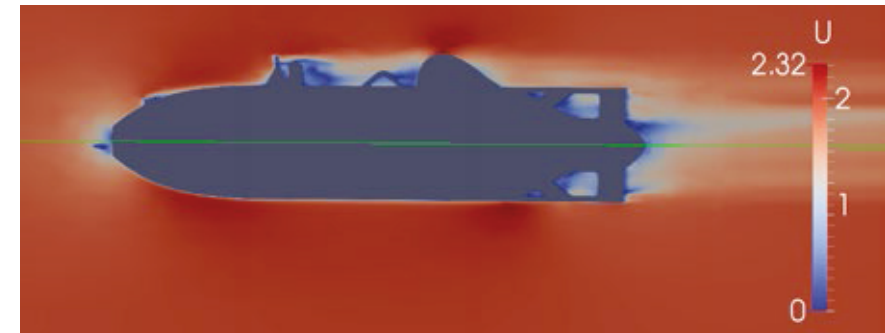


Abbildung 3: CFD-Analyse der Umströmung der AUVs 'Doris alpha und beta' (Widerstandskoeffizienten, Druck-, und Geschwindigkeitsverläufe) (Quelle: Enitech)

Die Mittelsektion hat einen nahezu rechteckigen Querschnitt und bietet daher viel Platz für Geräte, Batterien und Nutzlast. Die Bug- bzw. Hecksektionen haben einen runden Querschnitt, was insgesamt bei Computational Fluid Dynamic (CFD) -Analysen zu einem Widerstandskoeffizienten von 0,2 führt (Abbildung 3).

Der innere Rahmen des gefluteten Fahrzeuges besteht aus nichtrostendem Stahl. Die Konstruktion ist eine sehr kostengünstige Herstellungsvariante, die gleichzeitig sehr steif ist, was FEM-Analysen bestätigen. Somit war es nicht notwendig, auf teureres Aluminium umzusteigen. Weitere Rahmenteile bestehen aus sehr leichtem und kostengünstigem Kunststoff. Einige der verwendeten Kunststoffe haben eine geringere Dichte als Wasser und tragen somit zum Auftrieb des Fahrzeugs bei. Die Verknüpfung von Stahl- und Kunststoffkonstruktion erlaubt eine einfache, leichte und vor allem wirtschaftliche Gesamtkonstruktion.

Die obere Hälfte der AUVs ist mit syntaktischem Schaum mit einer Einsatztiefe von 6.000 m zur Erzeugung von Auftrieb gefüllt. Der untere Teil der Mittelsektion ist der Energieversorgung in Form von Batterien vorbehalten und definiert damit den benötigten tiefen Schwerpunkt der AUVs. Die Batteriekapazität beträgt 20 kWh pro AUV.

Alle elektronischen Komponenten aus der Produktion von ENITECH sind „druckneutral“ ausgelegt, so dass keine Druckkörper erforderlich sind, um dem enormen Wasserdruck während des Tauchens zu widerstehen. Da durch diese Technologie keinerlei Druckgradienten innerhalb der Baugruppen auftreten können, sind auch keine Dichtungen notwendig. Das erlaubt wiederum das Positionieren der elektronischen Bauteile in einer kompakten Art und Weise, mit einem resultierenden reduzierten Gesamtgewicht im Vergleich zu Systemen mit herkömmlichen Druckkörpern.

Für den Antrieb der AUVs ist ein von ENITECH entwickelter permanenterregter, bürstenloser Gleichstrommotor mit einer Maximalleistung von 2,5 kW vorgesehen. Der Hauptantrieb wird von einer 110 VDC Spannungsebene im Fahrzeug versorgt. Die ebenfalls von der ENITECH neu entwickelten Antriebe für die Ruder, die auf einem ähnlichen Konzept wie der Hauptantrieb beruhen, arbeiten im Heck des Fahrzeugs.

Je nach Missionsauftrag können unterschiedliche Sensoren in den unteren Teil der Bug-Sektion oder auch den Seiten der Mittelsektion integriert werden, z.B. CTD, DVL, INS oder auch ein Side-Scan-Sonar. Die Integration eines Imaging Sonars und von Kameras ist ebenfalls möglich. Unter einer strömungsoptimierten Haube befinden sich die Hauptkommunikationsinstrumente wie das akustische Modem mit USBL Funktionen sowie WLAN (Abbildung 4).

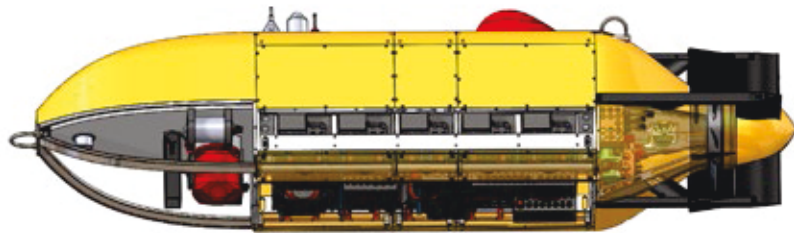


Abbildung 4: AUV 'Doris alpha' mit geöffneten Kompartments für Nutzlast, Batterie und Antriebssystem (Quelle: Enitech)

Die zuvor aufgezählten Messinstrumente können von kommerziellen Anbietern erworben werden, z.B. Evologics, Seabird oder Teledyne, doch gehörte dies nicht zum Umfang des SMIS Projektes. Die Instrumente machen es möglich, gezielt bestimmte hydrologische Parameter zu messen oder auch adaptiv nach gescannten Strukturen zu navigieren.

Um an der Wasseroberfläche kommunizieren zu können verwenden die AUVs WLAN- und Radio-Signale. Die zugehörige Ausrüstung ist auf der oberen Seite des AUVs platziert. Die Unterwasser-Kommunikation basiert dagegen auf akustischen Systemen mit USBL Technologie. Die Geräte sind ebenfalls auf der Oberseite des Fahrzeugs platziert.

Im Rahmen des Projektes entwickelte ENITECH ein druckneutrales Telemetriesystem, welches über LAN diverse analoge und digitale Signale nach den RS232 oder RS422 Protokollen ansprechen kann. Das Telemetriesystem ist über die Kommunikationskanäle mit der Außenwelt verbunden. Es ermög-

licht es ein Kommunikationssystem aufzubauen, welches sich selbstständig um Antriebssysteme, Energieversorgung, Kommunikation und wichtige Sensoren kümmert. Die Stromversorgung dieses Systems ist redundant an zwei Batterien angeschlossen. Somit ist theoretisch immer eine Kommunikation und Standortbestimmung (USBL) möglich.

Die Bedienungssoftware von ENITECH ermöglicht es dem Benutzer Motoren und Ruder zu starten und zu stoppen und die Kommunikation mit anderen Subsystemen zu überwachen. Auf diese Weise können manuelle Operationen (HROV-Mode) sowie einfache vordefinierte Operationen durchgeführt werden. Die Anstellung der Ruder wird durch eine Software (PI-Regler) geregelt. Fehler in dem Antriebs- oder Energieversorgungssystem werden dem Benutzer über die Telemetrie unverzüglich angezeigt.

Das AUV 'Doris alpha' wurde bei mehreren Flachwassertests im Hafen von Rostock und in der Ostsee bis 250 m erprobt, bevor auch Tiefwassertests bis 1.000 m Tiefe (ca. 100 bar) im Nordostatlantik erfolgreich durchgeführt werden konnten. Diese wichtigen Offshore-Tests schon während der Projektlaufzeit haben Probleme aufgezeigt und gaben Anlass zu einigen Verbesserungen, konnten aber alle Grundfunktionen erfolgreich bestätigen. Dies konnte auch bei den finalen Gesamtsystemtests im Bodensee (bis 200 m Tiefe) in Kooperation aller SMIS Fahrzeuge eindrucksvoll demonstriert werden.

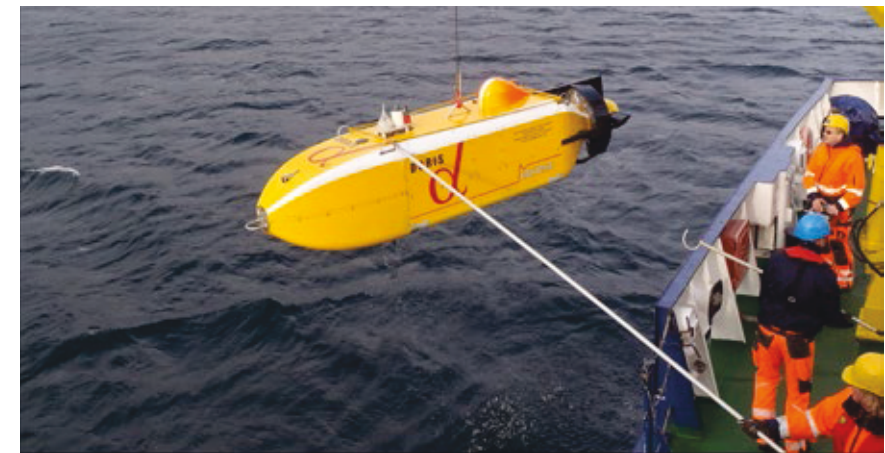


Abbildung 5: AUV 'Doris alpha' während Seeerprobungen (Quelle: Enitech)

### Tiefsee-Bodenstation (SBS - Seabed Station)

Die Entwicklung der SMIS Bodenstation war ein Schwerpunkt der Arbeiten der Technischen Universität Berlin. Die SBS dient als autonomer Energiespeicher und zur redundanten Datenspeicherung während einer Explorati-

onsmission. Die Bereitstellung zusätzlicher Energie für die AUVs auf dem Meeresgrund ersetzt deren langwieriges und energieintensives Auftauchen und Abtauchen, welches ansonsten zur Aufladung der AUV-Akkumulatoren auf dem Operationsschiff im Laufe einer Mission notwendig wäre. Zu diesem Zweck verfügt die SBS über 100 kWh elektrischer Energie in Form von aufladbaren Lithium-Polymer Akkumulatoren. Durch die Unterwasser-Aufladung kann die Effektivität des Gesamtsystems, im Vergleich zu heutigen Unterwasserfahrzeugen, somit deutlich gesteigert werden. Des Weiteren dient die Bodenstation als feste, geo-referenzierte Navigationsmarke für die AUVs, wodurch deren Navigationsgenauigkeit verbessert wird.

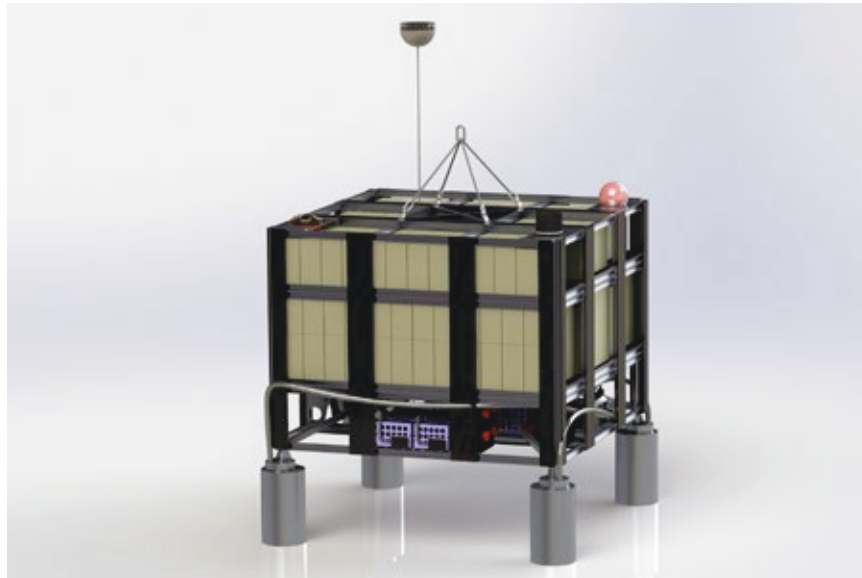


Abbildung 6: Basismodul der SBS mit vier Sauganker-Füßen (3D CAD Modell) (Quelle: TU Berlin).

Die Tiefseebodenstation benötigt nach Missionsbeginn keinen weiteren Eingriff in den Ablauf: Während des freien Falls durch die Wassersäule bis in 6.000 m Wassertiefe, sowie beim automatisierten Landeverfahren, der Missionsdurchführung und dem abschließenden Aufstieg zur Wasseroberfläche, agiert die Bodenstation autonom. Durch den freien Fall der SBS kann das gesamte SMIS System auf große Schiffswinden mit 6.000 m Kabel verzichten, wodurch vor allem die Systemkosten drastisch reduziert werden gegenüber kabelgebundenen Techniken, und zwar in Bezug auf Anschaffung, Mobilisierung, Transport und Wartung. Nach dem Aussetzen fällt die SBS frei durch die Wassersäule und fiert dabei ein Vorlaufgewicht. Dessen Aufsetzen auf dem Meeresgrund beendet den freien Fall, die SBS hat positiven Auftrieb und schwebt nun über dem Grund. Aus dieser Position können Sonarbilder, Fotos oder Videos gemacht und der potentielle Landeplatz bewertet werden.



Abbildung 7: Bodenstation kurz vor dem Aufsetzen am Grund des Bodensees (Quelle: Universität Rostock)

Die komprimierten Daten werden mittels eines akustischen MODEM an das Einsatzschiff gesendet, wo – im aktuellen Stand der Entwicklung - die Entscheidung zur Landung getroffen und das entsprechende Kommando an die Bodenstation gesendet wird (in Zukunft soll auch diese Entscheidung direkt durch den SBS-Missionsrechner erfolgen). Zur Landung wird nun das Vorlaufgewicht ‚eingeholt‘, wodurch sich die Station an den Grund (an das Gewicht) herunterzieht. Am Grund verankert sich die SBS mit Sauganker-Füßen im Sediment, um auch bei Strömung oder dem Andocken der AUVs die Position halten zu können [6]. Während der Erkundungs-Mission, können die AUVs ihre Akkumulatoren an der Bodenstation aufladen und die gesammelten Daten dort auch redundant speichern (Datentransfer über optischen Link). Nach erfolgreich durchgeführter Erkundung werden die Sauganker-Füße aus dem Grund gelöst (Umkehrung der Pumpwirkung) und ein variables Ballastsystem ermöglicht den freien Aufstieg zur Wasseroberfläche.

Während der Projektlaufzeit konnten alle Komponenten der Bodenstation unter anderem auf mehreren deutschen Forschungsschiffen, bspw. dem FS Poseidon, in bis zu 5.300 m Wassertiefe erfolgreich erprobt werden.

### Akustische Tiefsee-Kommunikation und Lokalisierung

Ein zentrales Problem langwieriger Unterwasser-Operationen (mit AUVs) ist die Lokalisierung und Geo-Referenzierung der Fahrzeuge ohne GNSS, wofür oftmals unterstützende Long Baseline (LBL) Transponder vor Missions-

start ausgesetzt und eingemessen werden. In SMIS wird stattdessen die flexiblere und schneller einsetzbare Technologie USBL benutzt, welche bereits vor Missionsstart auf den beteiligten Fahrzeugen installiert ist. Durch optional initiales Einmessen der SBS und durch GPS an der Wasseroberfläche sind die Positionen von SBS und USV jeweils bekannt und dienen den AUVs in ihrer Mission als örtliche Referenzpunkte. Über Sensormodelle werden die Sensor-Messdaten zur Navigation, inklusive USBL, in einem Zustandsfilter fusioniert, um die Positions- und Geschwindigkeitsdaten der Fahrzeuge zu bestimmen und präzise Manöver Unterwasser zu ermöglichen [7]. Zusammen mit einer integrierten Team-Kommunikations-Strategie wird so ein hoher Grad an Autonomie erreicht.

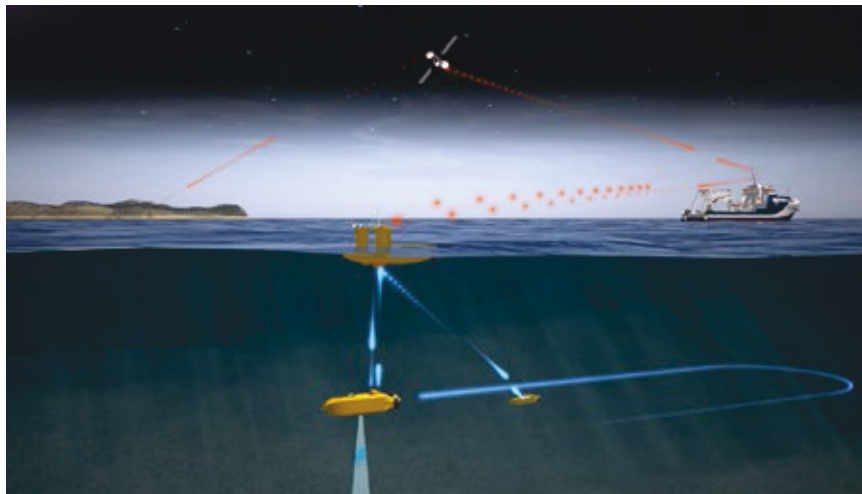


Abbildung 8: Illustration der verschiedenen Kommunikationswege innerhalb einer Mission (Quelle: IMPaC)

### Missionsplanung und Simulation

Mittels umfangreicher Simulationswerkzeuge, die im SMIS Projekt entwickelt und integriert wurden, können Missionspläne bereits vor dem Aussetzen der Fahrzeuge geprüft und verbessert werden. Ein vom Operator geänderter bzw. entsprechend der Randbedingungen angepasster Plan kann damit schnell erneut evaluiert werden. Anschließend werden die Missionspläne auf die Fahrzeuge geladen und vom Missionsregler ausgeführt. Eine Übersicht über die Architektur der semi-autonomen High-Level-Steuerung kann Abbildung 9 entnommen werden; ein Eindruck der Visualisierung der Missionsplanung ist in Abbildung 10 zu sehen.

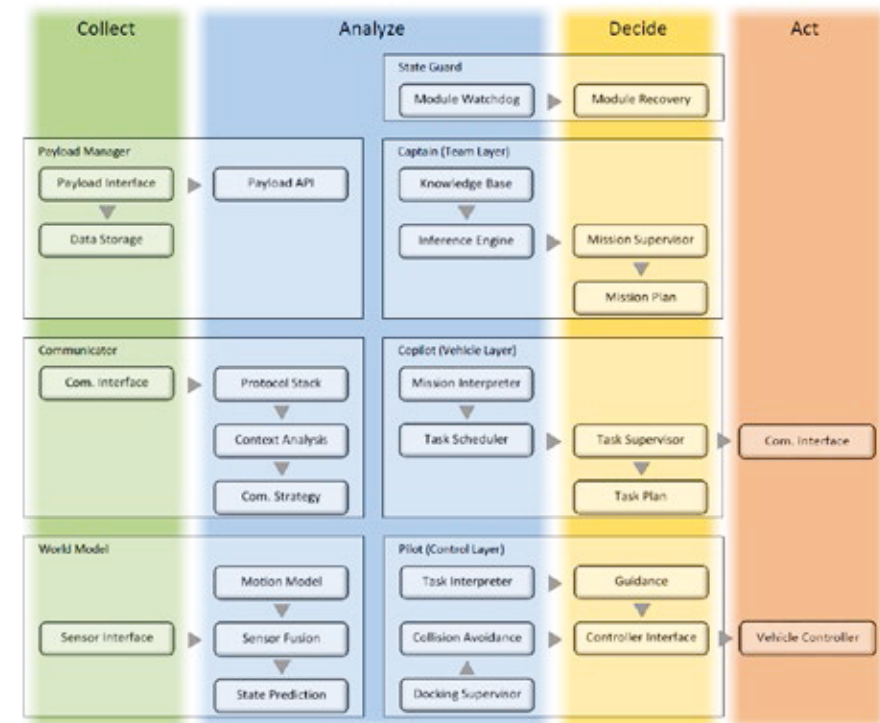


Abbildung 9: Modulare High-Level-Steuerungs-Architektur der SMIS-Fahrzeuge, gruppiert nach der üblichen Autonomie-Schleife Sense-Plan-Act (Quelle: KIT)

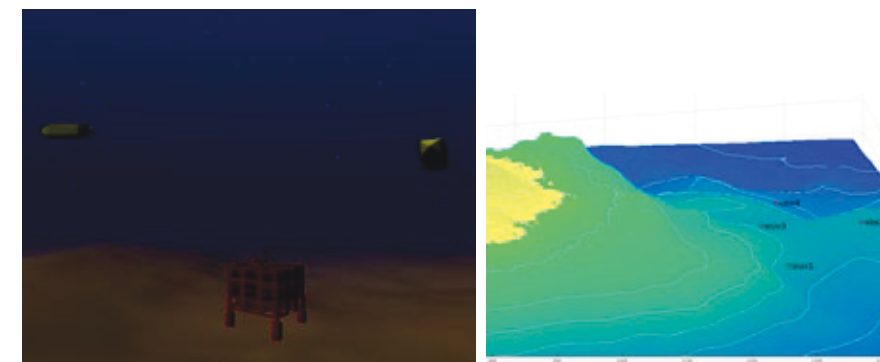


Abbildung 10: Simulation einer SMIS-Mission: Physikalische Darstellung/Simulation (links), abstrahierte Übersichtsdarstellung (rechts) (Quelle: KIT)

## Gesamtsystemerprobung am/im Bodensee

Die Erprobung des gesamten SMIS Systems mit allen drei Fahrzeugtypen, die im Projekt entwickelt wurden, fand im Mai 2016 im Bodensee statt. Die Versuche fanden aus Gründen der Logistik und der Genehmigung auf der Schweizer Seite des Bodensees statt, was sich besonders wegen der sehr guten Einsatzbedingungen als ideales Erprobungsgebiet erwies. Die bereits in der Tiefsee einzeln erprobten SMIS Fahrzeuge konnten hier erstmals als Gesamtsystem im Verbund getestet werden, und auch die verschiedenen Simulationen, Prognosen und Algorithmen konnten validiert werden. Neben der generellen Funktionsfähigkeit der Komponenten wurden speziell die Erwartungen an die Fahrzeugregelung und die Interaktion der Fahrzeuge untereinander sogar noch übertroffen. Nach einigen sequenziellen Tests konnte eine vollständige Erkundungsmission erfolgreich ferngesteuert initiiert und durchgeführt werden, und so der Nachweis der geforderten Team-Effektivität erbracht werden. Zu Beginn der Mission wurden alle drei Fahrzeugtypen vom Einsatzschiff ausgesetzt. Nachdem die Bodenstation kontrolliert auf den Seeboden gesunken und dort gelandet war (Tiefe hier: 50 m), wurde sie vom Oberflächenfahrzeug durch Umkreisen akustisch eingemessen. Anschließend folgte das Oberflächenfahrzeug dem ebenfalls getauchten AUV, um die Navigationsgenauigkeit durch Geo-Referenzierung mittels akustischer Ortung zu erhöhen.

Alle entwickelten Fahrzeuge und Methoden konnten ihr erreichtes Leistungspotential, auch vor den kritischen Augen des Projektträgers, in hohem Maße unter Beweis stellen, und so die sehr guten Projektergebnisse demonstrieren.



Abbildung 11: SMIS- Abschlusserprobung des Gesamtsystems im Bodensee (Quelle: SMIS)

## Zusammenfassung

SMIS ist eine vielversprechende Entwicklung mit einem weiten Feld möglicher Märkte, die adressiert werden:

- die Offshore Öl- und Gas-Industrie,
- die Marine Bergbau-Industrie,
- die Langstrecken-Erkundung für unterschiedliche Linienbauwerke am Seeboden: Pipelines, Energie- und Kommunikationskabel,
- die Offshore Wind-Industrie.

Weitere, nicht-kommerzielle Anwendungen wie Hydrographie, marine Geowissenschaften und spezialisierte Langstreckenerkundungen wie z.B. die Suche nach Flugzeugwracks (Black-Boxen) können vom vorteilhaften SMIS Systemansatz profitieren.

Die Entwicklungen umfassen alle relevanten Einsatzphasen wie die Handhabung auf dem Arbeitsdeck des Schiffes, das Aussetzen und Bergen, die Landung auf dem Seeboden (SBS), und basieren auf ausführlichen FE-Analysen, CFD-Analysen, Simulationen, Tests in der Schlepprinne und schließlich mehreren – auch wissenschaftlichen - Testmissionen im Flachwasser (Ostsee und Bodensee) und im Tiefwasser (nordöstlicher Atlantik). Die Projektentwicklungen wurden dabei regelmäßig mit einem technischen Beirat, in dem Spezialisten der Firmen Fugro OSAE (Bremen), des DNV GL (Hamburg) und dem Institut GEOMAR (Kiel), kritisch diskutiert.

Das SMIS Projektkonsortium evaluiert gegenwärtig die notwendigen und möglichen nächsten Schritte sowie die geeignetste Marketingstrategie – kontaktieren Sie uns über die Projektwebseite [www.smis-monitoring.de](http://www.smis-monitoring.de).

## Danksagung

Die Autoren richten Ihren Dank den Mitarbeitern des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie des Projektträgers Jülich (PTJ) für die finanzielle und administrative Unterstützung des Projektes 'SMIS — Subsea Monitoring via Intelligent Swarms' (FKZ 03SX348).

Die Autoren bedanken sich besonders bei den Mitgliedern des technischen Beirats von Fugro OSAE, dem DNV GL und dem Institut GEOMAR sowie den am Projekt beteiligten Kollegen der Firmen Enitech, IMPaC sowie des KIT, der Universität Rostock, der TU Berlin und dem IOW.

Nicht vergessen wollen wir den Dank an die Kapitäne und die Mannschaften der Forschungsschiffe RV Poseidon, RV Alkor und RV Elisabeth Mann Borgese, für die unermüdliche Unterstützung bei den Seekampagnen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Hoog, S., Schormayer, A., Thiede, C., Niemeyer, J., Kurowski, M., Rentzow, E., Schubert, A., Jeinsch, T., Ritz, S., Boeck, F., Golz, M., Neumann, S., Oertel, D., Waniek, J., Kaiser, D.: Introducing SMIS – Subsea Monitoring via Intelligent Swarms, Ship & Offshore | 2016 | N°4
- [2] Kurowski, M., Rentzow, E., Dewitz, D., Jeinsch, T., Lampe, B.P., Ritz, S., Kutz, R., Boeck, F., Neumann, S., Oertel, D.: "Operational Aspects of an Ocean-Going USV Acting as Communication Node", in Proc. 14th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '15), Ulrichshusen, Germany, May 11-13, 2015, pp 486-498.
- [3] Ritz, S., Kurowski, M., Boeck, F., Golz, M., Dewitz, D., Rentzow, E., and Holbach, G.: Herausforderungen und Besonderheiten beim Entwurf eines USV (unmanned Surface Vehicle) für hydrographische Aufgaben. STG-Jahrbuch, Band 108(1), 2014, pp. 312-325.
- [4] Rentzow, E., Dewitz, D., Kurowski, M., Lampe, B.P., Ritz, S., Kutz, R., Golz, M., Boeck, F.: "Design and automation of an ocean-going autonomously acting USV", in Proc. MTS/ IEEE OCEANS '15 Conference, Genoa, Italy, May 18-21, 2015.
- [5] Kurowski, M., Rentzow, E., Ritz, S., Lampe, B.P., Jeinsch, T.: Modeling and Control of ASV acting as communication node for deep-sea applications. Proc. 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Trondheim, Norway, 2016, pp. 291-296.
- [6] F. Boeck, M. Golz, S. Ritz und G. Holbach, „SMIS - Subsea monitoring via intelligent swarms, design challenges of an autonomous seabed station,“ in Proceedings of the 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA, USA, 2014.
- [7] S. Neumann und D. W. H. Oertel, „Towards deep-sea monitoring with SMIS - Experimental trials of deep-sea acoustic localization,“ in ASSISTIVE ROBOTICS: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015, HangZhou, China, 2015.



## NAUTEK - Neue Wege bei der Reinigung von Abwässern an Bord von Kreuzfahrtschiffen

Förderkennzeichen: 03SX360

Stephan Köster (Leibniz Universität Hannover)

Elmar Dorgeloh

(Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V.)

Lutz Kretschmann

(FhG - CML - Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen)

Thilo Seibicke (AIDA Cruises)

Mark Grigo (Martin Membrane Systems)

### EINLEITUNG

Die Branche der Hochsee-Kreuzfahrten boomt. Ein Blick auf Deutschland zeigt, dass sich dort die Zahl der Kreuzfahrtgäste seit 1993 nahezu verzehnfacht hat<sup>1</sup>. In Kürze werden mehr als 2 Millionen Passagiere aus Deutschland erwartet. Das ungebremste Wachstum dieses Tourismuszweiges lenkt aber auch verstärkt den Blick auf die durch die Kreuzfahrtindustrie ausgelösten Umweltauswirkungen<sup>2</sup>. Im öffentlichen Fokus stehen derzeit die Abgasemissionen. Umweltrelevant sind aber auch das Abfall- und Abwassermanagement an Bord (Bundesregierung, 2015).

Derzeit bestehen zahlreiche unterschiedliche Anforderungen an die Entsorgung von Schiffsabwässern, jeweils in Abhängigkeit vom Seegebiet bzw. vom Abstand zur nächstgelegenen Küstenlinie sowie von der verfügbaren Abwasserreinigungstechnik an Bord. Besteht ein besonderer Schutzstatus für ein Seegebiet (MARPOL Special Area, z.B. Ostsee), sind bei der Abwasserreinigung zukünftig zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Nährstoffelimination zu erfüllen. Zunächst sind diese neuen Anforderungen im Kontext des MARPOL-Schutzgebietskonzeptes nachvollziehbar. Ihre Auswirkungen auf die Schiffstechnik sind jedoch erheblich. Selbst mit modernen Abwasserreinigungsanlagen an Bord lassen sich die neuen Verfahrensziele nicht zwangsläufig erreichen. Somit sind bereits verbaute Anlagen aufzurüsten bzw. im Markt angebotene Neusysteme entsprechend technisch zu konfigurieren.

<sup>1</sup>) (Angaben gemäß Deutschem Reiseverband: 1993 – 183.000 deutsche Passagiere, 1,69 Millionen Passagiere in 2013, 2,5 Milliarden Euro Wirtschaftsleistung, 1,77 Mio. in 2014, insgesamt 15,63 Millionen Übernachtungen, 2,7 Mrd EUR Wirtschaftsleistung, abrufbar unter [www.driv.de](http://www.driv.de)).

<sup>2</sup>) Für eine Case Study, wie die Kreuzfahrtbranche auf die wachsende Bedeutung des Themas Nachhaltigkeit, mit besonderem Bezug zum Abwassermanagement, reagiert, siehe Kretschmann, 2014.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte 3-jährige Vorhaben „Nachhaltige Aufbereitungstechnologien zur Abwasserreinigung & -wiedernutzung auf Kreuzfahrtschiffen“ (NAUTEK) stellte sich dieser Herausforderung und entwickelte einen innovativen Verfahrensansatz zur Integration der Nährstoff- bzw. Stickstoffelimination. Dieser Ansatz ermöglicht sowohl die Auslegung von Neuanlagen als auch bestehende Anlagen nachzurüsten. Darüber hinaus wurden in NAUTEK weitere Fragen wie bspw. das Auftreten von Mikroschadstoffen im Abwasser sowie Optionen der Abwasser- bzw. Grauwasserwiedernutzung untersucht. Für eine sachgerechte Ausgestaltung des Umweltschutzes an Bord wurden ferner bestehende und zukünftige Möglichkeiten der Reststoffentsorgung in Häfen in die Betrachtung einbezogen.

## ABWASSERBEHANDLUNG AN BORD VON KREUZFAHRTSCHIFFEN

Abschätzungen hinsichtlich des Abwasseraufkommens an Bord von Kreuzfahrtschiffen sind grundsätzlich schwierig und nicht allgemeingültig. Eine umfassende Auswertung hierzu verfügbarer Angaben aus der Wissenschaft sowie von Organisationen, Werften, Anlagenbauern und Reedereien lässt eine Abschätzung zu (vgl. Kretschmann et al., 2015). Somit lässt sich der Frischwasserverbrauch bzw. das Abwasseraufkommen an Bord von Kreuzfahrtschiffen mit einem durchschnittlichen Wert von insgesamt 251 Liter pro Person und Tag abschätzen (unterteilt in 31 Liter Schwarzwasser pro Person und Tag zzgl. 220 Liter Grauwasser pro Person und Tag, vgl. Köster et al., 2016). Bei einer durchschnittlichen Reisedauer von 8,8 Tagen produzieren allein die deutschen Kreuzfahrttouristen rund 4 Millionen Kubikmeter Abwasser pro Jahr. Dies entspricht einem Zehntel des weltweit an Bord von Kreuzfahrtschiffen erzeugten Abwassers in der Höhe von rund 40 Millionen Kubikmetern .

Die Reinigung von Abwasser ist ein mehrstufiger Prozess. Zunächst werden durch die mechanische Vorreinigung Feststoffe aus dem Abwasser entfernt. Anschließend werden biologische Verfahren genutzt, um gelöste Stoffe (Kohlenstoffverbindungen und Nährstoffe) abzubauen. In dem hierzu erforderlichen Bioreaktor ist eine sehr vielfältig zusammengesetzte Biozönose angesiedelt, die diese Aufgaben übernimmt. Je nach Reinigungserfordernissen können nicht alle biologischen Prozesse unter gleichen Rahmenbedingungen ablaufen, da für die einzelnen Prozessschritte teilweise unterschiedliche Milieus erforderlich sind. Beispielsweise kann die biologische Stickstoffelimination nur unter anoxischen Bedingungen abgeschlossen werden, nachdem das Abwasser zuvor unter aeroben Betriebsbedingungen vorbehandelt wurde. Dies hat oftmals zur Folge, dass im Rahmen der biologischen Abwasserreinigung mehrere Bioreaktoren genutzt werden, deren Betrieb aufeinander abgestimmt sein muss (vgl. Bild 1).

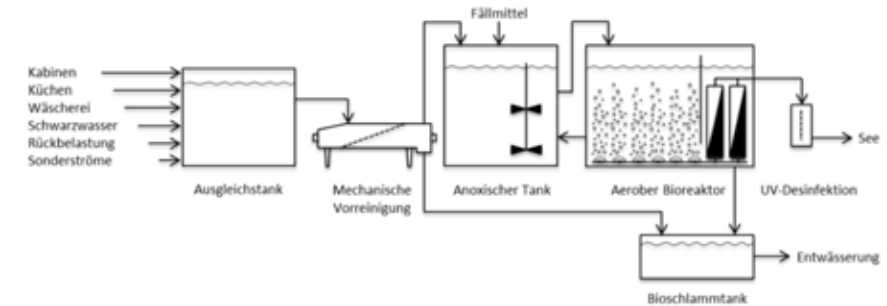


Abbildung 1: Konfiguration einer modernen Schiffskläranlage (Köster et al., 2016)

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Aufrechterhaltung der Reinigungsleistung von Bioreaktoren zum Zwecke der Abwasserreinigung ein umfassendes verfahrenstechnisches und biologisches Know-how erfordert. So bedarf es einer großen betrieblichen Umsicht, insbesondere wenn Abwassermengen und -zusammensetzungen stark schwanken. Die Komplexität der Aufgabe der Abwasserreinigung an Bord lässt sich auch daran ablesen, dass sich das Versprechen der Anlagenhersteller hinsichtlich wartungsfreier Anlagen oft als nicht erfüllbar erweist.

## ZIELE DES PROJEKTES NAUTEK

Zentrales Ziel des Verbundvorhabens NAUTEK war es, innovative Vorreiterkonzepte und -technologien zur Abwasserreinigung zu entwickeln und zu erproben, um die Abwasserreinigung an Bord angesichts verschärfter Anforderungen für einen verbesserten Schutz der Meere aber auch unter Berücksichtigung neuer Stoffproblematiken wie Arzneimittelrückstände im Abwasser zukunftsfähig zu gestalten. Im Einzelnen waren die Projektziele von NAUTEK:

- Durchführung einer umfassenden Situationsanalyse hinsichtlich der aktuellen Praxis des Abwassermanagements auf Kreuzfahrtschiffen.
- Die Entwicklung und Erprobung eines innovativen Verfahrensansatzes zur Stickstoffelimination bei der biologischen Abwasserreinigung (Intermittierende Denitrifikation) an Bord. Der Verfahrensansatz wurde so ausgelegt, dass die Möglichkeit besteht Bestandsanlagen nachzurüsten.
- Ausführliche Probenahmen und Analytik organischer Spurenstoffe sowie darauf aufbauend Entwicklung eines angepassten Verfahrenskonzeptes zur Elimination dieser Stoffe an Bord.

- Untersuchung der Umsetzbarkeit einer separaten oder integrierten Grauwasserbehandlung als aussichtsreiche Option für eine (Ab-)Wasserwiedernutzung an Bord.

## UNTERSUCHUNGEN UND ENTWICKLUNGSARBEITEN

Die Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten wurden innerhalb von drei Jahren ausgeführt. Die Arbeiten gliederten sich in folgende 5 Arbeitspakete (AP):

- AP 1: Situationsanalyse Abwassermanagement auf Kreuzfahrtschiffen
- AP 2: Entwicklung eines innovativen Anlagenkonzeptes
- AP 3: Aufbau und Testbetrieb des Versuchsanlage
- AP 4: Verifizierung der Anlagenleistungsfähigkeit an Bord
- AP 5: Beurteilung der Konzepte der Abwasseraufbereitung

Wie Bild 2 veranschaulicht, wurde in den Arbeitspaketen 3 und 4 die Verfahrensentwicklung durch die beteiligten Firmen verantwortet. Die Forschungseinrichtungen begleiteten die Entwicklung mit ihrer wissenschaftlichen Expertise. Die Arbeiten in den ersten zwei Jahren dienten der Vorbereitung einer mehrwöchigen Erprobungsphase der Pilotanlage an Bord eines Kreuzfahrtschiffes. Zusätzlich wurden zahlreiche weitere Arbeiten ausgeführt, die die Verfahrensentwicklung in den Gesamtkontext eines zukunftsorientierten (Ab-)Wassermanagements an Bord einbettete, wie die Aufstellung in Tabelle 1 belegt.

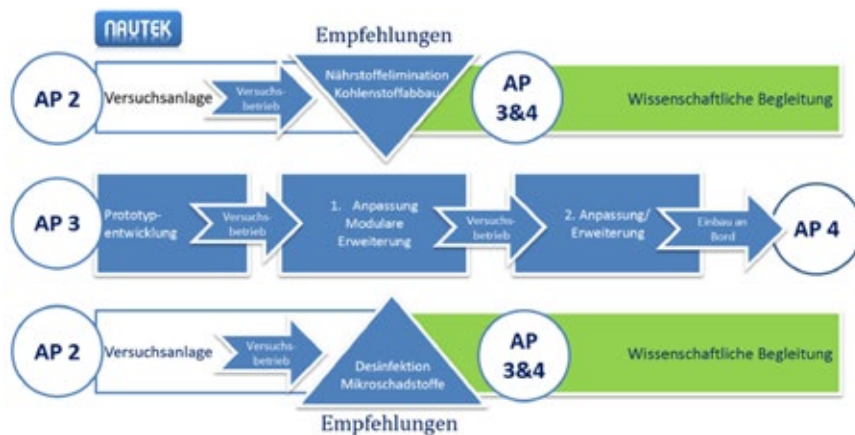


Abbildung 2: Vorgehen bei der Anlagenentwicklung im NAUTEK-Vorhaben

Tabelle 1: Übersicht über die Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten im NAUTEK-Vorhaben

Bereich	Arbeiten
Situationsanalyse	Beurteilung internationaler, nationaler und regionaler Vorschriften, Befragung maßgeblicher Akteure, eigene Datenerhebung (z.B. Probenahmen und Analytik von Abwasser-Standardparameter, vgl. auch Köster, 2015) und Zusammenführung in Kennzahlen;
Stickstoffelimination	Zusammenstellung von Kriterien für das Anlagendesign;  Entwicklung und Erprobung eines innovativen Anlagenkonzeptes zur Stickstoffelimination: Bau und Betrieb von Pilotanlagen, Durchführung von mehrmonatigen Versuchen sowohl an Land als auch auf See an Bord eines Kreuzfahrtschiffs;  Arbeiten zur Modellierung von Schiffskläranlagen;
Organische Spurenstoffe	Auswahl von Leitparametern, Durchführung von Abwasser-Probenahmen an Bord und substanzspezifischer Analytik. Darauf aufbauend Erprobung verschiedener Verfahrensansätze wie Hochdruckmembranen, Aktivkohle, Ozonierung sowie Definition von technischen Schnittstellen zur klassischen Abwasserreinigung;
Grauwasserwiedernutzung	Separate Beprobung des Grauwassers aus den Schiffswäschereien sowie Durchführung von Spurenstoffanalytik. Darauf aufbauend Untersuchungen zur Aufbereitung des Grauwassers aus dem Wäschereibetrieb mit besonderem Schwerpunkt auf der Spurenstoffelimination;
Übergreifend	Reflektion derzeit genutzter Kriterien der Anlagenzertifizierung im Abgleich mit den realen Betriebsbedingungen;  Analyse der „Adäquanz“ von Hafenauffangeinrichtungen für Abwasser & Evaluation der Entsorgungslogistik unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten;

Wie bereits einleitend erwähnt, war Kernelement des Vorhabens die Entwicklung und Erprobung eines neuen Anlagenkonzeptes, das bisher in Schiffskläranlagen noch nicht umgesetzt wurde. So wurde der mehrstufige Prozess der biologischen Stickstoffelimination vollständig in das Belebungsbecken integriert, sodass kein separater Tank bzw. Bioreaktor für den Stickstoffrückhalt erforderlich ist. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass der letzte Schritt der biologischen Stickstoffelimination unter anoxischen Bedingungen stattzufinden hat, während im Belebungsbecken grundsätzlich aerobe Bedingungen vorherrschen. Die hier angewandte intermittierende Denitrifikation beruht auf stetig wechselnden Milieubedingungen (aerob – anoxisch – aerob – usw.), die im Belebungsbecken sichergestellt werden müssen, um dort die notwendigen Prozesse stattfinden zu lassen. Da kein zusätzliches Behandlungsvolumen erforderlich ist, gestattet dieser Ansatz folglich auch die Erhöhung bereits verbauter Anlagen. Die Anlagenkonfiguration wurde zunächst an Land erprobt bevor anschließend ein längerer Versuchsbetrieb an Bord eines Kreuzfahrtschiffes durchgeführt wurde. So wurde im letzten Jahr der Projektlaufzeit die halbtechnische Pilotanlage an Bord eines Kreuzfahrtschiffes verbracht und für eine mehrmonatige Erprobungsphase in Betrieb genommen (Bild 3). Die Anlage verblieb rund 24 Wochen an Bord (Untersuchungszeitraum 20.09.2015 bis 06.03.2016) und wurde durch die Anlagenhersteller, die Wissenschaftseinrichtungen und die Schiffscrew betreut. Wiederholte Aufenthalte des Projektteams dienten der Umsetzung des Versuchsprogramms sowie der erforderlichen Begleitanalytik (Bilder 4a und 4b).



Abbildung 3: Pilotanlage an Bord



Abbildung 4: Versuchsbetrieb (4a) und Abwasseranalytik (4b) an Bord

## ERGEBNISSE

Es wurden alle Projektziele erreicht. Mit NAUTEK wurden die Voraussetzungen geschaffen, dass erprobte Anlagenkonzept nun weiter bis zur Marktreife zu entwickeln. Hervorzuheben ist, dass die durch den Nachweis der Funktionalität einer intermittierenden Stickstoff-Eliminierung in Kombination mit getauchter Membrantechnologie kompaktere Kläranlagen als bisherige dimensionierbar sind. Nachstehend werden die wichtigsten in NAUTEK erzielten Ergebnisse aufgeführt:

- Der neue Verfahrensansatz wurde erfolgreich entwickelt und im halb-technischen Maßstab an Bord eines Kreuzfahrtschiffes über mehrere Monate erprobt. Der Verfahrensansatz ist funktional und der Abwassersituation an Bord angepasst. Die Stickstoff- und Phosphorelimination liegen bei 80%. Die Ablaufgrenzwerte wurden eingehalten (N = 20 mg/l und P = 1 mg/l).
- Der gewählte Verfahrensansatz der intermittierenden Denitrifikation „nutzt“ die hohe organische Belastung des Schiffsabwassers bzw. das daraus resultierende Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis für ein kompaktes Anlagendesign.
- Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme sowie der abwassertechnischen Untersuchungen wurden in das Modell einer Schiffskläranlage integriert, sodass eine angenäherte Simulation der Abwasserreinigungsprozesse möglich war.
- Bezüglich der organischen Spurenstoffe (Arzneimittelrückstände) wurde ein Stoff-Screening erfolgreich durchgeführt und verschiedene Eliminationsmöglichkeiten (Ozonierung, Aktivkohle, Hochdruckmembranen) erprobt.

- Mithilfe eines entwickelten Berechnungsverfahrens wurden die (geplanten) Kapazitäten der Hafenauffangeinrichtungen in verschiedenen Szenarien mit der Abgabemenge durch Kreuzfahrtschiffe gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang wurde darüber hinaus eine Fallstudie erarbeitet, die die Inanspruchnahme der Hafenauffangeinrichtungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht konkreter beleuchtet.
- Die in NAUTEK erfolgte Datenaufnahme gestattete ferner eine Abschätzung der Stoff- und Energieflüsse in Schiffskläranlagen (Bild 5). Aufbauend auf Herstellerangaben, Messungen an Bord sowie eigenen Abschätzungen war neben einer stofflichen Betrachtung auch eine Bilanzierung der energetischen Aufwendungen möglich. Grundsätzlich ist angesichts der technischen Erfordernisse bei der biologischen Stickstoffelimination von einem steigenden Energiebedarf auszugehen, wie ebenfalls Bild 5 zu entnehmen ist.

### SCHLUSSEFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Erkenntnisse des Forschungsprojekts führten zu einem wesentlich tieferen Verständnis der an Bord von Kreuzfahrtschiffen anfallenden Abwasser- und Abfallfraktionen und der damit in Verbindung stehenden Verschmutzungsfrachten. Dieses verbesserte Verständnis war maßgebliche Grundlage für die technische Konzeption des Abwasserbehandlungsansatzes sowie für die Auslegung der NAUTEK-Versuchsanlage. Der mehrmonatige Betrieb der Versuchsanlage an Bord eines Kreuzfahrtschiffes mit 3.100 Personen stellte unter Beweis, dass der entwickelte Verfahrensansatz unterschiedlichste Frachten und Belastungssituationen bewältigt. Der halbtechnische Maßstab der Versuchsanlage lässt ein zügiges Upscaling erwarten.

Die erfolgsversprechenden Ergebnisse der praktischen Erprobung zogen bereits verstärktes Interesse von Reedern und Werften hinsichtlich einer Abwasserreinigungsanlage mit einer im Betrieb zuverlässigen Nährstoffelimination nach sich. Das Interesse betrifft sowohl die Ausstattung von Neubauten als auch die Nachrüstung von Kreuzfahrtschiffen. Damit zeichnet sich sehr deutlich ab, dass sich das Engagement der Industriepartner im Verbundvorhaben wie intendiert auszahlen wird.

Eine bereits untersuchte aber noch nicht wirklich in der Praxis umgesetzte Option ist das Abwasser- bzw. Grauwasserrecycling. Insbesondere eine Wiedernutzung von Grauwasser aus den Wäschereien wäre unter Gewährleistung ökonomischer Vorteile grundsätzlich realisierbar. Nun stünde es an, die separate Grauwasserbehandlung technisch konkret auszugestalten, um insbesondere die technischen und hygienischen Anforderungen an Bord zu

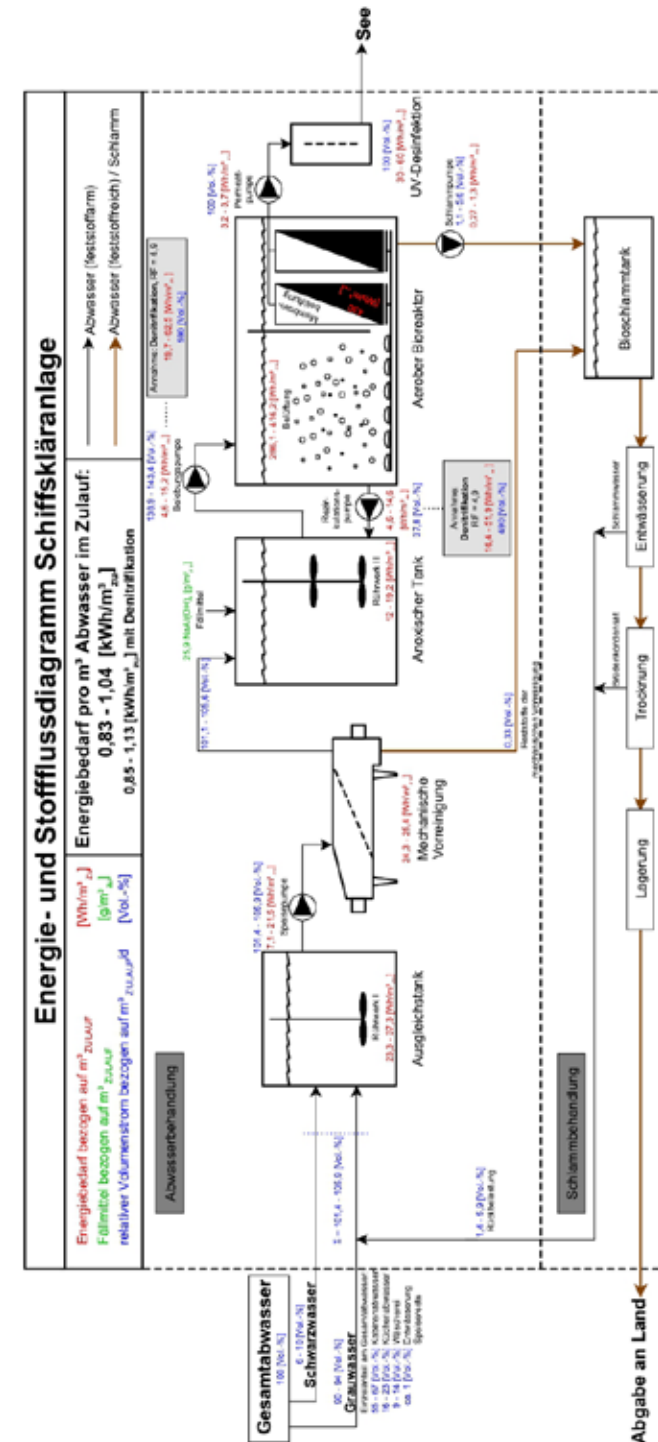


Abbildung 5: Energie- und Stoffflussdiagramm zur Abwasserreinigung an Bord von Kreuzfahrtschiffen

erfüllen. In diesem Zusammenhang gewinnt die Frage der Belastung des Grauwassers mit organischen Spurenstoffen eine nennenswerte Bedeutung.

Alle Bemühungen für die weitere Verbesserung des Umweltschutzes an Bord von Kreuzfahrtschiffen zielen darauf ab, die Effizienz und Zuverlässigkeit der eingesetzten Verfahren zu erhöhen, weniger Reststoffe zu produzieren und ihre Entsorgung zu vereinfachen. Demnach war erklärte Zielsetzung von NAUTEK, die Untersuchungen so zu konzipieren, dass die erzielten Ergebnisse auf andere Bereiche der Hochseeschifffahrt sowie zu einem gewissen Grad auch auf die Binnenschifffahrt übertragbar sind. Dies ist insofern gelungen, als dass NAUTEK wichtige Erkenntnisse und Kriterien im Hinblick auf die Bemessung von Schiffskläranlagen liefert. In diesem Zusammenhang sind gleichermaßen derzeitig genutzte Prüfverfahren und Testbedingungen für Schiffskläranlagen kritisch zu prüfen. Grundsätzlich bieten die Ergebnisse aus NAUTEK Spielraum, Empfehlungen für weitergehende Prüfmethode abzuleiten.

Darüber hinaus zeigte NAUTEK auch Lösungsansätze für derzeit noch nicht maßgebliche stoffliche Probleme auf, und hier insbesondere für organische Spurenstoffe wie Arzneimittelrückstände im Abwasser. Neben Fragen der abwassertechnischen Konzeption bot NAUTEK auch Raum, die derzeitige Entsorgungspraxis an Bord insgesamt zu überdenken. So wurden während der Projektdurchführung zahlreiche Ideen und Ansätze formuliert, die zu einem noch weiter verbesserten Umgang mit problematischen Abwasser- und Abfallteilströmen führen können. Beispielhaft sind alternative Entsorgungsoptionen für Speisereste, das organisch hochbelastete Schwarzwasser sowie für den Klärschlamm aus der Abwasserreinigung zu nennen. Für letztgenannte Fraktionen bietet sich insbesondere eine Nutzung der Anaerobtechnik an.

## DANKSAGUNG

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Vorhabens und dem Projektträger Jülich für die sehr sachkundige Begleitung. Großer Dank gebührt den Partnern für die sehr konstruktive und ergebnisorientierte Zusammenarbeit. Hervorzuheben sind die Projektpartner, die ohne Förderung durch die Bereitstellung von Personal und Sachmitteln ganz maßgeblich zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben. Besondere Erwähnung verdient der Einsatz der Crews während des Pilotbetriebs an Bord sowie bei den zahlreichen Probenahmen. Abschließend danken wir den assoziierten Partnern für ihre Bereitschaft am Vorhaben mitzuwirken und für die wertvollen inhaltlichen Beiträge. Weitere Informationen zum Vorhaben und zu den Ergebnissen sind unter [www.nautek-info.de](http://www.nautek-info.de) abrufbar.

## LITERATUR

- [1] Bundesregierung.de (2015): Umweltfreundlich auf See Urlaub Machen, <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/07/2015-07-21-unweltfreundlich-kreuzfahren.html>
- [2] Köster (2015): Sustainable solutions for wastewater treatment and reuse on cruise ships, *Ship & Offshore, Special GreenTech 2015*, pp 48-50
- [3] Köster, S., Westhof, L., Keller, L. (2016): Stand der Technik der Abwasserreinigung an Bord von Kreuzfahrtschiffen, *gwf Wasser + Abwasser*, 05/2016, Seiten 528-537
- [4] Kretschmann, L. (2014): A case study on changing sustainability awareness and its effect on the cruise industry. 2nd International Ocean Research Conference, Barcelona, 17-21 November 2014
- [5] Kretschmann, L., Köster, S., Westhof, L., Kaiser, A., Joswig, M. (2015): Wastewater Treatment on Cruise Liners: Current Situation and Solutions to Overcome Future Challenges, *Proceedings Green Ship Technology Conference 2015*

Korrespondierender Autor:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Köster  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
30167 Hannover

Tel: +49 (0)511-762-3379  
Email: [koester@isah.uni-hannover.de](mailto:koester@isah.uni-hannover.de)  
[www.isah.uni-hannover.de](http://www.isah.uni-hannover.de)

## PerSee – Performance von Schiffen im Seegang

Förderkennzeichen: 03SX339

M. Riesner, S. Sigmund, O. el Moctar (Universität Duisburg-Essen), M. Palm, J. Springer, D. Jürgens (Voith), M. Scharf, M. Lemmerhirt, M. Abdel-Maksoud (Technische Universität Hamburg-Harburg), J. Wagner, E. Binkowski, R. Bronsart (Universität Rostock), S. Uharek, A., A. Lengwinat, Cura Hochbaum (Technische Universität Berlin), P. Valanto (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt), S. Harries (Friendship Systems), V. Shigunov (DNV GL), S. Walter (Meyer Werft)

### Einleitung

Die Antriebsleistung eines Schiffes wird im Vertrag zwischen Reederei und Werft in Form einer zu erreichenden Probefahrtsgeschwindigkeit spezifiziert. Die vertraglich festgehaltenen Umweltbedingungen für die Probefahrt entsprechen dabei nahezu idealen „Schönwetterbedingungen“: Die vorherrschende Windgeschwindigkeit wird meist als unter zwei Beaufort und der Seegang auf unter 0,5 m signifikante Wellenhöhe festgeschrieben. Um das Erreichen der vertraglich vereinbarten Dienstgeschwindigkeit auch unter Betriebsbedingungen zu gewährleisten, wird auf die ermittelte Glattwasserleistung im Allgemeinen unabhängig von der Schiffsgröße eine Leistungsreserve in Höhe von 15 % aufgeschlagen, die sogenannte „Sea Margin“. Ferner wird das „Altern“ vom Schiffsrumpf und Propulsor (z. B. durch Bewuchs) sowie der Maschinenanlage durch eine zusätzliche „Light Running Margin“ berücksichtigt, die in der Größenordnung von 5 % liegen kann. Eine zusätzliche „Engine Margin“ in Höhe von etwa 10 % verhindert, dass die Hauptmaschine dauerhaft unter vollast betrieben wird. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass das Schiff für Bedingungen optimiert wird, die es in seiner Dienstzeit nur vergleichsweise selten bzw. überhaupt nicht mehr antreffen wird. Dies betrifft sowohl die Optimierung der Rumpfform, der Propulsions- und Steuerorgane sowie die Auswahl der Maschinenanlage. Die pauschal angesetzte Leistungsreserve kann zudem dazu führen, dass eine zu teure und zu große Maschinenanlage eingebaut wird und die Hauptmaschine evtl. kaum unter optimalen Betriebsbedingungen und somit nicht bei einem optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch betrieben wird. Aus diesen Gründen hinterfragen Betreiber vermehrt den Brennstoffverbrauch und die benötigte Maschinenleistung von Schiffen im Seegang.

Die Wirtschaftskrise im Jahr 2008, welche mit stark steigenden Brennstoffkosten einherging, führte in der maritimen Branche zu einem Umdenken bei der Einsatzprofilplanung der Flotten. Seitdem werden neue Konzepte entwi-

ckelt, wie z. B. das „Slow Steaming“, das den dauerhaften Betrieb von Frachtschiffen in einem sehr reduzierten Leistungsbereich von bis zu 40 % oder sogar noch weniger der installierten Leistung beschreibt. Es entstehen Neubautwürfe, die durch intensive hydrodynamische Optimierungen und Veränderung des Fahrprofils eine installierte Leistung von 40 - 70 % der bisher für die entsprechende Schiffgröße verwendeten Leistung vorsehen. Es werden vermehrt Entwürfe nachgefragt, die nicht nur einen, sondern zusätzlich weitere Betriebspunkte im unteren Leistungsbereich vorsehen. Diese Vorgehensweise schien zunächst nur ein kurzer Trend während der Zeit hoher Ölpreise zu sein. Inzwischen werden diese Konzepte jedoch durch umweltpolitische Vereinbarungen (z. B. Kyoto-Protokoll) gestützt. Durch den von der IMO eingeführten „Energy Efficiency Design Index“ (EEDI) wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ins Verhältnis zur transportierten Ladung und Schiffsgeschwindigkeit gesetzt, IMO (2011). Um die im Kyoto-Protokoll beschlossene Treibhausgasreduzierung zu erreichen, wird erwartet, dass der einzuhaltende Index in den nächsten Jahren stetig gesenkt wird. Die Einhaltung der Werte bzw. die Senkung des schiffsspezifischen Indexes kann insbesondere durch die Reduzierung der installierten Leistung erreicht werden. Die bestehenden Neubauprozesse bleiben somit auch bei derzeit niedrigem Ölpreis für die Reeder wirtschaftlich interessant, da ein Überschreiten des vorgeschriebenen EEDI-Indexes in Zukunft bestraft werden soll. Der reduzierte Leistungsbedarf von Neubauten bei gleichbleibender Schiffgröße führt insbesondere bei Institutionen der Schiffssicherheit (IMO, flaggenstaatliche Verwaltungen und Klassifikationsgesellschaften) sowie Versicherungen zu einer sicherheitstechnisch wichtigen Überlegung: Ist die installierte Leistung dieser Schiffe ausreichend, um auch bei starkem Seegang manövrierfähig zu bleiben?

Aus den oben diskutierten Gründen liegt es nahe, die bisherige Praxis der Bestimmung des Leistungsbedarfs grundlegend zu hinterfragen und unter Abkehr von der Leistungsprognose bei Glattwasserbedingungen eine rationale Leistungsprognose unter betriebsnahen Bedingungen zu erreichen. Des Weiteren sollte die erreichbare Geschwindigkeit von Schiffen in schwerer See sowie die für ein sicheres Manövrieren benötigte Mindestleistung weiter untersucht werden. Die Hauptziele des Vorhabens waren wie folgt:

- Es sollten vorhandene numerische Methoden weiterentwickelt und validiert werden, mit dem Ziel, den Zusatzwiderstand, die Propulsionseigenschaften und das Manövrierverhalten von Schiffen in moderater und schwerer See vorhersagen zu können. Es handelte sich dabei um Verfahren der Potenzialtheorie (3D-Randelementeverfahren, Streifenmethoden) und Feldmethoden. Weiterhin sollte durch Modellversuche und numerische Simulationen eine Wissensbasis für den Widerstand und den Leistungsbedarf von Schiffen im Seegang geschaffen werden.

- Die Mindestleistung von Schiffen im Seegang sollte ermittelt werden. Hierbei waren zwei Einsatzanforderungen an das Schiff zu untersuchen, da nicht immer eindeutig abzuschätzen ist, welche Anforderung zu einem höheren Leistungsbedarf führt:
- Minimaler Leistungsbedarf des Schiffes unter Betriebsbedingungen, um eine geforderte Geschwindigkeit in moderater See (z.B. häufig vorkommende Seegänge) zu erreichen. Der Leistungsbedarf soll in einem Referenzseegang, z.B. statistisch häufig vorkommender Seegang für weltweite Fahrt (Entwurfsbedingungen), ermittelt werden.
- Minimaler Leistungsbedarf des Schiffes in schwerer See, um eine geforderte Manövrierbarkeit aufrecht zu erhalten (Sicherheitstechnische Umgebungsbedingungen)
- Um den Brennstoffverbrauch von Schiffen im Seegang zu reduzieren, sollte eine Prozedur entwickelt werden, mit Hilfe derer Schiffe unter betriebsnahen Bedingungen (im moderaten Seegang) optimiert werden können. Diese Prozedur sollte auf ausgewählte Schiffstypen angewendet werden.
- Die erreichbare Geschwindigkeit von Schiffen im Seegang hat einen entscheidenden Einfluss auf die globalen und lokalen Lasten. Für die Strukturauslegung werden bisher Schiffsgeschwindigkeiten zugrunde gelegt, die etwa 2/3 der Dienstgeschwindigkeit betragen. Diese Annahme wird vielfach als zu konservativ angesehen, da einerseits die Schiffsführung die Schiffsgeschwindigkeit in schwerer See aus Sicherheitsgründen in der Regel reduziert oder das Schiff aufgrund einer zu geringen Maschinenleistung nicht in der Lage ist eine derart hohe Geschwindigkeit zu erreichen. Für die Optimierung der Schiffsstruktur (zwecks Gewichtersparnis) ist die Kenntnis der maximal erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit notwendig. Diese sollte für ausgewählte Schiffe ermittelt werden.
- Für die Einsatzplanung und den Betrieb von Schiffen sollten wirtschaftliche und ökologische Schiffsgeschwindigkeiten ermittelt werden. Hierzu sollen Verfahren entwickelt werden, welche fundierte Aussagen zu den zu erwartenden Betriebsbedingungen des Schiffes (Ladungsaufkommen, Seestrecken, Transportzeitanforderungen, Kostenentwicklungen) treffen können. Diese können sowohl zur Flottenplanung als auch im Betrieb eines Schiffes oder der Flotte zum Einsatz kommen.



Das Vorhaben war in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- Ermittlung betriebsnaher Bedingungen für Schiffe im Seegang
- Entwicklung von numerischen Methoden zur Berechnung des Zusatzwiderstands und der Leistung von Schiffen im Seegang
- Entwicklung neuer Versuchstechniken und Durchführung von Modellversuchen und Großausführungsmessungen
- Entwicklung von Verfahren für die Bewertung von Schiffen unter Berücksichtigung realer Bedingungen in Transportszenarien
- Parametrische Optimierung der Schifflinien unter betriebsnahen Umgebungsbedingungen im Seegang
- Ermittlung der für ein sicheres Manövrieren erforderlichen Mindestleistung und der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit in schwerer See zur Auslegung der Schiffsstruktur.

### Betriebsnahe Entwurfsbedingungen

Für eine rationale Leistungsprognose unter betriebsnahen Bedingungen wurden Umweltbedingungen auf Seewegen ermittelt, Riesner et. al. (2016) und Shigunov (2016). Zunächst wurden typische Schiffsrouten ausgewählt („World-Wide Trade“, „East-Bound Trade“, „North Atlantic Trade“, usw.). Mit Hilfe der Seegangsstatistik „Global Wave Statistic“ (Hogben 2000) wurden für diese Fahrtgebiete Langzeit-Auftretenswahrscheinlichkeiten sämtlicher Seegänge bestimmt (Wetterrouting und Vermeidung von schwerem Seegang wurden nicht berücksichtigt). Für insgesamt vier unterschiedliche Schiffe (14.000 TEU und 707 TEU Containerschiff, Kreuzfahrtschiff, VLCC Tanker) wurde für jeden Seegang die benötigte Maschinenleistung und der prozentuale Brennstoffverbrauch, gemessen am Gesamtbrennstoffverbrauch auf den Routen, ermittelt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Vergleich der Verteilung des Brennstoffverbrauchs über der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und Periode der Aufwärtsnulldurchgänge  $T_z$  für ein 14.000 TEU (links) und ein 707 TEU Containerschiff (rechts) auf der Route „World-Wide Trade“.

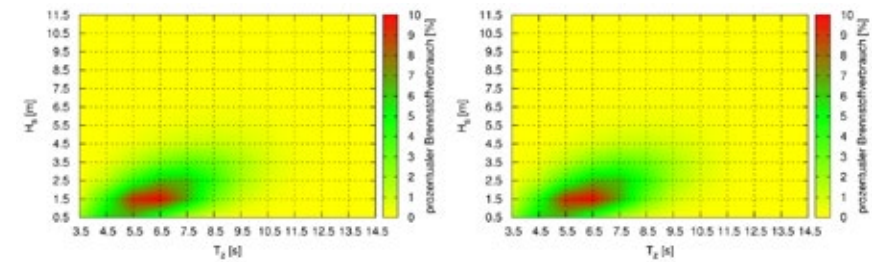


Abbildung 1: Prozentualer Brennstoffverbrauch auf der Route „World-Wide Trade“ für ein 14.000 TEU Containerschiff (links) und ein 707 TEU Containerschiff (rechts).

Es zeigt sich, dass auf diesen Routen die größte Brennstoffmenge im Bereich von  $1,0 \text{ m} \leq H_s \leq 2,5 \text{ m}$  und  $4,5 \text{ s} \leq T_z \leq 7,0 \text{ s}$  verbraucht wird. Zudem ist nahezu kein Unterschied zwischen der Verteilung des Brennstoffverbrauchs des 14.000 TEU und des 707 TEU Containerschiffs zu erkennen. Weiter fiel auf, dass die Verteilung des Brennstoffverbrauchs nahezu identisch mit der Verteilung der Auftretenshäufigkeit der Seegänge auf der jeweiligen Route war. Dies galt zudem für sämtliche Teilrouten, wie z. B. die Handelsroute Europa-Asien. Abbildung 2 zeigt die lineare Korrelation nach „Pearson“ zwischen dem Beitrag jedes Seegangs zum Gesamtbrennstoffverbrauch und der Auftretenshäufigkeit der Seegänge (links) sowie dem seegangsbedingten Zusatzwiderstand (rechts).

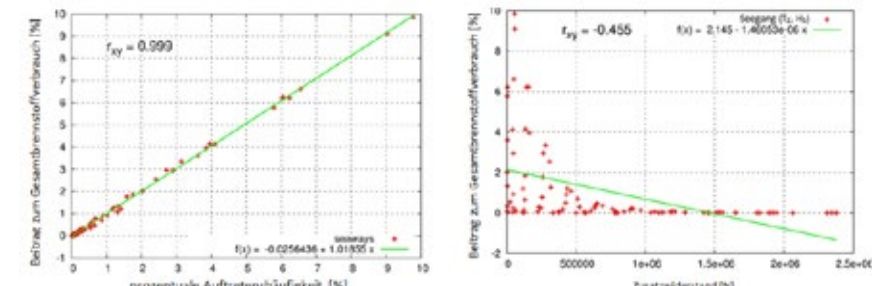


Abbildung 2: Lineare Korrelationen zwischen dem Beitrag zum Gesamtbrennstoffverbrauch (Ordinate) und der Auftretenshäufigkeit (links) sowie des seegangsbedingten Zusatzwiderstands (rechts).

Für welche Betriebsbedingungen die rationale Leistungsprognose durchgeführt wird, hängt somit weniger von der Schiffsgröße und des Zusatzwiderstands im Seegang ab, sondern fast nur von der Auftretenshäufigkeit der verschiedenen Seegänge auf der gefahrenen Route.

## Entwicklung numerischer Methoden

Für die Berechnung des Zusatzwiderstands im Seegang wurden verschiedene Methoden weiterentwickelt, validiert und eingesetzt. Zunächst wurde eine Streifenmethode weiterentwickelt. Dabei lag der Fokus auf Verbesserungen der Vorhersage des Zusatzwiderstands in kurzen Wellen, siehe Schlussbericht der HSVA, Valanto (2016). Abbildung 3 (links) zeigt die quadratische Übertragungsfunktion des seegangsbedingten Zusatzwiderstands eines Kreuzfahrtschiffs in Wellen von vorne. Es ist eine gute Übereinstimmung zu Modellversuchsergebnissen erkennbar.

Weiterhin wurde ein lineares Randelementverfahren weiterentwickelt, siehe Schlussbericht der Universität Duisburg-Essen, Riesner et. al. (2016). Das Frequenzbereichsverfahren, basierend auf RANKINE-Quellen, wurde dabei durch Verwendung eines Faltungsintegrals (Cummins 1962 und Ogilvie 1964) in den Zeitbereich überführt. Das Faltungsintegral enthält dabei den Einfluss bereits vergangener Schiffsbewegungen auf die momentanen Radiationskräfte. Diffraktionskräfte wurden durch Verwendung des linearen Diffraktionsproblems bestimmt. Froude-Krylov- und Rückstellkräfte können ohne Lösen eines Strömungsproblems berechnet werden. Somit wurden diese im Zeitbereich durch Integration des Drucks über der momentan benetzten Rumpfoberfläche berechnet.

Neben den auf Potenzialtheorie basierenden Verfahren wurden Feldmethoden zur Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die Berechnung des Zusatzwiderstands in Wellen eingesetzt, siehe Schlussbericht der Universität Duisburg-Essen, Riesner et. al. (2016). Abbildung 3 (rechts) vergleicht beispielhaft die quadratischen Übertragungsfunktionen des seegangsbedingten Gesamtzusatzwiderstands „Gesamt“ und des Reibungsanteils „Reibung“ mit Modellversuchen „Versuch“ eines Kreuzfahrtschiffs.

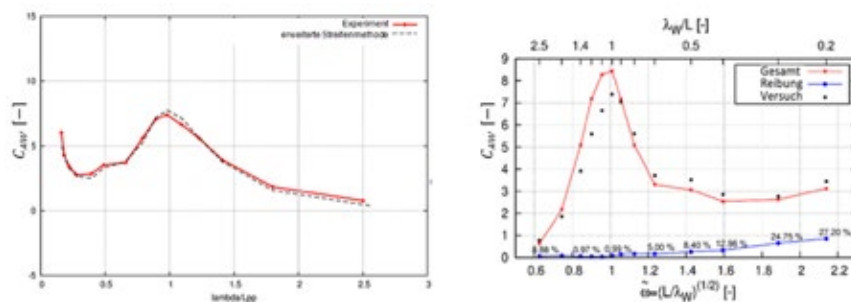


Abbildung 3: Quadratische Übertragungsfunktion des wellenbedingten Zusatzwiderstands in Wellen von vorne, Streifenmethode (links) und RANSE-Verfahren (rechts).

Im RANS-Code Neptune wurden beispielsweise die Wellenerzeugung und die Vermeidung von Reflektionen durch die Implementierung eines erweiterten „numerischen Strandes“ verbessert, siehe Schlussbericht der TU Berlin, Uharek et. al. (2016). Darüber hinaus wurden ein virtuelles Federsystem zur Führung des Modells während der Simulation implementiert sowie zahlreiche Berechnungen zur Validierung und zur Bestimmung der für das Manövrieren relevanten Kräfte für verschiedene Wellenlängen und Einfallswinkel von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  durchgeführt. Abbildung 4 (rechts) zeigt den Vergleich der berechneten Mittelwerte der Längskraft im Fall einer schräg einlaufenden Welle mit Messungen der HSVA. Die blaue Linie entspricht der rein hydrodynamischen Kraft, die rote Linie enthält die Korrektur zur Berücksichtigung der mittleren Trägheitseffekte, welche nicht zu vernachlässigen sind.

Zur Berechnung der erforderlichen Leistung im Seegang wurde ein modulares Modell entwickelt, siehe Schlussbericht der TU Hamburg-Harburg, Scharf et. al. (2016). Zur Untersuchung der Propulsionseigenschaften eines Schiffes im Seegang wurden u.a. Sog- und Nachstromziffer herangezogen. Es wurde angenommen, dass der instationäre Anteil dieser Größen isoliert und parametrisch aus verschiedenen Einflüssen rekombiniert werden kann. Für die Simulation wurde zunächst ein Propellermodell auf Basis von Volumenkräften für ein RANS-Verfahren entwickelt, welches mit dem Randelementverfahren panMARE gekoppelt wurde, Scharf et. al. (2016). Anschließend wurden die Einflüsse, von denen der größte Beitrag erwartet wurde, jeweils isoliert betrachtet: Tauchbewegung, Stampfbewegung und Wellen. Die instationären Anteile wurden extrahiert, rekombiniert und mit Ergebnissen verglichen, die aus einer Simulation gewonnen wurden in der sämtliche Anteile berücksichtigt wurden. Die Gegenüberstellung (siehe Abbildung 4 links) zeigt eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs zwischen der Nachstromziffer aus der Simulation mit freiem Trim und Tauchen („Free Motion“) und der rekombinierten Nachstromziffer („Recomposed“) sowohl hinsichtlich der Phase als auch der Amplitude.

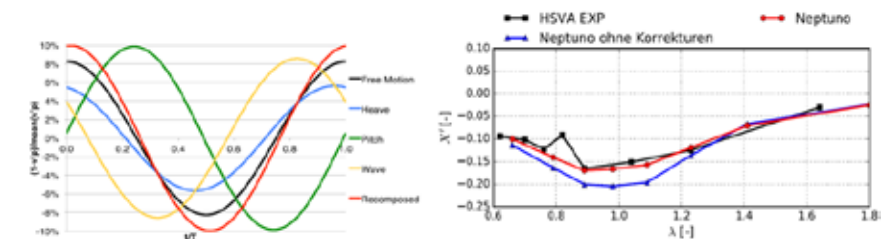


Abbildung 4: Überlagerung der Nachstromanteile über eine Periode (links). Vergleich der mittleren Längskraft mit Messungen der HSVA ( $\alpha=30^\circ$ ), rechts.

Auf Basis der zuvor im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse wurde die Methode ProWe weiterentwickelt, Scharf et. al. (2016). Diese ist in der Lage, die Zusatzleistung im Seegang abzuschätzen. Dafür wird im Frequenzbereich ein Bewegungszustand bestimmt, in dem sich das Schiff im Kräfte- und Momentengleichgewicht befindet. In der Simulation wurden die äußeren Kräfte infolge von Wellendrift, Wind, Ruder- und Propellereinfluss sowie Manövrieren berücksichtigt. ProWe wurde ursprünglich entwickelt, um bei gegebener Geschwindigkeit die nötige Antriebsleistung zu bestimmen. Die Methode wurde erweitert, um bei gegebener Antriebsleistung die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit abschätzen zu können.

Für die Berechnung der Propulsionseigenschaften in Wellen wurden umfangreiche RANSE-Untersuchungen durchgeführt, Riesner et. al. (2016). Zunächst wurden die Freifahrtkurven des Propellers und danach die Propulsion in regelmäßigen Wellen berechnet. Dabei wurden die Propeller geometrisch modelliert und die Propellerrotation mit dem „Sliding-Interface“ Ansatz realisiert. Abbildung 5 (linke) zeigt beispielhaft die Strömungsgeschwindigkeiten im Propellerstrahl eines Kreuzfahrtschiffs bei  $Fn=0,223$ . Auf der rechten Seite von Abbildung 5 sind der Propulsionsgütegrad  $\eta_D$ , der Gütegrad der Anordnung  $\eta_R$ , der Schiffseinflussgrad  $\eta_H$  und der Propellerwirkungsgrad  $\eta_0$  über dem Verhältnis von Wellenlänge  $\lambda_W$  zu Schiffslänge  $L$  aufgetragen.

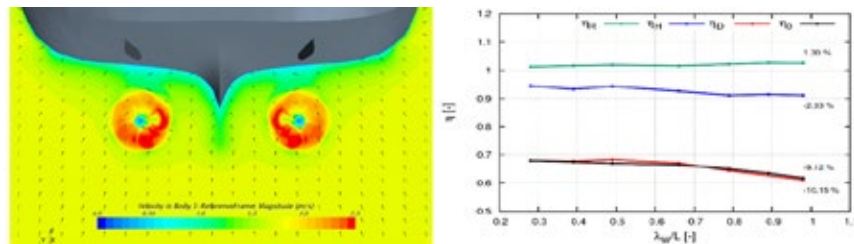


Abbildung 5: Kreuzfahrtschiff bei  $Fn=0,223$ : Strömungsgeschwindigkeit kurz hinter der Propellerebene (links). Verlauf von  $\eta_D$ ,  $\eta_R$ ,  $\eta_H$  sowie  $\eta_0$  in regelmäßigen Wellen (rechts).

Es ist zu erkennen, dass sich für das Kreuzfahrtschiff  $\eta_R$  und  $\eta_H$  nur leicht verändern.  $\eta_D$  und  $\eta_0$  nehmen mit zunehmender Wellenlänge deutlich ab. Dies kann durch die Zunahme des Gesamtwiderstands und den sich ändernden Betriebspunkt erklärt werden.

## Entwicklung neuer Versuchstechniken

Zur Bestimmung von Driftkräften in seitlichen und schräg von vorne oder hinten kommenden Wellen wurden an der HSVA (Valanto 2016) und der TUB (Uharek et. al. 2016) neue Schleppvorrichtungen entwickelt, welche die natürliche Bewegung des Schiffes im Seegang nicht verhindern und somit genaue Messungen von Kräften, Momenten sowie Schiffsbewegungen in Wellen oder im Seegang mit beliebiger Wellenlaufrichtung ermöglichen. Mit der Vorrichtungen wurden Modellversuche eines Kreuzfahrtschiffsentwurfs durchgeführt, um ausführliche Daten über seegangsbedingte Driftkräfte zu gewinnen. Diese Daten und die gewonnenen Erkenntnisse waren notwendig, um Fortschritte bei der Weiterentwicklung von numerischen Modellen zur Berechnung des Zusatzwiderstandes und des Manövrierhaltens zu erzielen. Abbildung 6 zeigt auf der linken Seite beispielhaft die Messeinrichtung der TUB. Auf der rechten Seite sind Ergebnisse der HSVA dargestellt, die die quadratische Übertragungsfunktion des Zusatzwiderstands in regelmäßigen Wellen aus unterschiedlichen Begegnungsrichtungen bei einer Geschwindigkeit von 21 kn zeigen.

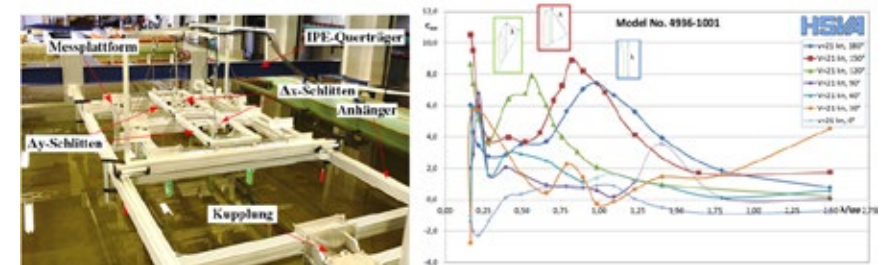


Abbildung 6: Messplattform der TUB (links). Übertragungsfunktion des Zusatzwiderstands in Wellen aufgetragen über dem Verhältnis Wellenlänge/Schiffslänge (rechts).

Die Propulsionsversuche mit dem Modell des Kreuzfahrtschiffs bei verschiedenen Wellenlaufrichtungen zeigten, dass bis etwa 3,5 m Wellenhöhe die Propulsionsverluste in moderaten Seegängen in der Regel nicht auf die Schiffsbewegungen zurückzuführen sind, sondern auf den erhöhten Widerstand und den veränderten Propulsionspunkt der Propeller im Seegang. Damit decken sich die Ergebnisse der numerischen RANSE-Untersuchung mit den Modellversuchsergebnissen.

## Transportszenarien unter Berücksichtigung realer Bedingungen

Für die Ermittlung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurden zunächst die betrieblichen Ausgaben eines Schiffes aufgeschlüsselt und im An-

schluss der Nutzen in Form von Einnahmen betrachtet. Als Ergebnis der Recherche konnten am Beispiel eines 13.830 TEU Containerschiffes Ansätze formuliert und darauf aufbauend Kostenpunkte abgeschätzt werden. Angaben über Einnahmen und Ausgaben wurden benötigt, um Wirtschaftlichkeits-Kennzahlen zu berechnen, die die Basis einer Bewertung bilden können. Die in der Literatur gängigen Methoden für die Kapitalflussberechnung und deren Bewertung mit Hilfe entsprechender Kennzahlen wurden ermittelt und gegenüber gestellt. Als Ergebnis der Analyse aller Kostenpositionen ließ sich quantitativ feststellen, dass, wie bekannt, die Brennstoffkosten den größten beeinflussbaren Faktor darstellen. Der kausale Zusammenhang des Gesamtwiderstandes eines Schiffes zu seinem Brennstoffverbrauch bedingt, dass eine dahingehende Optimierung die Gesamtkostenbilanz und damit die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflusst.

Für eine rationale Bewertung von Schiffsentwürfen wurden zu erwartende Einsatzszenarien berücksichtigt. Die Entwicklung der Betriebsprofilen erfolgt dabei auf Grundlage von realen Betriebsprofilen, die in eine Routenmodellierung Eingang finden. Es wurde ein methodischer Ansatz der Szenarioerstellung erarbeitet, der in dem Prognoseprogramm CrySiS implementiert wurde, Wagner et. al (2016). Dabei wurden zunächst Parameter festgelegt, die die Betriebsprofile beeinflussen. Die so entstehenden Szenarien reagieren mit angepasster Geschwindigkeit auf die Entwicklung des Brennstoffpreises und die Wetterlage. Auf den Tiefgang wirkt die Entwicklung des Transportaufkommens ein. Die Betriebszustände, die sich aus den Komponenten Tiefgang, Geschwindigkeit, Wellenhöhe und Wellenperiode zusammensetzen, wurden durch Zukunftsprognosen bestimmt, wobei jedes Ereignis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit behaftet war. Um möglichst viele Szenarien unabhängig von ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit berücksichtigen zu können und dennoch einen vertretbaren Rechenaufwand einzuhalten, wurde die Monte-Carlo-Methode in das Prognoseprogramm integriert. Damit ist es möglich, alle Verzweigungen mit einer ausreichend hohen Anzahl an Monte-Carlo-Durchläufen zu berücksichtigen. Die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens aller Betriebszustände wurden aufsummiert und ergaben sich zu der Wichtung am gesamten Fahrprofil.

Die Anwendung des Programms erfolgte am Beispiel eines Kreuzfahrtschiffs sowie eines Containerschiffs. Die in CrySiS implementierten Routinen der Szenarioentwicklung können bei Bedarf erweitert und angepasst werden. Wünsche und Empfehlungen beispielsweise von Reedereien oder Werften können dabei Berücksichtigung finden. Eine genauere Beschreibung ist dem PerSee Schlussbericht zu entnehmen, Wagner et. al. (2016).

## Parametrische Optimierung der Schiffslinien

Mit Hilfe der CAE (Computer Aided Engineering) Software „CAESES®“ von Friendship Systems wurden Schiffe für die zuvor bestimmten betriebsnahen Einsatzbedingungen optimiert, vgl. Harries (2016). CAESES® steuerte dabei den gesamten Optimierungsprozess. Im „Preprocessing“ wurde die Schiffsgeometrie durch Verwendung eines parametrischen Modells definiert, so dass Geometrieänderungen berechnungsbegleitend und automatisiert durchgeführt werden konnten. Abbildung 7 zeigt mögliche Geometrieänderungen im Bugbereich eines 14.000 TEU Containerschiffs.

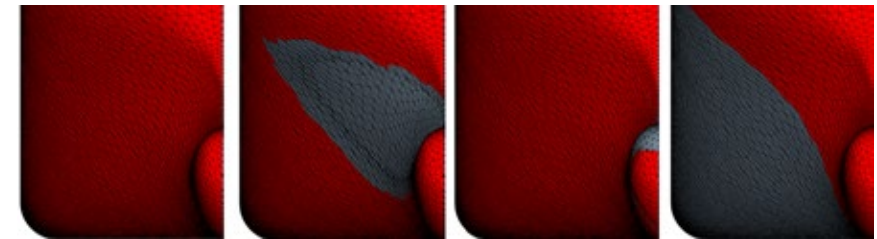


Abbildung 7: Beispielhafte Veränderung der Buggeometrie eines 14.000TEU Containerschiffs.

Für die Berechnung des Strömungsproblems wurden die Geometrie sowie benötigte Umgebungsvariablen an einen Strömungslöser übergeben. Hierbei kamen ein auf Potenzialtheorie basierendes 3D Randelementeverfahren sowie ein RANSE-Verfahren zum Einsatz. Diese Strömungslöser berechneten die zu untersuchenden Größen und stellten sie CAESES® zur Verfügung. CAESES® führte im Folgenden die weitere Auswertung durch, anhand derer die Schiffsgeometrie automatisiert verändert wurde und so die widerstandsoptimierte Geometrie vom Programm iterativ berechnet werden konnte. Im Vorhaben wurden verschiedene Schiffe optimiert. Dazu zählten ein 14.000 TEU Containerschiff, ein Kreuzfahrtschiff, ein Offshore-Schlepper sowie Offshore-Versorger. Für die Optimierung der Schiffe wurden verschiedene Einsatzszenarien berücksichtigt, welche unter anderem zuvor mit CrySiS erstellt wurden. Eine genauere Beschreibung der Widerstandsoptimierungen ist in den Schlussberichten Harries (2016), Palm et. al (2016), Wagner et. al. (2016) und Walter (2016) zu finden.

Zunächst wurde eine „konventionelle“ Optimierung der Schiffe im Glattwasser durchgeführt. Ausgewählte Geometrievarianten aus der Glattwasseroptimierung wurden anschließend in einer Robustheitsanalyse auf ihre Eigenschaften in moderatem Seegang untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die für Glattwasserbedingungen optimierten Schiffe auch einen geringeren seegangsbedingten Zusatzwiderstand aufwiesen. Abbildung 8 zeigt auf der lin-

ken seite beispielhaft die Reduzierung des Gesamtwiderstands eines 14.000 TEU Containerschiffs im Seegang für verschiedene Einsatzszenarien. Dabei ist jeweils die Veränderung der optimierten Geometrie („OD“) zur Ausgangsgeometrie („BD“) aufgetragen. Bei einer Geschwindigkeit von 15,5 kn und einem Tiefgang von 15 m konnte der Gesamtwiderstand um bis zu 7 % reduziert werden. Auf der rechten Seite ist der Gesamtwiderstand eines Offshore-Versorgers abhängig von zwei Designvariablen als Antwortfläche dargestellt. Die Designvariable 1 beeinflusst dabei hauptsächlich den mittleren bis oberen Bugbereich, während Designvariable 2 die Form des Bugwulstes beschreibt.

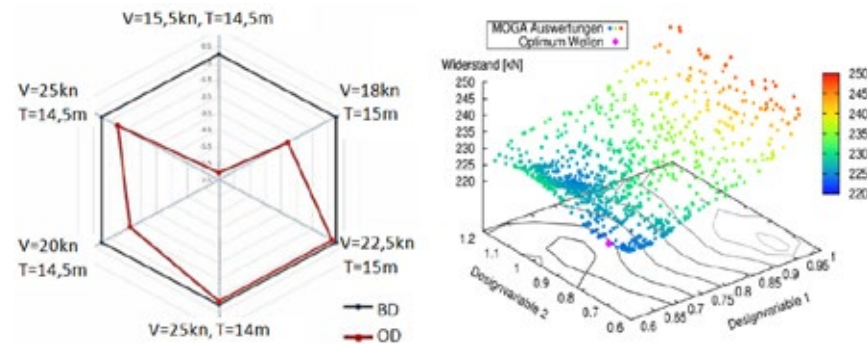


Abbildung 8: Veränderung des Gesamtwiderstands eines 14.000 TEU Containerschiffs bei verschiedenen Betriebsszenarien (links). Gesamtwiderstand eines Offshore-Versorgers abhängig von zwei Designvariablen (rechts).

Das Optimierungspotential ist nicht nur abhängig vom betrachteten Betriebsprofil, sondern auch von den gewählten Formparametergrenzen. Bei den Optimierungen des Betriebsprofils unter Berücksichtigung des Brennstoffpreises zeigte sich, dass die Parametergrenzen eine weitere Reduktion der gewichteten Schleppleistung verhinderten. In diesem Fall muss mit einem überarbeiteten parametrischen Modell eine neue Optimierung durchgeführt werden. Weiterhin zeigte sich, dass die Betrachtung von Betriebsprofilen eine Einsparung über die Lebenszeit des Schiffes bedeutet. Auch konnte festgestellt werden, dass die Betrachtung mehrerer Betriebszustände eine höhere Einsparung ermöglichte, als eine Berücksichtigung von nur einem Betriebszustand. So konnte im Ausgangsbetriebsprofil gezeigt werden, dass die Optimierung auf nur den häufigsten Betriebszustand zu einem um ca. 3 % höheren Leistungsbedarf gegenüber der Betrachtung von sieben Betriebszuständen führte. Bei den Untersuchungen zu dem Betriebsprofil mit der Berücksichtigung des Brennstoffpreises ist in diesem Zusammenhang der Leistungsbedarf sogar um 5 % erhöht.

## Manövrierfähigkeit und erreichbare Geschwindigkeit in schwerer See

Für die Ermittlung der für ein sicheres Manövrieren erforderlichen Mindestleistung wurden mit Hilfe einer Befragung von etwa 50 Kapitänen und Hinziehen von Berichten von Unfällen aufgrund einer unzureichenden Manövrierfähigkeit kritische Betriebsszenarien und Kriterien für das sichere Manövrieren in schwerer See ausgearbeitet, Shigunov (2016). So konnten drei Szenarien und sechs Kriterien für die Manövrierbarkeit von Schiffen im Seegang erarbeitet werden, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Sicherheitsszenarien und Kriterien.

Szenario	Anforderungen an Manövrierfähigkeit	Praktische Kriterien	Seegang
Extreme Wetterbedingungen in offener See	Abwettern im Seegang von vorn / schräg von vorn	1. Kurs halten in Seegang von vorn bis 60 Grad vom Bug	Stark bis extrem
Küstengebiet bei ansteigender Strömung	Beliebiges Manöver im Seegang von einer beliebigen Richtung	2. Kurs halten im Seegang von einer beliebigen Richtung 3. Geschwindigkeit von mindestens 6.0 Knoten im Seegang von einer beliebigen Richtung halten	Moderat bis stark
Begrenzte Geschwindigkeit in beschränkten Gewässern	Kurshalten bei einer geringen Geschwindigkeit	Kurshalten bei einer geringen Geschwindigkeit in starkem Wind ohne Wellen 4. im Flachwasser 5. im Flachwasser an Wand/Bank 6. im Flachwasser während Überholung von einem schnelleren Schiff	Starker Wind und starke Strömung, keine Wellen

In einer weiteren Untersuchung wurde überprüft, inwieweit die aktuell fahrende Flotte diesen Manövrieranforderungen gerecht wird. In Abbildung 9 ist aufgetragen, bis zu welcher signifikanten Wellenhöhe ein Schiff, abhängig von der Schiffslänge, die Anforderungen „Abwettern“, Kurs halten „Propulsion“ und „Manövrieren“ erfüllen kann. Die linke Abbildung zeigt dabei die Ergebnisse für Tanker und die rechte für Containerschiffe.

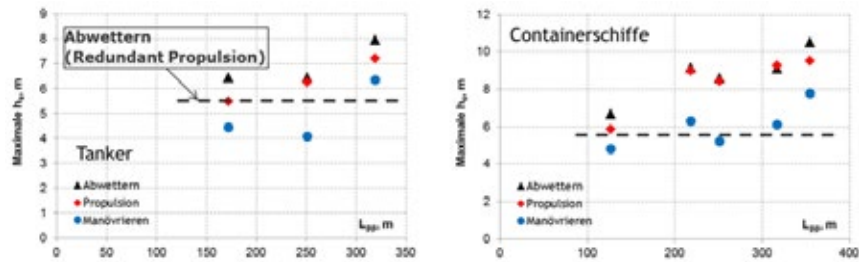


Abbildung 9. Erfüllung der Kriterien „Abwettern“, „Propulsion“ und „Manövrieren“ für Tanker (links) und Containerschiffe (rechts).

Zur Simulation von Manövern in Wellen wurde die Abhängigkeit der mittleren Kräfte von den Parametern Welleneinfallswinkel ( $\alpha$ ) und Wellenlänge ( $\lambda$ ) untersucht und der Verlauf mittels einer Kopplung aus einer Fourier-Reihenentwicklung in der Variablen  $\alpha$  und einem Polynomansatz in der Variablen  $\lambda$  für die Fourier-Koeffizienten modelliert, Uharek et. al. (2016). Anschließend wurde ein vorhandener Manöversimulator um die Berücksichtigung der mittleren Wellenkräfte erweitert, um beliebige Rudermanöver in harmonischen Wellen zu simulieren. Es wurden zahlreiche Manöver eines Kreuzfahrtschiffs bei 21 kn und konstanter Propellerdrehzahl durchgeführt, um die Abhängigkeit der Bahnkurven von den Parametern Wellenlänge und Wellenamplitude festzustellen. Abbildung 10 zeigt links zwei Drehkreise mit  $\delta=35^\circ$  für eine Welle mit  $\lambda' = 0,5$  und  $\lambda' = 1,0$  bei einer konstanten Wellensteilheit von  $H/L = 0,02$ . Es ist zu erkennen, dass die Richtung des Versatzes maßgeblich von der Wahl der Wellenlänge beeinflusst wird. Auf der rechten Seite sind Drehkreise für drei verschiedene Amplituden ( $\zeta' = 0.005, 0.01, 0.015$ ) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Stärke des Versatzes von der Wellenamplitude abhängt, während die Richtung nahezu unverändert bleibt.

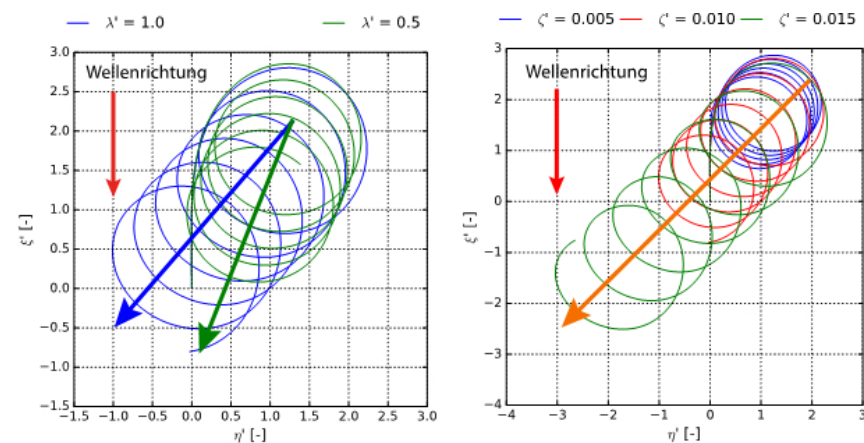


Abbildung 10: Simulierte Manöver in Wellen gleicher Steilheit (links) und gleicher Länge (rechts).

Für die Auslegung der Struktur eines Schiffkörpers werden Lastkollektive verwendet. Die Schnittlasten hängen von vielen Parametern ab (Massenverteilung, Schiffsförmigkeit, Seegänge etc.). Zudem spielt auch die im jeweiligen Seegang gefahrene Schiffsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Oft wird für die Ermittlung des Lastkollektives angenommen, dass das Schiff mit einer konstanten Geschwindigkeit in sämtlichen Seegängen operiert (beispielsweise 5 kn). Als Seegangstatistik empfehlen die IACS-Vorschriften die Verwendung des Nordatlantik „Scatter Table“ (IACS Rec. 34). Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die erreichbare Geschwindigkeit von Schiffen in schwerer See untersucht, Shigunov (2016) und Riesner et. al. (2016). Im Allgemeinen wird angenommen, dass selten vorkommenden jedoch sehr hohe Seegänge den größten Beitrag zum Langzeitwert von Schnittlasten liefern. Ausgehend von dieser Annahme wurde mit Hilfe der „Coefficient of Contribution“ Methode (Oberhagemann et al. 2012) der Seegang mit dem größten Beitrag zum Langzeitwert des vertikalen Biegemoments auf der Route „World-Wide Trade“ für verschiedene Schiffe berechnet. Darauf aufbauend wurde die erreichbare Geschwindigkeit von Schiffen in moderater und schwerer See mit RANSE und linearen 3D Randelementeverfahren berechnet, siehe Schlussbericht der Universität Duisburg-Essen, Riesner et. al. (2016) und Shigunov (2016). Abbildung 11 (rechts) zeigt beispielhaft den Zeitverlauf der Propellerdrehzahl  $n$  und der Schiffsgeschwindigkeit  $v_M$  eines Kreuzfahrtschiffs bei Wellen von vorne. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Voraugeschwindigkeit des Schiffes abnimmt und sich die Propellerdrehzahl aufgrund der Maschinendynamik reduziert. In Abbildung 11 (links) ist beispielhaft die erreichbare Geschwindigkeit (Isotachen [kn]) eines VLCC Tankers über der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und der Periode der Aufwärtsnulldurchgänge  $T_z$  in Wellen von vorne aufgetragen. Zudem ist farblich die Auftretenshäufigkeit der Seegänge (IACS Rec. 34) dargestellt. Die erreichbare Geschwindigkeit wurde hier mit einer modularen Methode, basierend auf Verfahren der Potenzialtheorie, RANSE-Verfahren sowie empirischen Verfahren, bestimmt (siehe Schlussbericht Shigunov 2016 und Riesner et. al. 2016). Die erreichbare Geschwindigkeit nimmt erwartungsgemäß mit steigender signifikanter Wellenhöhe ab. Der VLCC Tanker ist in schweren Seegängen nicht in der Lage eine Voraugeschwindigkeit von 5 kn zu erreichen.

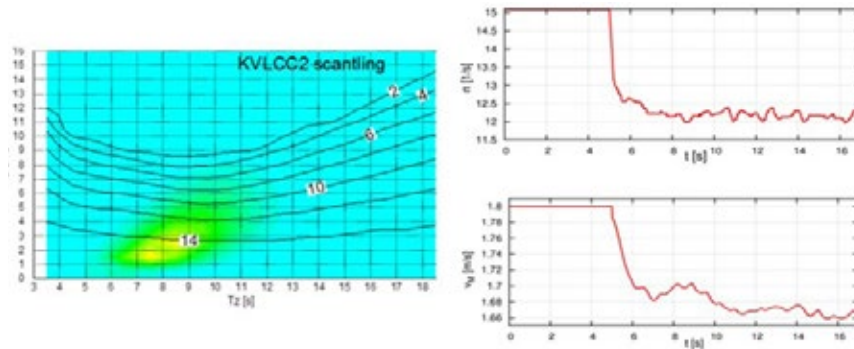


Abbildung 11: Erreichbare Geschwindigkeit eines VLCC Tankers abhängig von der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und der mittleren Periode der Aufwärtswinddurchgänge  $T_z$  (links). Propellerdrehzahl (links oben) und Schiffsgeschwindigkeit (links unten) eines Kreuzfahrtschiffs bei unregelmäßigen Wellen von vorne (Ausschnitt aus einer Zeitreihe).

### Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Vorhabens konnten weitreichende Erkenntnisse über den Zusatzwiderstand, Driftkräfte, die Propulsion sowie das Manövrierverhalten von Schiffen in moderater und schwerer See erlangt werden. Hierzu wurden numerische Berechnungsverfahren und Versuchstechniken weiterentwickelt. So wurden unter anderem neue Schleppvorrichtungen entwickelt, mit denen die natürlichen Bewegungen von Schiffen im Seegang erfasst und die resultierenden Kräfte gemessen werden können.

Darüber hinaus wurden Widerstandsoptimierungen verschiedener Schiffe für die im Einsatzgebiet vorherrschenden Seegangsbedingungen durchgeführt. Hierfür wurden zunächst entwurfsrelevante Seegänge und die, unter anderem aufgrund von wechselnden Ölpreisen und Transportaufkommen, zu erwartenden Einsatzszenarien der Schiffe ermittelt. Mit Hilfe einer „Computer Aided Engineering“ Software (CAESES®) wurden die numerischen Berechnungsverfahren innerhalb eines Optimierungszykluses mit einer Routine zur parametrisch gesteuerten Modellerstellung sowie einem statistischen Bewertungsverfahren gekoppelt. Dies ermöglichte eine automatisierte, iterative Optimierung des Gesamtwiderstands der Schiffe unter Berücksichtigung der zu erwartenden Einsatzszenarien. Unter Berücksichtigung der erlangten Kenntnisse über die Propulsion von Schiffen im Seegang kann die gesamte Propulsionsanlage sowie Hauptmaschine auf die zu erwartenden Bedingungen ausgelegt werden. Im Vergleich zu der allgemein üblichen Leistungsprognose unter Glattwasserbedingungen könnten so effizientere und energiesparendere Schiffe für realistische Betriebsbedingungen entworfen werden.

Es stellte sich heraus, dass dem Zusatzwiderstand und der Propulsion im Seegang zugrundeliegende Mechanismen erheblich vielfältiger sind als am Anfang des Vorhabens bekannt war. Aus diesem Grund besteht weiterhin Forschungsbedarf für das Verhalten und die Propulsion von Schiffen im Seegang. Forschungsfelder bilden z. B. weitere numerische sowie experimentelle Untersuchungen in schräg einlaufenden Wellen und dem damit verbundenen Einfluss von Roll- und Gierbewegungen auf die Antriebsanlage eines Schiffes. Zudem sollte die Entwicklung von numerischen Verfahren weiter vorangetrieben werden. Die Entscheidung für die Verwendung eines effizienten Randelementeverfahrens oder numerisch aufwendigen, aber deutlich genaueren RANSE-Verfahren muss derzeit von Fall zu Fall abgewogen werden.

### Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens sowie dem Projektträger Jülich für die stets konstruktive fachliche und administrative Betreuung.

Weiterhin danken wir den assoziierten Partnern Hapag-Lloyd AG und NSB Reederei für die fachliche Diskussion und Beratung ohne die das Vorhaben nicht realisierbar gewesen wäre.

## References

- [1] Cummins, W., 1962. „The Impulse Response Function and Ship Motions“, Schiffstechnik 9, 101-109
- [2] Hogben, N., 2000, „Global Wave Statistics“, British Maritime Technology Ltd., Teddington, United Kingdom.
- [3] Harries, S., 2016, „Parametrische Optimierung von Schiffsrümpfen unter betriebsnahen Umgebungsbedingungen im Seegang - Persephone (Fzk: 03SX339C)“, Schlussbericht zum BMWi Vorhaben PerSee.
- [4] IMO, 2011, „Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto“, MARPOL Annex 19., RESOLUTION MEPC.203(62).
- [5] Oberhagemann, J., Shigunov, V., el Moctar, O., 2012, „Application of CFD in Long-Term Extreme Value Analyses of Wave Loads“, Ship Technology Research 59(3), 4-22.
- [6] Palm, M., Springer, J., Jürgens, D., 2016, „Validierung und Integration von numerischen Methoden zur Leistungsprognose von Schiffen im Seegang in den schiffbaulichen Entwurfsprozess (Fzk: 03SX339A)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [7] Riesner, M., Siegmund, S., el Moctar, O., 2016, „Entwicklung von numerischen Verfahren zur Bestimmung des Leistungsbedarfs von Schiffen im Seegang - NumSee (Fzk: 03SX339B)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [8] Scharf, M., Lemmerhirt, M., Abdel-Maksoud, M., 2016, „Numerische Bestimmung der Schub- und Antriebsleistung von Schiffen unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Propeller in natürlichem Seegang - SWing (Fzk: 03SX339F)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [9] Shigunov, V., 2016, „Erforderliche Leistung und erreichbare Geschwindigkeit in schwerer See - MinPower (Fzk: 03SX339H)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [10] Ogilvie, T., 1964, „Recent progress toward the understanding and prediction of ship motions“ in Proc. of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, ser. ONR, vol. ACR-112, pp. 3–79, Bergen, Norway.
- [11] Uharek, S., Lengwinat, A., Cura Hochbaum, A., 2016, „Prognose der Manövrierbarkeit von Schiffen im Seegang - PROMANSEE (Fzk: 03SX339E)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [12] Valanto, P., 2016, „Zusatzwiderstand und Propulsion von Schiffen im Seegang - ZuWing (Fzk: 03SX339G)“, Schlussbericht zum BMWi Vorhaben PerSee.
- [13] Wagner, J., Binkowski, E., Bronsart, R., 2016, „Entwurfsoptimierung anhand realistischer Betriebsbedingungen / ökonomischer Schiffsbetrieb (Fzk: 03SX339J)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.
- [14] Walter, S., 2016, „Optimierung von Passagierschiffen im Seegang - OptiSee (Fzk: 03SX339D)“, Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben PerSee.



## HoOK – Hochseeoperationen mit Kranen

Förderkennzeichen: 03SX349

Hendrik Vorhölter (Mareval AG)

Hendrik Gröne (HeavyLift@Sea GmbH)

Stefan Krüger

(TUHH – Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit)

### Hintergrund

Die Bundesrepublik Deutschland hat es sich zum Ziel gesetzt bis zum Jahr 2020 35% der in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie aus erneuerbaren Energiequellen zu beziehen. Hierzu sollen ca. 2000 Windenergieanlagen (WEA) in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee bis zum Jahr 2020 installiert und in Betrieb genommen werden.

Für die Unternehmen der deutschen Schiffbau- und Offshore-Industrie sowie die deutschen Reedereien für Spezialschiffe ist dies ein wichtiger neuer Markt, da sich hieraus neue Entwicklungs- und Wachstumsperspektiven in einem durch Überkapazitäten, Wettbewerbsverzerrungen und Marktabschottungen geprägten Heimatmarkt ergeben. Für die Umsetzung dieses Vorhabens ist eine effiziente Prozesskette notwendig, die insbesondere durch die Nutzung von Kranen gewährleistet werden kann. Zur Errichtung von WEA in der Nordsee sind besondere Anforderungen im Vergleich zur Öl- und Gasindustrie zu berücksichtigen:

- Um die notwendige Installationsgeschwindigkeit zur Erfüllung der politischen Ziele realisieren zu können, muss auch bei für Kranoperationen extremen Witterungsbedingungen gearbeitet werden. Es besteht nicht die Möglichkeit, in geschützte, küstennahe Gewässer auszuweichen oder das optimale Wetterfenster abzuwarten.
- Die Komponenten der WEA mit denen gearbeitet werden muss, unterscheiden sich substantiell von den bisher in der Offshore-Technik üblichen Strukturen. Die Installation von schweren Teilen erfolgt in größeren Höhen. So werden die Gondeln der Windturbinen mit Gewichten bis zu 350 t in bis zu 110 m Höhe installiert. Es werden aber auch relativ leichte Teile mit extremen Ausmaßen gehandhabt. Ein typischer Flügel einer WEA im Offshore-Bereich wiegt 12 t und ist 60 m lang. Die Operationen werden somit außerhalb des bisherigen Erfahrungshorizonts von Kranoperationen durchgeführt.

- Es müssen sehr viele Kranoperationen durchgeführt werden:  
Die Errichtung eines Windparks mit 80 WEA erfordert einige Tausend Kranoperationen mit Lastgewichten von bis zu 1000 t. Dazu kommen noch die Kranoperationen beim Betrieb der Anlagen, falls Wartungs- oder Reparaturarbeiten durchgeführt werden müssen. Da die Strukturen für einen Windpark allerdings ähnlich sind, besteht ein großes Optimierungspotential für die Kranoperationen.
- Zur Durchführung der Transport- und Installationsaufgaben steht momentan nicht ausreichend viel geeignetes Gerät zur Verfügung. Deshalb werden auch Transport- und Installationsschiffe verwendet, die nicht für den Zweck der Installation von WEA entwickelt worden sind.

Ein Ansatz diesen Aufgaben zu begegnen ist eine konsequente Berechnung der Offshore-Kranoperationen bereits in der frühen Entwurfs- und Planungsphase. Hierbei ergeben sich aus dem Stand der Technik einige Probleme:

- Die Betrachtung des speziellen Problems der Analyse von Kranoperationen erfolgte nur sehr vereinzelt.
- Lösungen für einzelne Probleme der Analyse von Kranoperationen wurden bereits erarbeitet, z.B. die hydrodynamische Kopplung von Strukturen im Seegang, die Integration eines Modells für die Bewegung der Last und erste Ansätze für Analysen im Zeitbereich.
- Die dynamische Simulation erfolgte bisher in der Regel durch lineare Lösungen des Seegangproblems. Dies mag für Kranbargen bei kleinen Wellenhöhen noch zuträglich sein. Beim Einsatz von Schiffen im Offshore-Bereich auch bei größeren Wellenhöhen, wie dies mehr und mehr der Fall ist, ist dies allerdings nicht mehr uneingeschränkt zu verwenden.
- Eine vollständige Analyse der Kranoperation unter Einbeziehung aller Lasten, die auf die Kranlast wirken, erfolgte vor Projektbeginn nicht.

Hieraus ergab sich ein grundsätzlicher Handlungsbedarf, um die Lücken in der Technologie für die Simulation von Kranoperationen von bewegten Plattformen zu füllen.

### **Ziele des Vorhabens**

Das Ziel des Verbundvorhabens HoOK war es Berechnungswerkzeuge für Offshore-Kranoperationen für die frühe Entwurfs- und Planungs-

phase zu entwickeln. Die Werkzeuge sollten im Besonderen folgende Anforderungen erfüllen:

- Der Modellierungs- und Berechnungsaufwand sollte gering sein, sodass die Werkzeuge auch in frühen Projektphasen, in denen nur ein geringer Ressourcenaufwand möglich ist, eingesetzt werden können.
- Da Kranoperationen auf See sicherheitskritisch sind, mussten die Werkzeuge ausreichend validiert werden, um sie einsetzen zu können.
- Die physikalisch relevanten Effekte, wie nicht lineare Schiffsstabilität oder die Kopplung von Schiffs- und Lastbewegungen, mussten vollumfänglich abgebildet werden.
- Die Kranoperation sollte vollständig im Zeitbereich berechnet werden können, um sicher die kritische Phase einer Kranoperation identifizieren zu können.
- Es sollten sowohl Standardoperationen als auch komplexe Operationen mit mehreren gekoppelten Körpern betrachtet werden können.

### **Planung**

Zur Umsetzung des Vorhabens haben sich drei Partner zusammengeschlossen; die Ingenieurbüros Mareval AG und HeavyLift@Sea sowie das Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit der Technischen Universität Hamburg. Das Vorhaben begann im April 2013 und wurde drei Jahre später planmäßig erfolgreich abgeschlossen.

### **Mareval AG**

Die MAREVAL AG ist ein unabhängiges Ingenieurbüro aus Hamburg und erbringt Ingenieur-, Management- und Beratungsdienstleistungen für die internationale maritime und Offshore-Industrie. Schwerpunkt ist die Offshore-Energie mit erneuerbaren und konventionellen Energieträgern. Weitere Aktivitätsfelder sind Maritime Operationen, See-Ingenieurbau und Schiffbau.

## HeavyLift@Sea GmbH

Das im Juni 2012 gegründete Unternehmen HeavyLift@Sea ist ein Ingenieurbüro, welches Dienstleistungen aus den Bereichen des Entwurfs, der Projektierung und dem Bau sowie dem Betrieb von Schiffen anbietet. Der wesentliche Fokus liegt auf dem Offshore-Sektor sowie auf dem Heavy-Lift-Markt.

## TUHH Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit

Zentraler Forschungsschwerpunkt des Instituts für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit sind wissenschaftliche Fragestellungen, die sich mit der Verbesserung des Entwurfsprozesses beschäftigen. Dabei geht es immer um die Entwicklung wissenschaftlicher Simulationsverfahren, die helfen sollen, bestimmte Eigenschaften des Schiffes in der frühen Entwurfsphase absichern zu können. Dazu wurden in verschiedenen Vorhaben Fragen der Schiffssicherheit in schwerem Seegang mit Hilfe von Simulationen bearbeitet.

## Projektbegleitender Ausschuss

Zur Unterstützung des Projekts ist ein projektbegleitender Ausschuss eingerichtet worden. In diesem Ausschuss sind der Kranhersteller TTS NMF GmbH, die Schwergutreederei SAL Heavylift GmbH sowie der Zertifizierer DNVGL SE vertreten gewesen. Der Ausschuss wurde in seinen Sitzungen über die geplanten Arbeiten in dem Projekt informiert. Es wurden wichtige Rückmeldungen gegeben und Informationen für die Validierung zur Verfügung gestellt.

## Arbeitsplanung

Zum gesteuerten Erreichen der Projektziele ist das Vorhaben in sieben Arbeitspakete aufgeteilt worden. Die Arbeitspakete wurden den zwei Hauptfeldern statische und dynamische Simulation zugeordnet. Jedes Arbeitspaket ist in der Hauptsache einem Partner zugeordnet worden. Dies hat sich im Projektverlauf als sehr gut erwiesen, weil es dadurch klare Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten gab. Abbildung 1 zeigt eine grafische Übersicht der Arbeitspakete mit einer farblichen Zuordnung der Verantwortlichkeiten.

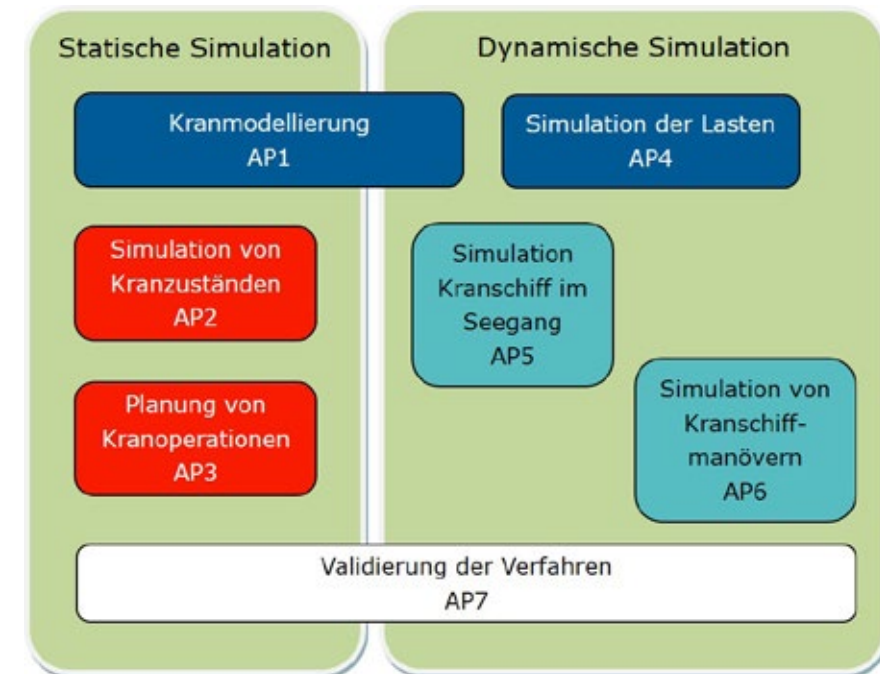


Abbildung 1 : Arbeitsplan des Verbundprojekts mit Zuordnung der Partner (blau Mareval, rot HeavyLift@Sea und türkis TUHH).

## Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen werden im Folgenden kurz zusammengefasst. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf die Abschlussberichte und Veröffentlichungen, die im Rahmen des Vorhabens entstanden sind, verwiesen.

## AP 1 Kranmodellierung

Um Kranoperationen in der Schiffsentwurfs- und Simulationsumgebung E4 modellieren zu können, wurde ein universelles Kranmodell entwickelt. Das Modell basiert auf einem Mehrkörperansatz. Die Körper können kontrolliert zueinander bewegt werden, es können Steuergrößen definiert werden und das Modell ist dazu in der Lage für das Mehrkörpersystem automatisch die Gleichgewichtslage zu finden. Um eine schnelle Modellierung von Standardfällen zu ermöglichen gibt es hinterlegte Modelle von Standardtypen, die einfach skaliert werden können. Mit dem System können auch komplexere Krane modelliert werden.

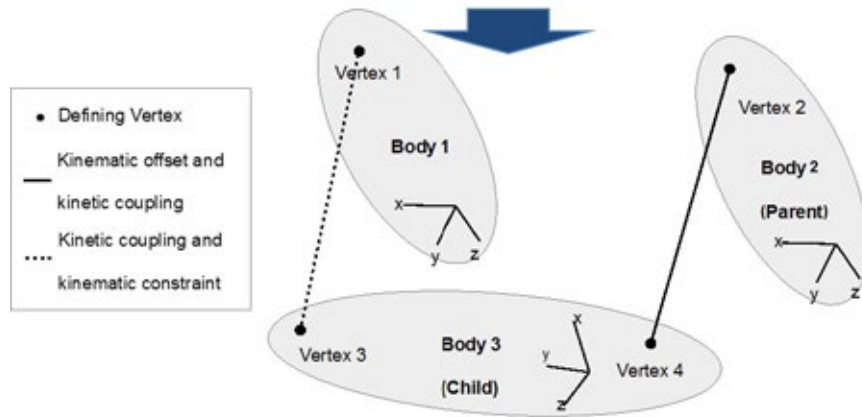


Abbildung 2: Prinzip des Mehrkörpersystems für das universelle Kranmodell

Als Ausgabe für andere Berechnungsmethoden liefert das Modell neben der grafischen Darstellung auch den exakten Schwerpunkt sowie die Trägheitsmomente des Kransystems.

### AP 2 Simulation von Kranzuständen

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Simulation von Kranoperationen mit Schiffen ist die korrekte Bestimmung der Schwimmelage. Dazu wurde eine Erweiterung der Schiffshydrostatikmodule vorgenommen, die es ermöglicht die Stabilitätseinbußen durch die Kranlast oder die Kranlasten automatisch zu ermitteln. Besonderes Augenmerk wurde hierbei zum einen daraufgelegt, dass das Verfahren auch die Ballastwasserzustände auch mit Flüssigkeitsverschiebemomenten korrekt erfasst. Da Kranoperationen mit großen Lasten immer mit Ballastierungsoperationen verbunden sind, war dies eine zwingende Voraussetzung. Zum anderen musste das Berechnungswerkzeug auch in ungewöhnlichen Situationen robust und reproduzierbar die korrekte Schwimmelage und die Position der angeschlagenen Ladung

ermittelt zum Beispiel, wenn eine falsche Schwerpunktsannahme der Ladung vorliegt oder der Abriss einer Schlinge simuliert werden soll. Dieses konnte erreicht werden.

Tap, trim, heel: 7.579 m 2.052 m 8.326 d  
Time: 00:00:00

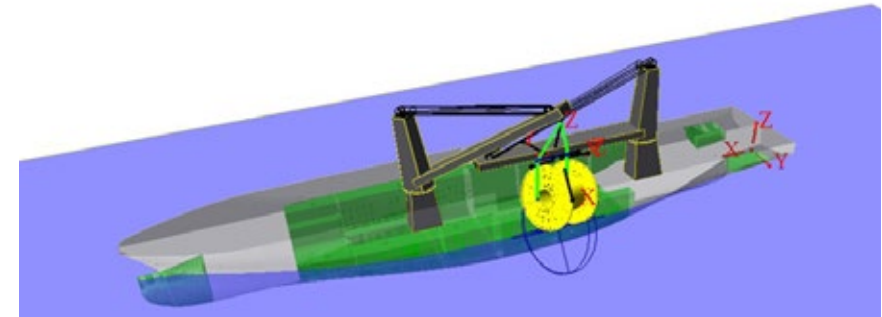


Abbildung 3 : Beispiel der Berechnung einer Umschlagsoperation mit einem Mehrkörpersystem (Traverse und Ladung) mit nicht korrekten Schwerpunktsannahmen.

### AP 3 Planung von Kranoperationen

Das Ziel des Vorhabens war es eine Kranoperation vollständig im Zeitbereich berechnen zu können. Dazu wurde eine Beschreibungsmethodik entwickelt mit der eine Kranoperation anhand von signifikanten Zeitschritten beschrieben wird. Zu diesen Zeitschritten werden Änderungsraten für die Steuergrößen der Kräne sowie für den Füllstand der Ballastwassertanks vorgegeben. Für jeden beliebigen Zwischenzustand in der Beschreibung lässt sich automatisch die Schwimmstabilität prüfen. Außerdem kann ein Eingabebrief für dynamische Simulationen mit den erforderlichen Daten, wie zum Beispiel Position der Krannocken, freie Seillängen und Schwerpunktslage, erzeugt werden.

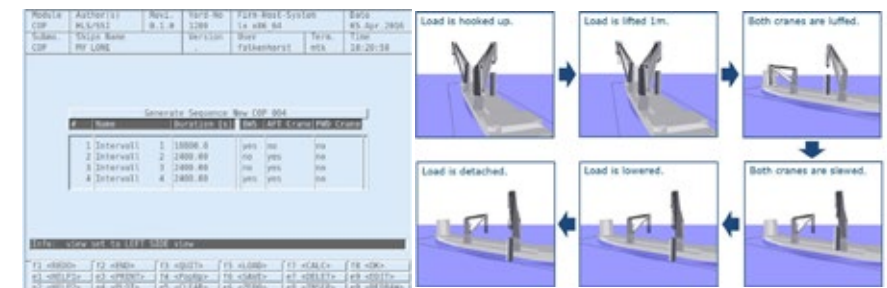


Abbildung 4 : Beispiele für die Beschreibungsmaske einer Kranoperation sowie der schematische Ablauf einer Operation mit zwei Kranen

## AP 4 Simulation der Lasten

Um die Umweltbedingungen in der Simulation korrekt berücksichtigen zu können, müssen auch die zusätzlichen Lasten aus Wind, Wellen und Strömung auf die Kranlasten in die Simulation eingebracht werden. Um die Berechnungsmethoden möglichst universell zu halten, wurde der Ansatz gewählt, dass die Umweltlasten als zusätzliche Kräfte auf die Kranlast aufgebracht werden. Hierfür wurde ein Morison-Ansatz verwendet. Da bei Off-shore-Kranoperationen zwei Phasen häufig relativ kritisch sind, nämlich das Durchqueren der Welleneinflusszone sowie der Zustand unmittelbar vor dem Absetzen der Last auf dem Seeboden, wurden für diese Phasen automatische Korrekturen eingebaut. So wird zum Beispiel die hydrodynamische Trägheit bei der Annäherung an den Seeboden automatisch angepasst.

## AP 5 Simulation Kranschiff im Seegang

Ein Kernstück des Vorhabens stellt die dynamische Simulation der Kranoperation im Seegang dar. Hier wurden parallel zwei verschiedene Ansätze entwickelt. Zum einen wurde die Methode E4-Hoist entwickelt, mit der eine Einhakenoperation mit einem Kran sehr schnell und effizient untersucht werden kann. Zum anderen wurde das Verfahren NewHoist entwickelt, mit dem auch komplexere Vorgänge, wie zum Beispiel der kritische Fall der abreißenden Kranlast, betrachtet werden können.

### E4-Hoist

Die Methode E4-Hoist basiert auf dem Seegangscode E4-Rolls. Um mit E4-Rolls Kranoperationen betrachten zu können, wurden zwei zusätzliche Freiheitsgrade für ein Lastpendel eingeführt. Mit diesen zusätzlichen Freiheitsgraden kann die Kopplung von Last- und Schiffsbewegung bereits vollständig erfasst werden, mit noch vertretbaren Einbußen in der Performanz der Berechnung. Für Kranoperationen in Luft, d.h. ohne Wasserkontakt der Kranlast, sind die Berechnungen ca. 5000 mal schneller als die Echtzeit.

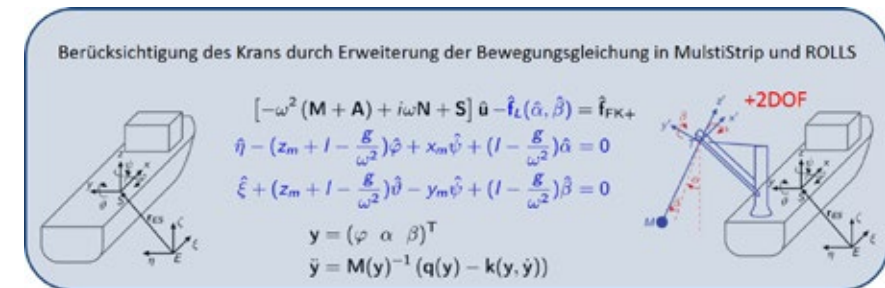


Abbildung 5 : Modifikation des E4-Rolls

### NewHoist

Um komplexere Vorgänge, wie eine abreißende Kranlast bei einer Zweikranoperation, berechnen zu können, wurde die Methode New-Hoist entwickelt. In dieser Methode wurde die Kranlast nicht mit zwei, sondern mit fünf Freiheitsgraden erfasst. Es werden in der Kinematik, Kinetik und Hydrostatik alle Freiheitsgrade vollständig nicht-linear und mit allen Kopplungstermen erfasst. Die Radiation der Wellen wird über ein Impulsantwortverfahren mit einer Approximation durch ein Zustandsraummodell erfasst.

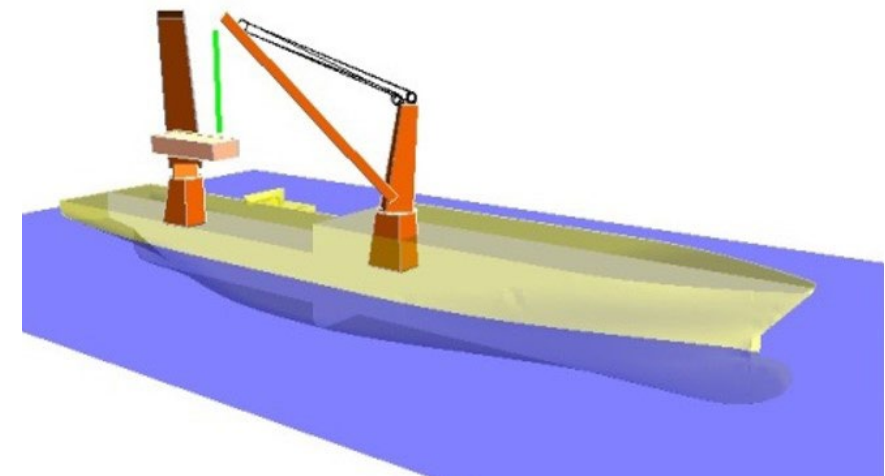


Abbildung 6 : Simulation mit NewHoist

## AP 6 Simulation von Kranschiffmanövern

In der Vergangenheit gab es häufiger Diskussionen, ob Kranoperationen einen Einfluss auf die Manövrierfähigkeit von Schiffen haben. Insbesondere da bei Offshore-Operationen häufig Systeme zum dynamischen Positionieren

verwendet werden. Im Rahmen von HoOK wurde deshalb eine Erweiterung der Manöversimulationen vorgenommen, die es ermöglicht eine pendelnde Lastbewegung mit zu erfassen.

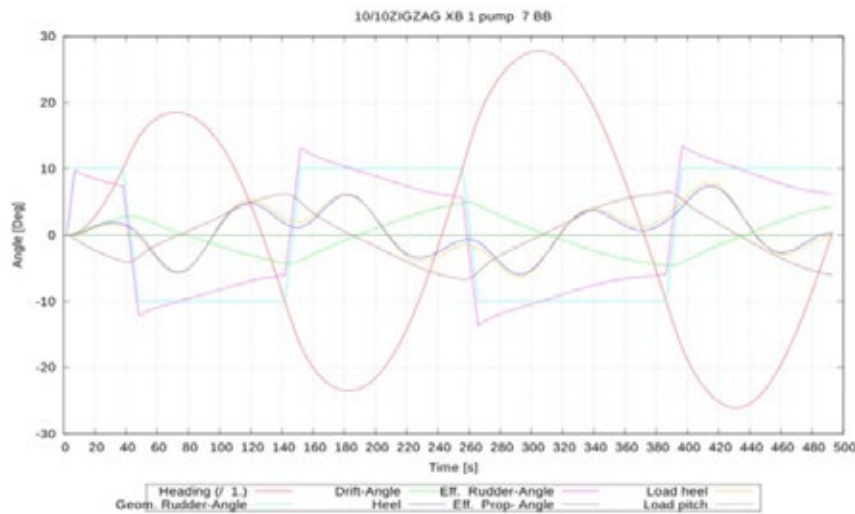


Abbildung 7 : Pendelnde Lastbewegung bei einem Zick-Zack-Manöver.

### AP 7 Validierung

Um die neu entwickelten Verfahren in der Praxis sicher einsetzen zu können, wurde eine umfangreiche Validierung durchgeführt. Das Problem hierbei bestand darin, dass es nur sehr wenige öffentlich verfügbare Daten gibt. Deshalb wurde anders als ursprünglich geplant im Laufe des Vorhabens entschieden auch Modellversuche durchzuführen. Ferner wurden bei Offshore-Operationen Daten aufgenommen und es wurde auf Messdaten der Reederei SAL Heavylift, die den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurden, zurückgegriffen.

### Modellversuche

Im Rahmen der Modellversuche wurde der Fall der abreißenden Kranlast bei einem Tandemlift untersucht. Im Zuge der Messungen wurden auch Rollauschwingversuche mit und ohne Kranlast durchgeführt.



Abbildung 8 : Schiffsdodell für die Versuche mit abreißender Kranlast

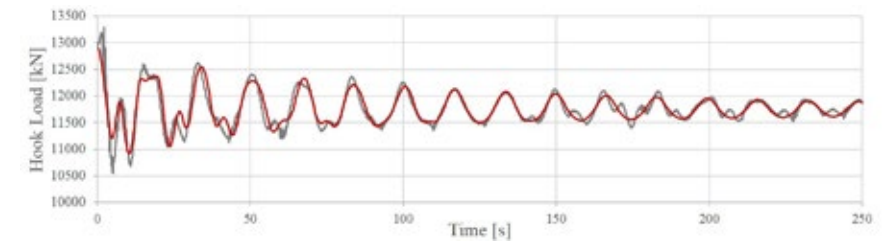


Abbildung 9 : Vergleich von gemessenen und berechneten Hakenlast aus einem Rollauschwingversuch

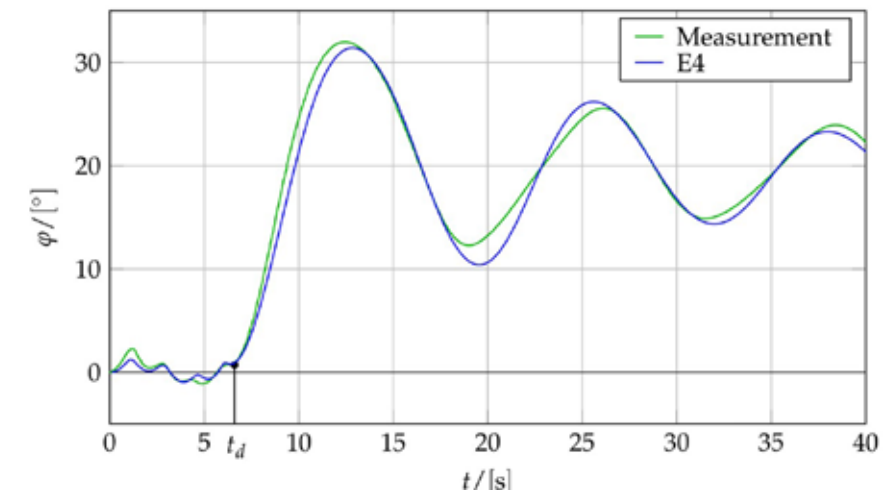


Abbildung 10 : Vergleich des gemessenen und berechneten Rollwinkels bei abreißender Kranlast.

## Großausführungsmessungen

Mit den Messdaten aus einer Messkampagne während einer Offshore-Operation, während der eine Struktur auf dem Meeresboden abgesetzt wurde, konnte auch der Fall einer getauchten Kranlast erfolgreich validiert werden.

## Verwertung

Bereits während der Projeklaufzeit sind die neu entwickelten Werkzeuge in vier Tätigkeitsfeldern eingesetzt worden:

- Bei dem Entwurf von neuen innovativen Kranschiffen wurden die Werkzeuge dazu genutzt die Einsatzfähigkeit der Entwürfe zu demonstrieren.
- Für Planungen von Offshore-Operationen wurde die Machbarkeit nachgewiesen.
- Für bereits durchgeführte Operationen, bei denen unerwartete Schwierigkeiten aufgetreten sind, konnte in einer nachträglichen Untersuchung das Auftreten bestätigt werden und es konnten Möglichkeiten zur Abhilfe bestimmt werden. Dadurch konnten die neuen Verfahren auch weiter validiert werden und es hat sich gezeigt, dass kritische Situationen erkannt werden können.
- Die neuen Verfahren wurden für die Evaluierung von neuen Stabilitätsvorschriften für Kranoperationen mit Schiffen verwendet, die insbesondere auf den Aspekt der abreißenden Ladung eingehen.

## Zusammenfassung

Das zu Beginn des Vorhabens gesetzte Ziel, eine Offshore-Kranoperation durchgängig im Zeitbereich unter Berücksichtigung der nicht-linearen Kopplung von Last- und Schiffsbewegung berechnen zu können, konnte vollständig erreicht werden. Mit den neu entwickelten Werkzeugen können solche Berechnungen durch eine effiziente Prozesskette bereits in der frühen Entwurfs- und Planungsphase durchgeführt werden. Dies wird dazu beitragen Offshore-Kranoperationen in der Zukunft wirtschaftlicher und sicherer zu machen.

## Danksagung

Das Vorhaben wurde aus dem Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen 03SX349 gefördert. Dafür und für die fachliche Unterstützung durch das Ministerium und den Projektträger PTJ bedanken sich die Vorhabenspartner.

## Veröffentlichungen

- [1] Vorhölter, H./ Günther, J.-H. (2013): Direct Simulation of Offshore Lifting Operations. Offshore Wind, Vol IV, No 04 October 2013. pp 34-38. Rotterdam. The Netherlands.
- [2] Vorhölter, H. (2013): Optimierung von Offshore-Kranoperationen. Hansa International Maritime Journal. Jahrgang 150 2013 Nr. 7.
- [3] Vorhölter, H./ Hatecke, H./ Feder, D.-F. (2014): Design Study of Floating Crane Vessels for Lifting Operations in the Offshore Wind Industry. Proceedings of the 12th International Marine Design Conference, IMDC 2015. Tokyo, Japan.
- [4] Vorhölter, H./ Christiansen, J./ Hatecke, H. (2014): Universal Crane Model for the Ship Design System E4. Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2014. San Francisco, California, USA.
- [5] Hatecke, H./ Krüger, S./ Christiansen, J./ Vorhölter, H. (2014): A fast Sea Keeping Simulation Method for Heavy Lift Operations based on Multi Body System Dynamics. Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2014. San Francisco, California, USA.
- [6] Hatecke, H. (2015): The impulse response fitting and ship motions. Ship Technology Research, Vol 62, Issue 2, pp 97-106
- [7] Hatecke, H./ Krüger, S. (2015): Robust Identification of Parametric Radiation Force Models via Impulse Response Fitting, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics.
- [8] Vorhölter, H./ Hatecke, H./ Christiansen, J. (2016): Validation of the Non-Linear Off-shore Lifting Simulation Code E4-Hoist, Int Conf on Ships and Offshore Structures, ICSOS 2016, Hamburg, Germany.
- [9] Hatecke, H. (2016): Dynamic Stability of Heavy Lift Vessels During Loss of Tandem Load, Schriftenreihe Schiffbau, Hamburg (in Vorbereitung).

## OptiStopp – Optimierung des Stoppmanövers von Schiffen mit Verstellpropellern und Hybridantrieben

Förderkennzeichen: 03SX356

Marc Steinwand (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH)  
Sophie Stutz, Kay Tigges (Siemens AG)  
Moustafa Abdel-Maksoud, Jan Clemens Neitzel-Petersen,  
Markus Pergande (Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Frank Oberhokamp, Wolfgang Sichermann, Christian Thieme  
(thyssenkrupp Marine Systems GmbH)

### Einleitung

Bei den Anforderungen an Schiffe neuester Generation stehen breite Einsatzmöglichkeiten, Emissionsverminderung und alternative Kraftstoffe im Fokus. Diesen Anforderungen wird mit zunehmend komplexeren Antriebsanlagen wie z.B. diesel-elektrischen und hybriden Systemen Rechnung getragen. In Kombination mit Verstellpropelleranlagen bieten diese Antriebe ein großes Maß an Diversität für den Schiffsbetrieb.

Im Vergleich zur konventionellen Anordnung mit Zweitakt-Dieselmotor und Festpropeller ermöglichen solche Antriebsanlagen hinsichtlich des Manövrier- und Stoppverhaltens auch für die Schiffssicherheit Verbesserungen zu erreichen. Dabei stellt die Kombination aus Verstellpropeller und Elektromotoren eine große Herausforderung dar. Gewisse Betriebszustände wie hohe Rückspeiseleistungen in das Bordnetz infolge des Turbinenbetriebs des Propellers („Windmilling“) sind unbedingt zu vermeiden. Ebenso dürfen die Dieselmotoren nicht durch starke Lastvariation über die Grenzen ihrer Belastbarkeit hinaus beansprucht werden.

Um das Verhalten der oben genannten Antriebskonfiguration unter dem Aspekt der Optimierung (Minimierung) des Stoppweges zu untersuchen, wurde im Verbundvorhaben OptiStopp eine Simulationsumgebung entwickelt, in der alle Komponenten des Antriebsstrangs sowie die hydrodynamischen Eigenschaften des Schiffsrumpfes in hoher Detailtiefe modelliert werden. Parallel zu dieser Entwicklung wurden zahlreiche Modellversuche durchgeführt, um die Simulationsergebnisse zu bewerten.

Die Simulation der Stoppmanöver wird in Matlab / Simulink durchgeführt. Sie stützt sich auf Datensätze der betrachteten Schiffe, in denen deren hydrodynamische Eigenschaften zusammengefasst sind, und Modelle, die die jewei-



lige Antriebsanlage abbilden. Zur Bestimmung der hydrodynamischen Kennwerte wie Manövrierkoeffizienten und Propellerfreifahrkurven wurden umfangreiche Berechnungen mit einem numerischen Rechenverfahren für viskose Strömung (Ansys-CFX) durchgeführt. Die maschinenbaulichen und elektrotechnischen Antriebsteile wurden für die Simulation in Unterkomponenten zerlegt und über diverse Parameter so eingestellt, dass sie das Verhalten der Anlagen bestmöglich beschreiben.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Datensätze für vier unterschiedliche Schiffstypen erstellt und in die Simulationsumgebung integriert. Die Hauptabmessungen der untersuchten Schiffe sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für die Schiffe stehen verschiedene Dieselmotormodelle zur Verfügung. Als elektrische Antriebsmotoren können Synchron- und Asynchronmotoren genutzt werden.

*Tabelle 1: Untersuchte Schiffe*

	Container-Feeder	Ro-Ro	Marineschiff	VLCC (DTC)
Länge (m)	110,0	183,4	149,6	355,0
Breite (m)	18,0	25	18,8	51,0
Tiefgang (m)	7,1	7,5	5,4	14,5
Blockkoeffizient	0,774	0,640	-	0,661
Geschwindigkeit (kn)	14,0	19,5	> 26,0	25,0
Nr. Propeller	1	1	2	1

Das Feeder-Schiff wurde zur Validierung der Simulationsergebnisse experimentell untersucht. Dabei wurden neben den Standardwiderstands- und Propulsionsversuchen verschiedene für das Thema des Vorhabens konzipierte Manövrier- und Propulsionsversuche durchgeführt. Hinzu kommen Stoppmanöver mit gefesseltem und freifahrendem Modell. Um diese Manöver mit einem realen Verstellpropellersystem durchzuführen, wurde ein dynamisch verstellbarer Modellpropeller entwickelt. Für die untersuchten Propeller wurde neben der Bestimmung der Freifahrkurven für alle vier Quadranten auch die Wirkung der Kavitation auf die Schub- und Momentenbeiwerte experimentell bestimmt.

### **Simulationsumgebung**

Die Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens aller am Stoppmanöver beteiligten Komponenten und der dabei auftretenden Wechselwirkungen stellt hohe Anforderungen an die Simulationsumgebung. Die Wahl der Umge-

bung für die numerische Umsetzung fiel auf die Software Matlab / Simulink, da diese eine beliebige Modellierungstiefe zulässt. Außerdem ist eine dynamische Entwicklung des Simulationsverfahrens durch Zusammenarbeit aller Projektpartner mit dieser Software möglich.

### **Simulator**

Im Simulator werden die numerischen Modelle aller am Gesamtsystem Schiff beteiligten Komponenten integriert. Mit der Fokussierung auf dieselektrische, hybride Antriebsanlagen lassen sich drei wesentliche Komponenten herausstellen: die Dieselmotorenanlage, die elektrischen Komponenten und das hydrodynamische Modell zur Simulation des Verhaltens von Schiff und Propeller und dessen Wechselwirkung während des Stoppmanövers. Die Dieselmotorenanlage stellt die für den Schiffsbetrieb benötigte mechanische Leistung bereit. Hier erfolgt der Übergang zum elektrischen System, von dem über den Generator das Bordnetz gespeist wird. Aus dem Bordnetz werden, neben der Last aus dem weiteren Schiffsbetrieb, über Elektromotoren der oder die Propeller angetrieben. Der Propeller setzt die mechanische Leistung in Schubleistung um und stellt damit den Übergang zur Hydrodynamik des jeweiligen Schiffes und Antriebs dar. Die Propellerkräfte beeinflussen neben dem Ruder maßgeblich das Verhalten des Schiffes beim Stoppmanöver.

Das mechanisch-elektrische System ist somit numerisch über das Drehmoment und die Drehzahl der Propellerwelle mit dem hydrodynamischen Modell verbunden. Über den Fahrhebel können hinterlegte Fahrprofile, z.B. Kombinatorikurven, angesteuert werden. Sie geben die Soll-Drehzahl und die Soll-Steigung für die Antriebsanlage sowie die Verstellzeiten vor. Mithilfe der Informationen über die Änderung der Fahrhebelstellung und momentanen hydrodynamischen Größen wie Schiffsgeschwindigkeit, Driftwinkel, Propellerschub und -moment, usw. wird ein Ungleichgewicht ermittelt und über das explizite Euler Verfahren die Antwort des Systems auf diese Veränderungen bestimmt. Abbildung 1 zeigt die Zusammenhänge im Simulator.

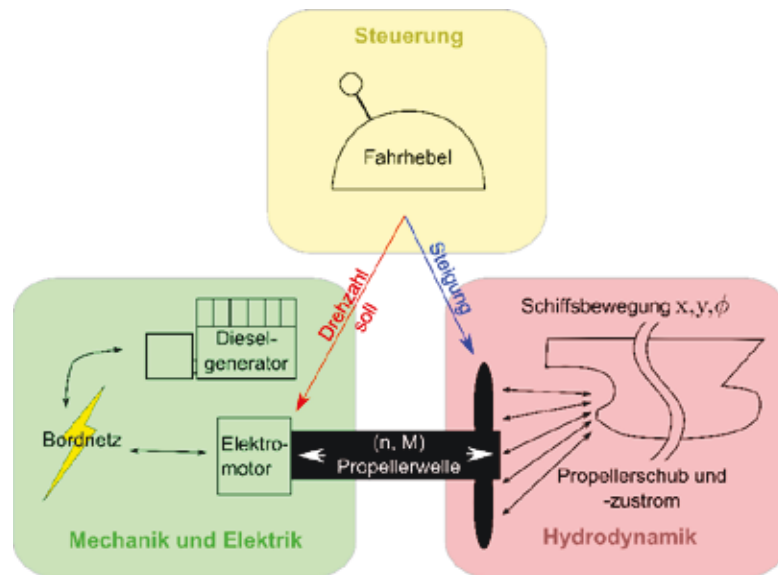


Abbildung 1: Bestandteile des Simulators

### Dieselmotorenanlage

Für die Beschreibung des Verhaltens der Antriebsanlage während differenzierter Fahrmanöver wurden Simulationsmodelle für verschiedene hybride Antriebsanlagen entwickelt, die die spezifizierten Eigenschaften der Anlagen nachbilden. Es wurde darauf geachtet, dass die Antriebskomponenten in unterschiedlichen Detaillierungsstufen modelliert werden. Eine modulare Konzeption vereinfacht den Austausch oder die Modifikation von Modellteilen.

Die Modellierung des Dieselmotors erfolgte unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Turboaufladeverfahren mit einer Abgasrückführung, sodass eine möglichst große Bandbreite abgedeckt wurde. Der thermodynamische Kreisprozess wurde durch ein Mittelwertmodell (modifizierter Seiliger-Prozess) beschrieben, sodass eine Echtzeitsimulation möglich war. Der Fokus der Modellbildung lag auf Viertakt-Dieselmotoren mit Turboaufladung.

Weiterhin wurden Dieselmotormodelle mit unterschiedlichen Turboaufladekonzepten entwickelt. Berücksichtigt wurden die einstufige Turboaufladung mit Hochdruckabgasrückführung (HD-AGR), die einstufige Register-Turboaufladung mit HD-AGR und die zweistufig geregelte Turboaufladung mit HD-AGR.

Die Reduzierung der Stickoxidemissionen erfolgt bei den heutigen modernen Motoren hauptsächlich durch die Abgasrückführung (AGR). Dabei wird ein Teil des Abgases gekühlt und wieder der Ladeluft beigemischt. Hierdurch sinkt die Spitzentemperatur der Verbrennung, und es entstehen weniger Stickoxide. Das Abgas kann nur dann in die Zylinder zurückgeführt werden, wenn ein Druckgefälle zwischen Abgas- und Ladeluftseite vorliegt. Das Druckgefälle hat Ladungswechselverluste zur Folge, was tendenziell zu einer geringeren Motorleistung oder höherem Kraftstoffverbrauch im Teillastbereich führt. Dieses Verhalten wurde durch geeignete physikalische Modelle abgebildet. Dieselmotoren mit höherer Leistung besitzen meist eine einstufige oder zweistufige Registeraufladung. Für die Abbildung solcher Aufladekonzepte wurden geeignete physikalische Modelle entwickelt.

### Elektrische Komponenten

Die elektrotechnischen Bauteile der hybriden Antriebsanlage werden ebenso im Simulator bereitgestellt. Die zu behandelnden Antriebskomponenten umfassen E-Fahrmotoren, Umrichter, Trafos und Generatoren für Ein- und Zweipol-Antriebe. Für jede Antriebskomponente sind zudem die Regel- und Betriebsstrategien zu berücksichtigen.

Die Modellierung der E-Fahrmotoren berücksichtigt Synchron- und Asynchronmotoren mit den entsprechenden leistungselektronischen Komponenten zur Drehzahl- oder Drehmomentregelung. Ein wesentliches Element ist hierbei der Gleichspannungs-Zwischenkreis des Antriebsumrichters. Basis der Umsetzung sind die Modellschiffe und ihre individuellen Antriebskonzepte sowie die detaillierte Liste aller ihnen jeweils zugeordneten Antriebskomponenten. Jede Antriebskomponente, die in das Teilprojekt von Siemens gehört, wird durch ein Matlabmodell abgebildet.

Die entwickelten Maschinenmodelle wurden anhand der erstellten Singlelines zu den zu simulierenden Antriebssystemen in Simulink zusammengesetzt. Die einzelnen Maschinenmodelle wurden so verknüpft, dass sich in der Simulation alle relevanten Systemgrößen übertragen und Maschineninteraktionen erfassen lassen (Abbildung 2).

Die Modellierung der E-Fahrmotoren umfasst Asynchron- und Synchronmotoren, Umrichtertransformatoren, Spannungszwischenkreisumrichter, Bremswiderstände und ein vereinfachtes Bordnetz.

Grundlage sind die elektrischen Ersatzschaltbilder der oben genannten Komponenten und die sich daraus ergebenden Differentialgleichungen. Die Modelle wurden im Leistungsbereich für Schiffsantriebe skaliert bzw. paramet-

riert (100kW-20MW). Unter diesen Leistungsbereich fallen somit sowohl Niederspannungs- als auch Mittelspannungsbordnetze. Es werden sowohl Umrichter mit „Active Front End“, AFE und ohne Rückspeisemöglichkeit ins Bordnetz betrachtet („Diode Front End“ mit Bremswiderstand, DFE).

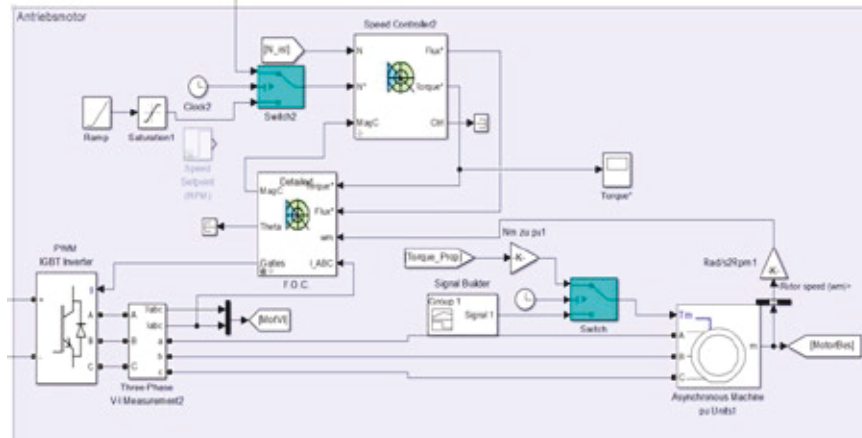


Abbildung 2: Modellbeispiel Antriebsmotor

Die Modelltiefe wurde so gewählt, dass sich das Bordnetz mit der nötigen Genauigkeit abbilden lässt. Das bedeutet, dass die sich ergebenden Spannungen, Ströme, Leistungen und Momente mit den Ergebnissen aus Großversuchen vergleichbar sind.

Darüber hinaus wurden mit den errechneten Daten die Dimensionierungsverfahren für die benötigten Bremswiderstände bestimmt. Die Steuerlogik der Komponenten wurde ebenfalls nachgebildet. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf den Drehzahlregler und dessen Komponenten (Hochlaufgeber, Leistungsbegrenzungen) gelegt, da die Auslegung und Parametrierung direkten Einfluss auf das Stoppverhalten nimmt.

Nicht berücksichtigt wurden Effekte, die für die Untersuchung des zeitlichen Stoppverhaltens nicht relevant sind. Dazu gehören Erwärmung, Geräuschentwicklung und Verhalten im gestörten Betrieb.

### Datensätze hydrodynamischer Kenngrößen

Die Hydrodynamik des Schiffs, also die Bewegung und die daraus resultierenden Kräfte auf Rumpf, Ruder und Propeller, werden im Simulator auf Basis einer schiffsspezifischen Datenbank berechnet. Eine besondere Herausforderung bei der Simulation eines Stoppmanövers ist die Berücksichtigung

der Änderung der Schiffsgeschwindigkeit, im Zuge derer sich die auf das Schiff wirkenden hydrodynamischen Kräfte ändern.

### Rumpf und Ruder

Die Datenbank enthält schiffsspezifische Manövrierkoeffizienten, die die Kraft des Wassers auf das Schiff durch eine bestimmte Bewegung abbilden. Betrachtet man das Schiff als starren Körper, der sich in Längs- und Querrichtung bewegen und um seinen Schwerpunkt in Ebene der Wasseroberfläche drehen kann, stehen die externen Längskraft  $X$ , die Querkraft  $Y$  und das Giermoment  $N$  mit den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Längs- ( $u, \dot{u}$ ) und Querrichtung ( $v, \dot{v}$ ) sowie um die Gierachse ( $r, \dot{r}$ ) in Zusammenhang.

$$X = m(\dot{u} - vr - x_G r^2) \quad (1)$$

$$Y = m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) \quad (2)$$

$$N = I_{zz} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur), \quad (3)$$

mit  $m$  als Schiffsmasse,  $x_G$  als Lage des Längsschwerpunkts und  $I_{zz}$  als Trägheitsmoment um die Hochachse. Die Abhängigkeiten der externen Kräfte und Momente von den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen lassen sich durch mehrdimensionale Näherungsfunktionen darstellen, exemplarisch in Gleichung (4) gezeigt.

$$f(v, r) = f_0 + f_v \cdot v + f_{v|v|} \cdot v \cdot |v| + f_{vvv} \cdot v^3 + f_r \cdot r + f_{rrr} \cdot r^3 + f_{|v|r} \cdot |v| \cdot r + f_{r|v} \cdot |r| \cdot v + f_{vrr} \cdot v \cdot r^2 + f_{vvr} \cdot v^2 \cdot r \quad (4)$$

Die Kräfte und Momente auf das Schiff wurden durch numerische Berechnungen mit dem Programm Ansys-CFX bestimmt. Dem Schiff wurden bei verschiedenen Geschwindigkeiten vorgegebene Drift- und Gierbewegungen aufgeprägt und die sich einstellenden Größen aufgenommen. Ebenso wurden die Kräfte bei gelegtem Ruder und verschiedenen Schubzuständen des Propellers (Vorwärts- wie Rückwärtsschub) aufgenommen. Die in Abbildung 3 gezeigten Wellenbilder entstehen beim Driften und bei einer Driftbewegung während eines Rundlaufversuchs. Die Kombination beider Bewegungen innerhalb einer Kraftmessung ermöglicht die Einbeziehung der Interaktionskoeffizienten, die in Gleichung (4) durch die Berücksichtigung der Giergeschwindigkeit  $r$  und der Driftgeschwindigkeit  $v$  u.a. beim Koeffizienten  $f_{vrr}$  einfließen. Insgesamt wurden für jedes Schiff 110 stationäre und 9 instationäre numerische Berechnungen durchgeführt.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Auswirkungen der Variation des dimensionslosen Propellerschubs  $T'$  auf die Schiffslängskraft  $X'$ . Der Graph mit der Bezeichnung „EFD“ zeigt die Werte, die bei Modellversuchen ermittelt wurden. Betrachtet man die numerisch bestimmten Werte („CFD“), lassen sich keine großen Abweichungen feststellen. Eine Näherung des Kraftverlaufs auf Basis von Koeffizienten stellt die mit „Coeff.“ bezeichnete Funktion dar. Anhand dieser Abbildung lässt sich einerseits feststellen, dass die Schubvariation, die während des Stoppmanövers auftritt, einen sichtbaren Einfluss auf die Rumpfkraft hat, und andererseits diese Änderung des Kraftzustands mithilfe der Näherungsfunktion gut abgebildet werden kann.

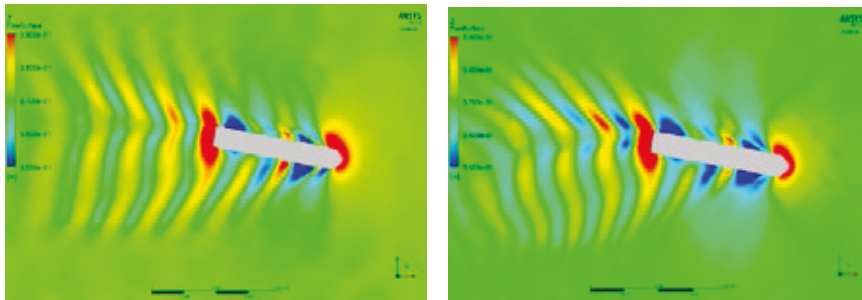


Abbildung 3: Schiffswellensystem bei 14 kn bei Drift (links) und kombinierter Drift- und Gierbewegung (rechts) im Modellmaßstab

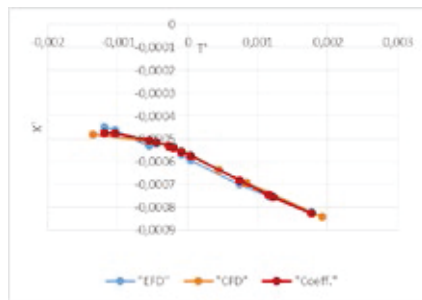


Abbildung 4: Längskraft  $X'$  am Schiff bei 10 kn und der Variation des Propellerschubzustands  $T'$

Für jede untersuchte Schiffsgeschwindigkeit liegen 64 Manövrierkoeffizienten vor, zwischen denen für die jeweils anliegende Geschwindigkeit der passende Koeffizientensatz interpoliert werden kann. Die Ermittlung der Koeffizienten wurde für vier Schiffsgeschwindigkeiten vorgenommen, sodass die Datenbank 256 Koeffizienten enthält.

## Propeller

Wie oben beschrieben, stellt der Propeller die Verbindung zwischen mechanisch-elektrischen Komponenten und dem hydrodynamischen Modell dar. Weiterhin hängen auch die Manövrierkoeffizienten des Schiffes stark vom jeweiligen Betriebspunkt und der Wirkrichtung des Propellers ab. Bei (Not)-Stoppmanövern wird der Propeller jedoch in einem Zustand betrieben (Zustrom zum Propeller, Steigungsverhältnis), der sehr vom Auslegungspunkt abweicht, siehe Abbildung 5.

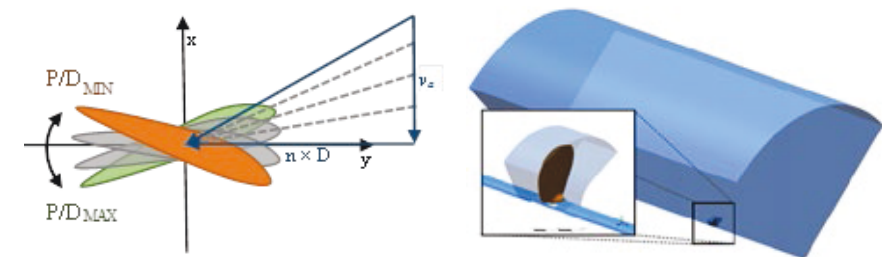


Abbildung 5: Änderung Propellersteigung (links), Rechendomain (rechts)

Der Propeller arbeitet in einem stark instationären Strömungsfeld, welches von fluktuierenden Wirbelstrukturen geprägt ist. Die zuverlässige numerische Bestimmung von Propellerkräften und -momenten stellt somit eine große Herausforderung dar. Um die Wirkung der Propeller in der Simulation zu berücksichtigen, wurde eine Vielzahl von numerischen Freifahrtrechnungen mit Ansys CFX durchgeführt. Eine dazu verwendete Rechendomain ist in Abbildung 5 gezeigt. Dabei sind die Propellerkoeffizienten sowohl vom Steigungsverhältnis wie auch vom Fortschrittsgrad abhängig. Abbildung 6 zeigt die Umströmung des Propellers für das Feeder-Schiff bei stark negativer Steigung. Der Propeller dreht die Strömungsrichtung in seinem Wirkungsfeld um, die Saug- und Druckseite des Propellerblatts wechseln. Außerhalb der Blattspitzen bildet sich ein torusförmiger Wirbel, der im zeitlichen Verlauf stark schwankt. Der berechnete Schubbeiwert ist exemplarisch für einige Steigungsverhältnisse zusammen mit den dazugehörigen Versuchsergebnissen gezeigt.

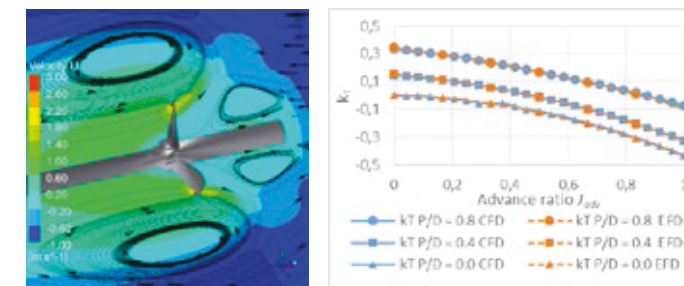


Abbildung 6: Strömungsfeld um Propeller (links), Freifahrtkurven (rechts)

## Modellversuche

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) lagen in der Entwicklung eines Verstellpropellersystems, das die Steigungen der Propellerflügel des Modellpropellers während des Versuchs dynamisch ändern kann. Weitere Ziele waren die realistische Durchführung von Stopp-Manövern unter Berücksichtigung des dynamischen Maschinenverhaltens und dessen Auswirkung auf die Steigungsverstellung von Verstellpropellern und die Einführung dieser Technik in den Versuchsbetrieb der SVA für die exakte modelltechnische Abbildung von Stopp-, Manövrierversuchen bzw. die effizientere Realisierung von Standardversuchen mit Verstellpropellern.

Zur Entwicklung und Validierung der Simulationsverfahren der Projektpartner war eine hydrodynamische Datenbasis notwendig. Diese Daten sollten in systematischen Versuchen mit dem freifahrenden Verstellpropeller und dem manövrierenden Schiff erarbeitet werden. Die SVA führte die Validierungsversuche in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durch. Es wurden zudem Vergleichsmessungen zwischen dem bestehenden System mit fest einstellbaren Verstellpropellern und dem neu entwickelten Verstellpropellersystem vorgesehen.

## Standardversuche

Mit dem Modell des Feederschiffes (SVA Modell Nr. M1405S001) und dem konventionellem (fest einstellbaren) Modell-Verstellpropeller (VP1143) wurden Standard-Modellversuche wie Widerstands- und Propulsionsversuche als auch 4-Quadrantenmessungen (mit und ohne Kavitationseinfluss) und Manövrierversuche durchgeführt. Die 4-Quadrantenmessungen, anstatt einfacher Freifahrtversuche, waren aufgrund der zu durchlaufenden Betriebszustände eines Propellers während des Stoppvorganges notwendig und wurden für zwölf Propellersteigungen durchgeführt. Die Manövrierversuche wurden im Freiland in der Nähe der SVA mit konventionellem Verstellpropeller, durchgeführt. Diese hatten das Ziel, neben dem allgemeinen Manövrierverhalten (Z-Manöver und Drehkreis) speziell das Stoppverhalten des Modells zu bestimmen. Der Stoppvorgang wurde dabei durch Änderung der Propellerdrehrate getestet.

## Gefesselte Propulsionsversuche

Darüber hinaus wurden sog. gefesselte Propulsionsversuche am Modell des Feederschiffes durchgeführt. Dabei handelt es sich um Kraftmessungen bei Vorfahrt für Kombinationen aus unterschiedlichen Modellgeschwindigkeiten, unterschiedlichen Propellersteigungen und Variation der Propellerdrehzahl.

Mit diesen Messungen wurden die Kräfte und Momente auf das Schiff, den Propeller und das Ruder während eines Stoppvorgangs untersucht.

## Entwicklung des Verstellpropellersystems

Um das Stoppverhalten von Schiffen mit Verstellpropeller im Modellmaßstab realistisch untersuchen zu können, war eine der Hauptaufgaben der SVA, ein Verstellpropellersystem im Modellmaßstab zu entwickeln, mit dem sich die Propellersteigung dynamisch während der Versuche verstellen lässt. Randbedingungen für diese Entwicklung waren die Einsatzmöglichkeit des Systems für typische Größenordnungen in der Schlepprinne der SVA und die Abbildung der Dynamik der Großausführung in Bezug auf Verstellgeschwindigkeit und mögliche Verstellwinkel (Abbildung 7). Die Geometrie des zu entwickelnden dynamischen Verstellpropellersystems sollte der des konventionellen Verstellpropellers VP1143 entsprechen, der für die zuvor durchgeführten Basisversuche verwendet wurde.

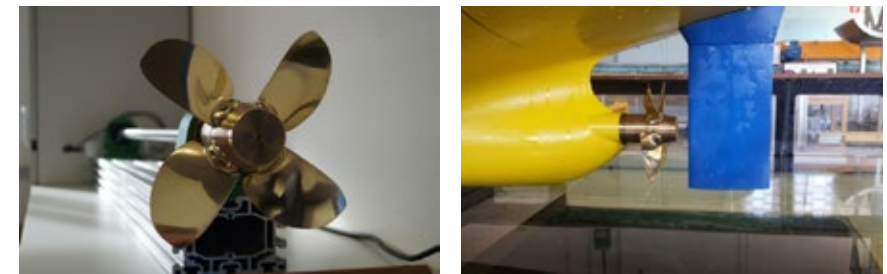


Abbildung 7: Entwickeltes dynamisches Verstellpropellersystem

Die Charakteristika des dynamischen Verstellpropellersystems wurden in Freifahrt- und Propulsionsversuchen mit denen des konventionellen Verstellpropellers verglichen. Dafür wurden die Propulsionsversuche nach der britischen Methode (Variation der Drehzahl) durchgeführt. Außerdem wurden die Möglichkeiten, die das neue System bietet, nutzbringend bei den Propulsionsversuchen eingesetzt, indem die Steigungsvariation des Propellers bei der jeweiligen Geschwindigkeit und konstanter Drehzahl realisiert wurde.

## Geführte und freie Stoppversuche

Mit der Entwicklung des dynamischen Verstellpropellers bestand die Möglichkeit, Stoppmanöver nicht nur durch Änderung der Propellerdrehrate durchzuführen, sondern auch durch Steigungsänderung am Propeller oder im Kombinatormodus.

Um möglichst definierte Ergebnisse der Stoppversuche zu erhalten, wurden zunächst ‚geführte‘ Stoppversuche in der Schlepprinne der SVA durchgeführt. Bei diesen ‚geführten‘ Stoppversuchen wurden die Freiheitsgrade „Driften“ und „Querversatz“ durch seitliche Führungen unterbunden. Der Stoppvorgang wurde somit auf eine Dimension reduziert (Abbildung 8). Des Weiteren wurden die Stoppversuche im Freiland wiederholt. Die Ergebnisse der Stoppversuche im Freiland als auch die der Standardmanöver, Z-Manöver und Drehkreis wurden mit den Manövrierversuchsergebnissen mit konventionellem Verstellpropeller verglichen.

Es wurden verschiedene Stoppmanöver mit Drehzahl und Steigungsänderung durchgeführt, die vorher durch die Partner berechnet wurden. Die Ergebnisse der Modellversuche wurden analysiert und den Projektpartnern zur Validierung der Rechnungen übergeben.

Das dynamische Verstellpropellersystem hat die Erwartungen an die Funktionsweise und Zuverlässigkeit erfüllt und wurde erfolgreich verwendet. Die Modellversuchsergebnisse entsprechen denen des konventionellen Verstellpropellers bei vergleichbaren Parametern. Das System steht somit für zukünftige Fragestellungen zur Verfügung.



Abbildung 8: Geführter Stoppversuche in der Schlepprinne der SVA (links) und Stoppversuch im Freiland (rechts)

### Validierung der Simulationsergebnisse

Für die Durchführung von Stoppsimulationen standen aufgrund der Entwicklungsarbeiten maschinenbauliche Modelle sowie die Datenbanken der hydrodynamischen Modelle in MATLAB / Simulink zur Verfügung. Alle Komponenten wurden getestet und die Ergebnisse der hydrodynamischen Berechnungen mit denen der Modellversuche validiert. Anschließend wurde der integrierte Simulator getestet. Als Vergleichsdaten konnten die durchgeführten Versuche gefesselter Stoppmanöver genutzt werden. Bei diesen Manövern wird das Schiff jeweils von der Designgeschwindigkeit aus aufgestoppt. Die Propellerdrehzahl wird unverändert gelassen. Abbildung 9 zeigt den Vergleich von Geschwindigkeit und Stoppweg exemplarisch für zwei unterschiedliche

Verstellgeschwindigkeiten der Propellersteigung. Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Modellversuchen.

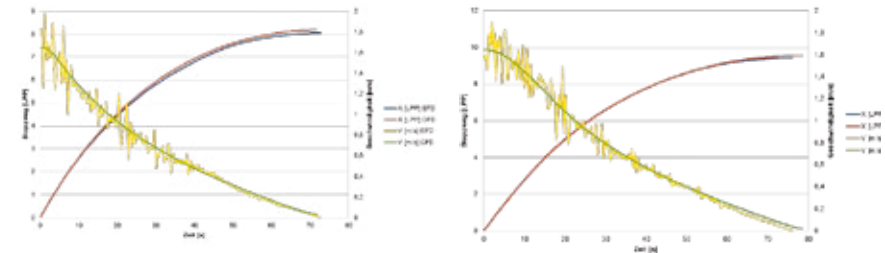


Abbildung 9: Vergleich von Geschwindigkeit und Stoppweg aus Simulation und Experiment, Verstellgeschwindigkeit 2°/s (links) und 8°/s (rechts)

Die Verläufe von Schub und Drehmoment sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Spitze im Schub beim Umsteuervorgang wird in der Simulation leicht überschätzt, bei beiden Manövern tritt kein Windmilling auf.

Aus den oben beschriebenen Ergebnissen geht hervor, dass der entwickelte Simulator die komplexen Interaktionen beim Stoppmanöver gut abbildet. Bei weiteren Testfällen zeigt sich, dass sowohl hydrodynamische als auch mechanische Vergleichswerte aus den Modellversuchen getroffen werden. Damit steht ein zuverlässiges Simulationswerkzeug für die Optimierung von Stoppmanövern zur Verfügung.

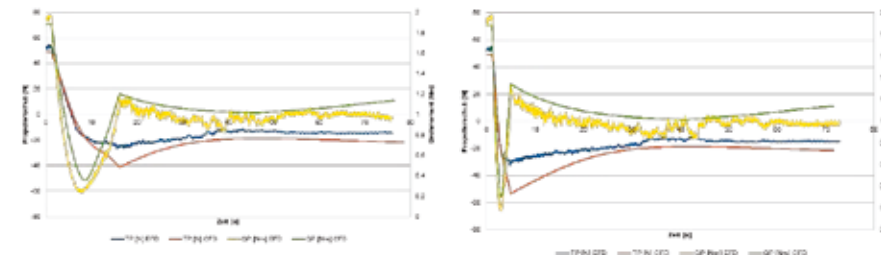


Abbildung 10: Vergleich von Propellerschub und Drehmoment aus Simulation und Experiment, Verstellgeschwindigkeit 2°/s (links) und 8°/s (rechts)

### Nutzung des Simulators bei Fahr- und Manövriersimulationen

Ein praktisches Beispiel zur Validierung ist die Problematik des Überschwingens der Wellendrehzahl beim Stoppen des Schiffes. Insbesondere beim Betrieb mit E-Fahrmotoren ist dieser Vorgang sensibel, und es gilt ihn zu prognostizieren und zu beherrschen. Um dieses Phänomen zu erfassen,

werden die entsprechenden physikalisch relevanten Größen wie die Trägheitsmomente in Abhängigkeit von den Fahrmodi in das Gleichungssystem eingebaut. Da Verstell- und Regelzeiten aller beteiligten Komponenten in der Simulation hinterlegt sind, lässt sich das „Crash Stopp“ Manöver realitätsnah virtuell berechnen.

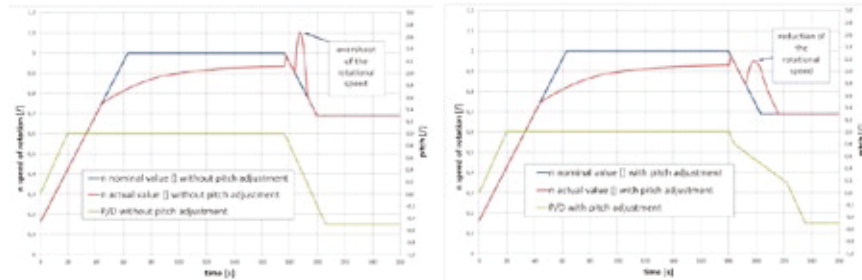


Abbildung 11: Steigungs- und Drehzahlverlauf im Stoppmanöver

Der Steigungs- und Drehzahlverlauf eines berechneten Beschleunigungs- und Stopp-Manövers ist in Abbildung 11 zu sehen. Bei maximaler Fahrhebelstellung läuft entsprechend der Verstellcharakteristik die Propellersteigung linear bis zum Maximalwert. Linear folgt auch die „Ist“- Drehzahl bis zu dem Punkt, wo das Grenzmoment erreicht wird. Da in der Simulation noch keine Steigungsanpassung erfolgt, nähert sich nachfolgend die „Ist“- Drehzahl nicht ganz der „Soll“- Drehzahl an. Bei Einleitung des „Crash Stopp“ Manövers wird die maximale negative Steigung angesteuert. Dabei wird je nach Geschwindigkeit ein Bereich überschritten, wo der Propeller durch die Anströmung angetrieben wird und als Turbine arbeitet. Die Simulation spiegelt dieses Phänomen des Überschwingens der „Ist“- Drehzahl wider. Dabei ist der zu erwartende prozentuale Anteil nicht unerheblich.

Es galt einen Lösungsansatz zu entwickeln, der eine Absenkung des Überschwingens garantiert und unkompliziert und sicher in der Automation umgesetzt werden kann. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit der Pitch-Verstellung ist praktisch nicht möglich. Erfolgreich waren die Einführung weiterer Knickpunkte im Steigungsverlauf und die Definition eines optimalen Bereiches bzw. einer geeigneten Steigung (Abbildung 11 rechts) durch verschiedene Variantenuntersuchungen. In der Anwendung zeigt sich der Nutzen des zum Teil aufwendigen Engineerings. Die Komplexität moderner Antriebsanlagen und die entsprechenden Problemstellungen sind von den Systemlieferanten allein oft nicht zu meistern. Schiffbauer und Werften sind mehr denn je gefordert, die Systeme erfolgreich zusammenzuführen. Die Ergebnisse der Simulationen wurden an einem aktuellen Schiff verifiziert. Dies ermöglichte die konsequente Umsetzung von Änderungen in der Schiffsautomation für eine erfolgreiche Seeerprobung.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Verbundvorhaben OptiStopp wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, in der komplexe Schiffsmanöver wie das Stoppen von Schiffen in einem integrierten Verfahren sowohl auf mechanisch-elektrischer wie auch auf hydrodynamischer Ebene simuliert werden können.

Dieselmotoren und elektrische Komponenten können in großer Detailtiefe abgebildet und auch transiente Zustände im Zusammenhang mit der Hydrodynamik eines Schiffes abgebildet werden. Die Bausteine des Simulators stützen sich auf Kenn- und Regelwerte bei Motoren und Generatoren sowie auf die Ergebnisse numerischer Untersuchungen der Schiffe, Propeller und Anhänge. Diese Daten wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens generiert und validiert. Für die Validierung wurden zahlreiche Modellversuche durchgeführt, die überwiegend keine Standardversuche waren. Es wurde hierfür eine neue Versuchstechnik entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Die Prüfung des entwickelten Verfahrens hat gezeigt, dass der Simulator die anspruchsvollen Zusammenhänge gut abbildet. Mit dem Simulator konnten bereits Optimierungen von Stoppmanövern in zurzeit laufenden Projekten realisiert werden, eine erste Verwertung der Forschungsergebnisse wurde erfolgreich durchgeführt.

Die große Anzahl an Versuchsdaten und Ergebnissen aus dem Simulator ermöglicht auch nach Abschluss des Vorhabens OptiStopp die Weiterführung der Forschungsarbeit an dieser Thematik. Eine fortlaufende Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens im wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Bereich geht damit einher. Die Arbeit im Forschungsvorhaben hat zudem gezeigt, dass neben den betrachteten Einflussgrößen weitere wichtige Effekte in die Simulation einbezogen werden sollten. Damit besteht die Möglichkeit, neben Umwelteinflüssen wie Wind und Wellen noch umfangreicher die Manövrierorgane des Schiffes und ihre Interaktion zu berücksichtigen. Auch Energiespeicher wie Batterien könnten in das elektrotechnische Modell integriert werden.

## BiWi – Binnenwasserstraßenanschluss Wilhelmshaven

Förderkennzeichen 03SX359

Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff  
(DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.)  
Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould el Moctar (UDE – Universität Duisburg-Essen)  
Dipl.-Ing. Holger Mumm (DNV GL)

### Einleitung

Der Hafenstandort Wilhelmshaven ist der einzige tidenunabhängige Tiefwasserhafen in Deutschland und gleichzeitig der östlichste der als Nordrange bezeichneten kontinentalen Häfen an der Nordsee. In der Vergangenheit wurden hauptsächlich Kohle und Mineralölprodukte in Wilhelmshaven umgeschlagen, außerdem ist der Hafen ein wichtiger Stützpunkt für die Deutsche Marine.

Seit der Inbetriebnahme des Jade-Weser-Ports (JWP) im September 2012 ist dieser für die neuste Generation von Containerschiffen erreichbar und besitzt eine Jahresumschlagskapazität von 2,7 Mio. TEU. Weitere Erweiterungen des Hafens sind technisch realisierbar und in Planung. Wichtige Umschlagziele im Transshipment Verkehr sind Skandinavien und die Ostsee. Für die Hinterlandanbindung gehen die Betreiber mangels direkter Binnenschiffsanbindung bisher von einem Modal Split von ca. 60% für die Bahn und ca. 40% auf der Straße aus. Unter Berücksichtigung der prognostizierten Steigerung der Umschlagsmengen im Containersegment sind mittel- und längerfristig jedoch Überlastungen des Schienen- und Straßenverkehrs absehbar. Für diesen Fall wird eine Übernahme von Transportvolumina durch die Binnenschifffahrt angestrebt. Hinzu kommt, dass der Hinterlandtransport mit Binnenschiffen Vorteile beim Ausstoß von Klimagasen aufweist, sodass international zugesagte Klimaziele bei gleichzeitig wachsendem Verkehrsaufkommen unterstützt durch eine stärkere Einbindung der Binnenschifffahrt erreicht werden können.

Für die angestrebte Trimodalität sind seit vielen Jahren diskutierte direkte Anbindungen an die Weser über das Wattfahrwasser Kaiserbalje oder einen Jade-Weser-Kanal aus naturschutzrechtlichen, finanziellen und navigatorischen Gründen auch in Zukunft nicht möglich, sodass die Binnenwasserstraßenanbindung über das Seegebiet erfolgen muss. Die Grenze zur Binnenwasserstraße liegt auf einer nach Wasserstraßengesetz festgelegten Linie



zwischen Butjadingen und dem Wurster Land. Daher gelten für einen wesentlichen Teil der möglichen Fahrtroute in die Außenweser internationale Seesicherheitsvorschriften.

Durch den großen Anteil der Binnenstrecke, die vorhandenen Wassertiefen und Durchfahrtshöhen auf der Weser und im Kanalnetz sind übliche Fluss-Seeschiffe wirtschaftlich nicht geeignet. Auch ein gebrochener Verkehr mit einem zusätzlichen Umschlag im Bereich der Unterweser kann nicht mit den Kosten der anderen Modalitäten konkurrieren. Durch die anspruchsvollen Seegangsbedingungen wäre der Einsatz von Binnenschiffen nur in einem sehr engen Wetterfenster möglich.

Das Verbundvorhaben BiWi wurde unter anderem vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr initiiert und von zahlreichen Wirtschaftsunternehmen, Organisationen und Behörden beispielsweise im Rahmen des Arbeitskreises Logistik unterstützt. Ein neuartiger Schiffstyp wurde entworfen und untersucht, der sowohl seetüchtig ist als auch wirtschaftlich auf den Binnenwasserstraßen eingesetzt werden kann. Das Konzept basiert auf dem Prinzip des Schubleichters, wobei für die See- und die Binnenstrecke verschiedene Schubeinheiten verwendet werden. Die Gesamtoptimierung des Entwurfs zielt auf eine wirtschaftliche und sichere Lösung bei einer minimalen wetterbedingten Ausfallzeit ab.

## Randbedingungen

Die Randbedingungen für das Leichtersystem bestehen einerseits aus den Anforderungen des Logistikkonzepts und andererseits aus den Umgebungsbedingungen auf der Binnenwasserstraße und im zu durchfahrenden Seegebiet sowie aus den rechtlichen Anforderungen.

## Logistik

Der Jade-Weser-Port wird aktuell hauptsächlich von Deepsea-Linien im Europa-Asien Verkehr angefahren. Feeder-Dienste verteilen einen großen Teil der Container weiter in den Ostseeraum. Der Hinterlandverkehr läuft bislang über Straße und Schiene. Für einen zukünftigen Binnenschiffsverkehr geht man von Containern als vorläufig einzige Fracht aus. Der Fokus liegt auf 40 Fuß Containern, teilweise auch 45 Fuß und High Cube Formaten. Das System ist prinzipiell ebenfalls geeignet trockene Massengüter sowie Schwer- und Projektverkehre, d.h. Stückgüter aufzunehmen. Aufgrund der Vielzahl der hierfür geeigneten niedersächsischen Hafenstandorte wird jedoch zunächst kein entsprechender Markt erwartet.

Aufgrund der Brückenhöhen auf der Binnenwasserstraße ist ausschließlich ein zweilagiger Containertransport möglich. Eine dritte Lage auf der Seestrecke nach Bremen, die dort entladen würde, wäre schiffstechnisch möglich.

Ein entsprechender Liniendienst soll bei einer Sieben-Tage-Woche und einer Fahrzeit von 14-16 Stunden, d.h. einem Zwei-Schicht-System und einer Einsatzzeit von rund 50 Wochen im Jahr erfolgen. Exemplarisch wurden folgende Transportrelationen betrachtet:

- JWP ↔ Minden
- JWP ↔ Braunschweig/Hannover
- JWP ↔ Haldensleben/Magdeburg

Bei der Relation JWP ↔ Minden kann von 1,5 Umläufen pro Woche ausgegangen werden, bei den übrigen Relationen nur von einem. Ein Umlauf entspricht der Fahrt vom Jade-Weser-Port bis zum Hinterland-Zielort und zurück zum JWP. Abbildung 1 zeigt eine entsprechende Kartenansicht mit den jeweiligen Distanzen.

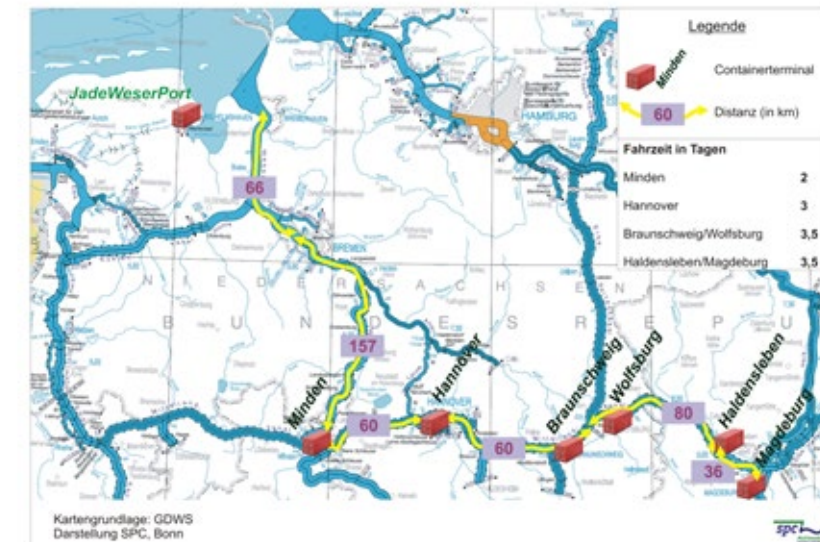


Abbildung 1: Kartenansicht der Fahrstrecken auf den Binnenwasserstraßen im Hinterland für ausgewählte Relationen.

In der Talfahrt beträgt die mittlere Fahrzeit etwa 15 Stunden 20 Minuten (entsprechend einer Geschwindigkeit von ca. 12 km/h) bzw. 20 Stunden in der Bergfahrt (mittlere Geschwindigkeit von 8 km/h). Hinzu kommen Wartezeiten

an den Schleusen, insbesondere in den oberen Haltungen, sowie die Fahr-  
dauer von etwa acht Stunden auf der Seestrecke.

### Seestrecke

Die Anbindung der Seehäfen Wilhelmshavens und besonders des Jade-  
Weser-Ports erfolgt über das Seegebiet der Nordsee im Mündungsbereich von  
Jade und Weser. Aufgrund der Wassertiefen und des Nationalparks Nieder-  
sächsisches Wattenmeer muss hier ein Umweg um die unbewohnte Insel  
Mellum in Kauf genommen werden. Je nach Wasserstand sind leicht variieren-  
de Routen möglich. Diese sind in einem Seekartenausschnitt in Abbildung 2  
skizziert. Das zu durchfahrende Seegebiet gilt als sehr anspruchsvoll. Bei den  
vorherrschenden Wetterlagen mit nordwestlichen Winden steht eine sehr gro-  
ße Windeinwirklänge für die Ausbildung des Seegangs zur Verfügung. Zudem  
führen Reflexionen der Wellen an den umliegenden Küsten und die Refraktion  
in Folge der Bodentopographie zu unangenehmer Kreuzsee.



Abbildung 2: Kartenausschnitt der Seestrecke. Eingezeichnet sind zwei  
exemplarische Routen, die je nach Wasserstand genutzt werden können.

Von den Vertretern der Wirtschaft im Arbeitskreis Logistik wurde zu Beginn  
der Laufzeit des Verbundvorhabens der Wunsch nach einer hohen Verfüg-  
barkeit von 330 Tagen pro Jahr geäußert. Besonders durch die Überlappung  
von Schlechtwetterperiode und dem Vorweihnachtsgeschäft sollen Ausfall-  
zeiten für das System bestmöglich minimiert werden.

Die Auswertung von Seegangsdaten aus Simulationen und Messungen ergab  
hieraus die Forderung nach sicherem Betrieb bei Seegängen mit bis zu 2,5 m  
signifikanter Wellenhöhe. Einzelwellen können eine Höhe von etwa 4 m auf-  
weisen. Eine detailliertere Darstellung der Randbedingungen ist im Abschluss-  
bericht des Teilprojekts der Universität Duisburg-Essen [4] enthalten. Das  
Fahrwasser steht auch unter dem Einfluss starker Gezeitenströmungen,  
deren Richtung und Stärke periodisch schwanken. Um sicher zu manövrieren  
und auch die starke Kursänderung nördlich Mellum zügig durchführen zu  
können, gelten hohe Anforderungen an die Manövrierfähigkeit und Schub-  
reserven des Schub-Schleppers für die Seestrecke.

Spätestens die Kombination der hier genannten Randbedingungen geht weit  
über die Einsatzgrenzen konventioneller Schubverbände oder Binnenschiffe  
hinaus. Vorangehende Untersuchungen endeten beispielsweise bei regel-  
mäßigen Wellen mit einer Höhe von 2 m. Binnenschiffe ertragen üblicherwei-  
se maximale Wellenhöhen von etwa 1 m [1, 2]. Das Bewegungsverhalten der  
gekoppelten Schwimmkörper im Seegang wird stark durch die Koppeltechnik  
und die relative Größe der Einzelkörper bestimmt. Da die Besatzung sich auf  
dem kleineren Schlepper mit entsprechend ausgeprägten Tauch- und  
Stampfbewegungen befindet, kann das Bewegungsverhalten ein limitieren-  
der Faktor für die Nutzbarkeit des Gesamtverbandes werden. Ein separater  
Fahrstand auf dem Heck des Leichters, wie er von Valkhof et al. [8] vorge-  
schlagen wurde, soll aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit ver-  
mieden werden.

Zusammenfassend bringt die Nutzung der Seeschiffahrtstraßen zusätzliche  
Anforderungen an die globale und lokale Strukturfestigkeit, die Schwimmsta-  
bilität, die Bughöhe und den Freibord sowie die Einrichtung und Ausrüstung  
von Leichter und Schubschiff.

### Binnenwasserstraßen

Die besonderen Anforderungen für die Fahrt auf den Binnenwasserstraßen  
resultieren überwiegend aus den geometrischen Randbedingungen der  
Schleusen, Brücken und Fahrrinnen. Direkt begrenzt sind die Hauptabmes-  
sungen Länge, Breite und Tiefgang. Die maximale Breite beträgt 11,45 m und  
der Tiefgang sollte 2,50 m nicht überschreiten. Auch wenn die Schleusenab-  
messungen mittlerweile eine Länge von bis zu 135 m erlauben, soll die Län-  
ge von 110 m nicht überschritten werden. Anderenfalls würde es durch die  
örtliche Beschränkung auf einspurige Befahrung zu teils erheblichen Warte-  
zeiten kommen, so dass die Fahrplantreue bei den geplanten Umlaufzeiten  
sinkt. Die brückenbedingte Fixpunkthöhe auf der Weser von 5,25 m be-  
schränkt die Höhe der Verbände nach oben und begrenzt die Ladung auf

zwei Containerlagen. Nach Auskunft der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt wird diese Durchfahrthöhe bedingt durch sehr hohe Wasserstände nur an wenigen Tagen pro Jahr unterschritten.

## Vorschriften

Die Nutzung verschiedener Fahrtgebiete bedingt die Einhaltung der jeweiligen internationalen und nationalen Vorschriften. International werden die Vorschriften in der Regel von der IMO empfohlen und bei Flaggenstaaten, die auf der sogenannten IMO White List geführt werden, von den zuständigen Behörden adaptiert und überwacht. In Deutschland obliegt dies der Berufsgenossenschaft Verkehr. Die relevanten Vorschriften sind SOLAS bezüglich der personenbezogenen Sicherheit, MARPOL bezüglich des maritimen Umweltschutzes, ICLL bezüglich des erforderlichen Freibords und der IS Code bezüglich der Intaktabilität.

Bei den nationalen Vorschriften sind das SchSG (Schiffssicherheitsgesetz), die SchBesV (Schiffsbesetzungsvorschrift) und für die Binnenschiffe die BinSchUO (Binnenschiffsuntersuchungsordnung) zu berücksichtigen. Je nach Fahrtgebiet sind zudem die SeeSchStrO und die BinSchStrO einzuhalten. Ebenfalls zu beachten sind die Bauvorschriften der ausgewählten Klassifikationsgesellschaft. Einige dieser Vorschriften betreffen den Gesamtverband, andere nur das jeweils genutzte Binnenschubschiff oder den schiebenden Seeschlepper. Aufgrund der vorgesehenen Notfall-Lösbarkeit der Koppelstelle, der kurzen Distanz der Seestrecke und der Nähe zu den Häfen und der dort vorhandenen Sicherheitsinfrastruktur kann in einigen Punkten von gelockerten Sonderregelungen Gebrauch gemacht werden.

## Entwurf

Im Laufe des Verbundvorhabens wurde der Entwurf des BiWi-Leichters iterativ weiterentwickelt. Eine neue Version des Geometrie-Modells wurde grundsätzlich dann gebildet, wenn sich die Hauptabmessungen des Schiffes geändert haben. Die Entwicklung der einzelnen Versionen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Version A: Zu Beginn des Projekts wurden relativ kleine Schubleichter mit einer Länge von 45 m untersucht, die einen Verband aus zwei Schubleichtern mit 90 m Länge bildeten. Eine Länge von 45 m stellt nach der International Convention on Load Lines (ICLL) sowohl hinsichtlich des geforderten Mindestfreibords ( $> 0,7$  m) als auch bezüglich der Bughöhenforderung ( $> 1,8$  m) eine wichtige Grenze dar. Da laut Aussage der für den Flaggen-

staat Deutschland zuständigen BG Verkehr für den hier betrachteten Koppelverband die Gesamtlänge gewertet wird, entfällt dieser Vorteil der Längenbegrenzung. Auch aufgrund der wirtschaftlichen und technischen Herausforderungen einer zusätzlichen Koppelstelle und des relativ geringen Laderaumvolumens wurden diese kleinen Einheiten nicht weiter verfolgt.

Version B: Ein Schubleichter mit 79 m Länge mit einem durchgehenden Laderaum stellte den nächsten Entwicklungsschritt dar. Auf dem Mittellandkanal könnten diese Leichter als 2er-Verband von einem Schubboot angetrieben werden. Diese Länge entspricht dem nächsten Sprung in der Freibordforderung ( $> 1,3$  m). Zudem entfällt für Fahrzeuge unter 80 m Länge die Notwendigkeit eines probabilistischen Leckstabilitätsnachweises. Da jedoch auch hier gemäß Auslegung der BG Verkehr die Gesamtlänge des Verbands zählt, ist die Unterschreitung dieser Stufe nicht weiter erforderlich.

Version E: Die Anforderungen aus dem Nachweis der Leckstabilität für Seeschiffe mit eingeschränktem Fahrtbereich führten zu dem Entwurf mit drei getrennten Laderäumen. Unter Berücksichtigung der Gesamtlänge von 110 m für den Schubverband auf der Binnenwasserstraße wurde die Länge des Schubleichters auf 90 m vergrößert. Weitere Anpassungen resultieren aus der Bughöhenforderung sowie der benötigten Reserveverdrängung. Die Ladekapazität beträgt nun 96 TEU, der mittlere Laderaum ist auch für den Transport von 45-Fuß Containern ausgelegt. Diese Version (Abbildung 3) wurde auch für die erste Serie von Modellversuchen im glatten Wasser und im Seegang verwendet.

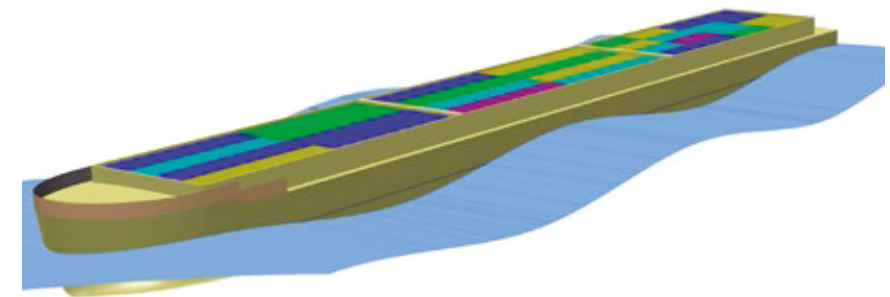


Abbildung 3: 3D-Ansicht des Leichters in Version E mit geteilten Laderäumen.

Version M: Ausgehend von der Version E wurde ein Schubleichter für Massengut entworfen. Dieser besitzt Laderäume, die speziell für Schüttgüter ausgelegt sind. Diese Laderäume können auch mit Lukendeckeln ausgerüstet werden. Der Tiefgang beträgt 2,80 m, beschränkt durch die Fahrt im Binnenland.

Version F: Nachdem mit CFD-Methoden die Form des Vor- und Hinterschiffes optimiert wurde, diente die Version F zur Entwicklung der Stahlstruktur in Zusammenarbeit mit dem DNV GL.

Version G: Technische Änderungen in der Stahlkonstruktion wurden in dieser Version ausgearbeitet.

Version H: Eine komplette Überarbeitung des Entwurfs und der Stahlkonstruktion führte zur Vergrößerung der Seitenhöhe auf 5,90 m. Weil der Transport von anderer Ladung als Containern ausgeschlossen wurde, konnte der Tiefgang auf 2,20 m reduziert werden. Die notwendige Verstärkung der Stahlkonstruktion im Achterschiff erforderte eine um 0,90 m vergrößerte Länge.

Version HH: Um genügend Flexibilität für den Platzbedarf der Containerführungsschienen in Abhängigkeit von dem endgültig gewählten Staukonzept zu gewährleisten, wurde die Gesamtlänge des Schubleichters um 2 m erhöht (Annahme auf der sicheren Seite). Für diese abschließende Version wurde der Generalplan vervollständigt und eine technische Spezifikation wurde erstellt. Nach eingehenden Diskussionen mit Fachleuten aus der Zulieferindustrie wurde auch eine Beschreibung der Vorrichtung zur Stauung der Container ausgearbeitet, bei der alle Container im Laderaum in Cell Guides gestaut werden. Dies entspricht den OSHA – Vorschriften (Occupational Safety & Health Administration, USA). Die Anordnung der Staugerüste an den Querschotten der Laderäume und zwischen zwei Containern hat einen erhöhten Platzbedarf zur Folge, so dass der Schubleichter in der Version HH eine Länge von 92,90 m aufweist. Das passende Schubboot für die Fahrt auf der Binnenwasserstraße ist dementsprechend in der Länge auf 17,0 m begrenzt. Dies ist jedoch mit der verfügbaren Flotte und den Schubanforderungen vereinbar. Zudem ist zu erwarten, dass mittelfristig die Grenze von 110 m Länge auf der Weser überschritten werden darf. Abbildung 4 zeigt den Hauptspant mit einer ungewöhnlichen Konstruktion in Längsbauweise im Doppelboden und Querspannten in den Seitenzellen.

Der Schubleichter ist für den Einsatz auf Binnenwasserstraßen und, mit Einschränkungen, für die Fahrt auf See zugelassen. Die Einschränkungen beziehen sich auf die Entfernung zum Hafen, die 50 Seemeilen nicht überschreiten darf, und auf die Wetterbedingungen. Die Fahrt auf See ist nur zulässig, wenn die erwartete signifikante Wellenhöhe für den Zeitraum der Fahrt den Wert von 2,5 m nicht überschreitet. Das primäre Fahrtgebiet auf See ist die Strecke zwischen Wilhelmshaven und Bremerhaven, aber auch andere Abschnitte wie zum Beispiel die Verbindung zwischen Cuxhaven und Hamburg sind möglich.

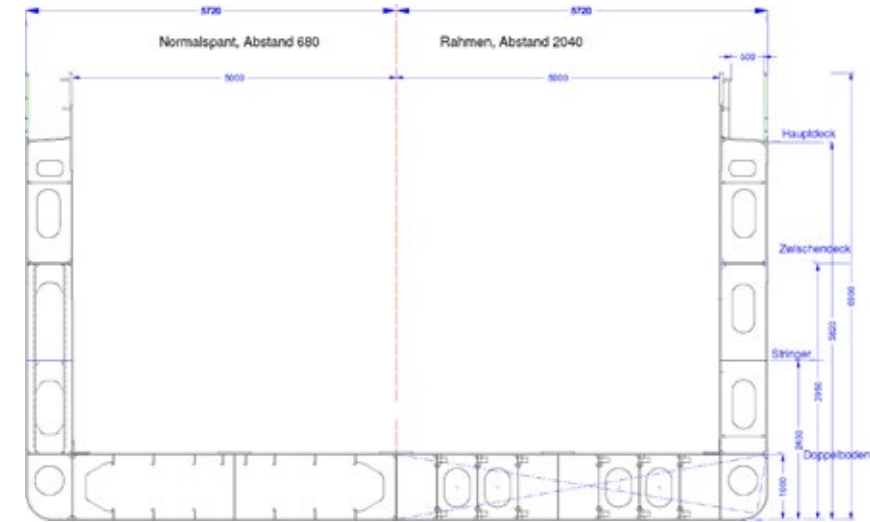


Abbildung 4: Hauptspantkonstruktion der finalen Version HH.

## Koppelstelle

Die Koppelstelle zwischen dem schiebenden Seeschlepper und dem Leichter ist entscheidend für die Seefähigkeit des Verbands. Während in der Binnenschifffahrt die einzelnen Bestandteile des Verbands mit Stahlseilen verspannt werden, ist dies schon bei moderater Wellenhöhe nicht mehr sicher möglich. Die mit den Zurrwinden erzielbaren Vorspannungen und damit die aktivierbaren Reibkräfte sind zu gering, um die Relativbewegung auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Zudem bergen reiße Seile ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die Besatzung. Das in der Seeschifffahrt gebräuchliche Schleppen mit Trossenverbindung zwischen Schlepper und beispielsweise einem nicht-motorisierten Seeponton ist prinzipiell eine sehr vielfältig einsetzbare Technik. Allerdings sind die Wetterfenster unter Umständen eingeschränkt, und mit wachsenden Anforderungen an die Manövrierfähigkeit unter äußeren Einflüssen muss mehr als ein Schlepper genutzt werden.

Für die Kopplung des Verbands aus dem neu konzipierten Leichter und einem seegehenden Schlepper im Schubbetrieb für die Seestrecke wurden verschiedene Alternativen diskutiert. Neben dem klassischen Zurren gibt es formschlüssige starre Kupplungen oder Systeme, bei denen der Bug des Schubschiffs in einer passenden Aussparung am Heck des Leichters arretiert wird. Hier gibt es beispielsweise ein hydraulisches System mit Gleitschuh und Zahnprofil ([www.articouple.com](http://www.articouple.com)). Ähnlich funktionieren das Kopplungssystem des amerikanischen Anbieters Intercon ([www.intercon.com](http://www.intercon.com)) oder das

finnische YAK Articulated Tug Barge Coupling System. Diese Systeme koppeln mit einem Freiheitsgrad, so dass lediglich eine relative Stampfbewegung zugelassen wird. Auch wenn einige Verbände mit dieser Technik im Einsatz sind, erscheint die Eignung für die Binnenschiffsanbindung des Jade-Weser-Ports durch die erforderliche besondere Heckform und die erschwerte Kopplung an das Binnenschubschiff eingeschränkt.

Als aussichtsreichste Variante wurde das Konzept der HEINRICH HARBISCH Schiffswerft GmbH ausgewählt. Dieses Konzept basiert auf einer gedämpft gelenkigen Verbindung mit hydraulischer Vorspannung. Je ein T-förmiger Hammerkopf wird backbord und steuerbord vertikal in Profilschienen am Heck des Leichters eingeführt, um 90° rotiert und angezogen (siehe Fotos des in Husum stationierten Schleppers Odin mit Leichter in Abbildung 5). Für eine Anpassung an die Randbedingungen im Projekt wurden Änderungen diskutiert und ausgearbeitet. Die komplexe Physik wurde mathematisch beschrieben und experimentell validiert sowie in verschiedene Simulations-Werkzeuge integriert.



Abbildung 5: Fotos der Kupplung und der an Deck des Schub-Schleppers installierten Kupplungen (Gebrauchsmuster Nr. 20 2013 005 213.9 der HEINRICH HARBISCH Schiffswerft GmbH).

Für Notsituationen kann die Kopplung zwischen Schubschiff und Leichter von der Brücke aus gelöst werden. So kann im Gefahrenfall der Leichter zu Gunsten der Sicherheit der Besatzung an Bord des Schubschiffs gelöst werden. Dies erfolgt über eine kräftige Hydraulikeinheit, die den Hammer auch unter Last rotieren kann. Des Weiteren ist eine Sollbruchstelle integriert, die vor einer Schädigung der Schwimmkörper oder der Hydraulikanlage die Verbindung trennt.

### Schiffsbetrieb

Grundsätzlich befindet sich während der Fahrt keine Besatzung an Bord des Schubleichters. Ballasttanks und Leerzellen werden nur bei einem Aufenthalt auf der Werft zugänglich gemacht. Ballastwasser wird nur im Binnengebiet

aufgenommen und gelenzt, so dass die SOLAS Ballastwasserrichtlinie keine Anwendung findet. Open-Top Laderäume sind mit Sammeltank und ferngesteuerter Pumpe ausgerüstet. Eine Feuerlöscheinrichtung ist auf dem Leichter nicht erforderlich, weil im Brandfall Hafenlöschboote schnell eingreifen können. Der Transport von Kühlcontainern ist nicht vorgesehen. Gefahrgutcontainer werden nur unterhalb der pauschalen ADNR Grenzen, die nach Gefahrgut variieren, transportiert.

### Experimentelle und numerische Untersuchungen

Die im Projekt durchgeführten umfangreichen Modellversuche in den Versuchsanlagen des DST dienten verschiedenen Zwecken. Teilweise wurden die Ergebnisse direkt weiterverwendet und teilweise dienten sie zur Kontrolle und Verbesserung der numerischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Bewegungen und Lasten des Schubverbands.

Eine erste Versuchsreihe mit dem Leichter wurde zur Quantifizierung des Schubbedarfs und damit auch eines wesentlichen Bausteins der Transportkosten durchgeführt. Hierzu dienten Widerstandsmessungen im Glattwasser bei verschiedenen Wassertiefen und Tiefgängen.

Die zweite Messkampagne wurde für die Validierung und Parametrierung der numerischen Simulationen genutzt. Hier lag der Fokus auf den Bewegungen des Schubverbands und den Schnittlasten zwischen den beiden Fahrzeugen. Regelmäßige Wellen erlaubten eine eindeutige Bestimmung der linearen Übertragungsfunktionen. Die Bewegungen der beiden Einheiten wurden sowohl experimentell als auch numerisch mit und ohne Kopplung untersucht. Experimentell wurde die Kopplung starr und mit einer um die Querachse gelenkigen Verbindung realisiert. Diese Varianten konnten auch numerisch abgebildet werden (siehe Abbildung 6). Kurz- und Langzeitstatistiken der Schnittlasten im Zusammenhang mit den vorherrschenden Seegangsbedingungen dienten der Ermittlung der Entwurfslasten zur Auslegung der Koppelstelle am Heck des Schubleichters.

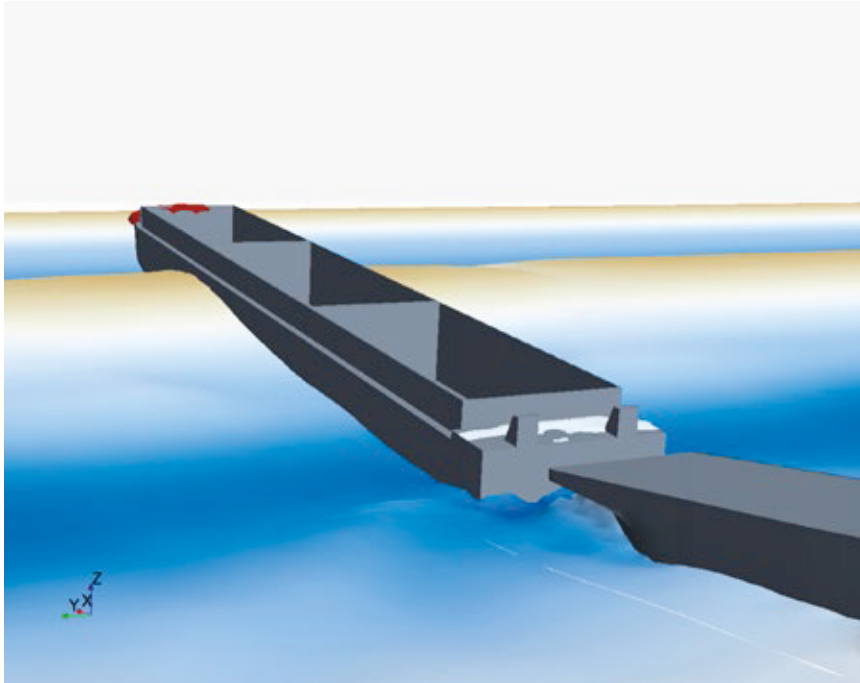


Abbildung 6: Exemplarische Visualisierung aus einer numerischen Simulation für den gelenkig gekoppelten Verband im Seegang.

Die dritte Messkampagne wurde mit einem neu entworfenen See-Schubschlepper und einem komplexen Ersatzmodell der hydraulischen Kupplung durchgeführt. Um die Seefähigkeit ohne Lukendeckel nachzuweisen, kam bei diesen Versuchen ein frei fahrender Verband mit einem komplexen Ersatzmodell der Koppelstelle zum Einsatz. Die Menge der in den Laderäumen übergenommenen Grüner See ist ein entscheidender Faktor für die Sicherheit. Grenzwerte und Standards für diese Versuche wurden von der Maritime Safety Commission der IMO definiert [6]. Diese Richtlinie umfasst die Festlegung der Seegangsspektren sowie Geschwindigkeiten und Begegnungswinkel. Da diese Versuche auch im 45°-Winkel zur See zu fahren sind, war die Modellgröße durch die Breite des Schlepptanks beschränkt. Ein großes Modell hätte hier zu inakzeptabel kurzen Messperioden geführt. Gleichzeitig durfte das Modell auch nicht zu klein sein, um Maßstabeffekte zu begrenzen und um die umfangreiche Ausrüstung für die Energieversorgung, die Antriebs- und Manövrieranlagen sowie die nötige Sensorik tragen zu können. Der im Maßstab 1:20 skalierte Verband (siehe Abbildung 7) wurde für eine abschließende Validierung auch für stationäre Versuche ohne Vorausschwindigkeit verwendet.



Abbildung 7: Exemplarisches Foto des Schubverbands im Maßstab 1:20.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Verbundvorhaben BiWi konnte trotz der zunächst bestehenden Unsicherheiten bezüglich Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit erfolgreich abgeschlossen werden. Passend zu den vielfältigen Anforderungen beispielsweise aus den Seegangsbedingungen einerseits und den Schleusenabmessungen und Brückenhöhen andererseits konnte ein Leichter mit 93 m Länge und 11,45 m Breite entworfen werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde ein offenes System ohne seeschlagfeste Lukendeckel gewählt. Für diesen Entwurf wurden umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen sowohl für die Seestrecke als auch für die Fahrt im Binnenland durchgeführt. Konstruktive Details wurden im Projektverbund ausgearbeitet und mit der Berufsgenossenschaft Verkehr abgestimmt. Entsprechend der Forderung der assoziierten Partner aus der Wirtschaft wurde das Konzept primär auf den Containerverkehr ausgerichtet. Der Entwurf für einen Massengut-Leichter mit identischen Hauptabmessungen wurde in Grundzügen ebenfalls erstellt.

Die Erweiterungen der Simulationssoftware für die Bewegungen und Lasten von Mehrkörpersystemen mit komplexer Kopplung konnten mit den experimentellen Daten erfolgreich validiert werden. Das mittlerweile erfolgreich betriebene hydraulische Kopplungssystem der HEINRICH HARBISCH Schiffswerft GmbH für die Verbindung zwischen Schlepper und Leichter wurde an die Anforderungen des BiWi-Systems angepasst. Die detaillierte Strukturanalyse der Einbindung in die Stahlstruktur des Leichters ist abgeschlossen und wurde für realisierbar befunden.

In aufwändigen Versuchen nach IMO MSC Circ. 608 mit einem zweiteiligen frei fahrenden Modell wurden die Einsatzgrenzen hinsichtlich der zulässigen Seegangsbedingungen bestimmt. Angestrebt wurden mindestens 330 Einsatztage pro Jahr. Mit einem für diese Versuche entworfenen See-Schubschlepper konnte der Nachweis der Seetauglichkeit bei einer signifikanten

Wellenhöhe von 2,5 m erbracht werden. Wirtschaftlichkeitsrechnungen für verschiedene Relationen versprechen konkurrenzfähige Kosten zu Straße und Schiene.

Nach zahlreichen Gesprächen mit Behörden und den Hafentreibern wurden die vorgeschlagenen Konzepte zur Einbindung der Leichter in den Hafenbetrieb geprüft. Recherchen haben gezeigt, dass das Angebot an geeigneten Schubschleppern für die Seestrecke auch unter Einbeziehung von Umrüstungen sehr begrenzt ist. Um das Konzept für den breiten Einsatz weiter zu optimieren, wäre ein dedizierter Entwurf anzustreben. Im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Berlin [3] und eines beim DST angefertigten Entwurfs konnten Vorarbeiten hierzu geleistet werden. Gleichzeitig wurde jedoch weiterer Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Sobald die Auslastung des Hafens durch die vermehrte Einbindung in globale Logistikketten steigt und dadurch Straße und Schiene an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen, steht mit dem hier entwickelten Leichterkonzept eine leistungsfähige Anbindung an die Binnenwasserstraßen zur Verfügung. Durch den ungebrochenen Verkehr, den Verzicht auf Lukendeckel und die große Distanz auf der Binnenwasserstraße kann das Konzept spätestens bei wieder steigenden Treibstoffpreisen Kostenvorteile aufweisen. Große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit zeigte sich hinsichtlich des Zeitbedarfs für die Schleusungen auf der Weser.

Aus den Randbedingungen der Weser resultiert eine deutliche Beschränkung der Transportkapazität. Für andere Relationen kann das Konzept mit einer größeren Breite der Leichter und drei oder vier Containerlagen weiter skaliert werden, so dass deutliche Vorteile bei den Transportkosten zu erwarten sind. Da das Bewegungsverhalten der seegehenden Schub-Schlepper deren Größe nach unten begrenzt, sind Schlepper für den Weser-Leichter groß genug und hinreichend motorisiert für größere Leichter.

### Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens sowie dem Projektträger Jülich für die stets konstruktive fachliche und administrative Betreuung. Ebenfalls gilt der Dank den Bearbeitern des Verbundprojektes, T. Guesnet, S. List, H. Bross, Dr. K. Rügner, W. Förster, Dr. A. Gronarz, J. Ley, M. Ghesmi, L. Zentari, Dr. V. Shigunov, Dr. A. von Graefe, M. Bronsert und K. Yayla sowie Herrn L. Pipoh (SPC). Weiterhin danken wir dem Niedersächsischen Landwirtschaftsministerium (Herr Weber) für das Initiieren dieses Projektes, der BG Verkehr, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung und den assoziierten

Partnern für die fachlichen Diskussionen und Beratung, ohne die das Vorhaben nicht realisierbar gewesen wäre.

### Literatur

- [1] Broß, H.; Guesnet, T.; Zigic, B.; Zöllner, J.; 304. Mitteilung des DST: „Entwicklung eines Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr“, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 2009
- [2] Broß, H.; Guesnet, T.; Zigic, B.; Zöllner, J.; DST-Bericht 1879: „Entwicklung eines Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr“, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 2009
- [3] Dincer, Z.; „Entwurf und Einsatz eines Küsten-Schubschleppers für Schubverbände zwischen Jade und Weser“, Technische Universität Berlin, 2015
- [4] El Moctar, B.; Ley, J.; Ghesmi, M.; Zentari, L.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Berechnung des See- und Strukturverhaltens eines seegehenden Binnenschiffsleichters (Fkz: 03SX359B)“, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [5] Friedhoff, B.; Broß, H.; Gronarz, A.; Guesnet, T.; List, S.; Rügner, K.; Pipoh, L.; DST-Bericht 2081: „Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung und Optimierung eines seegehenden Binnenschiffsleichters“, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 2016
- [6] IMO MSC; Circ. 608/Rev. 1: „Interim Guidelines for Open-Top Containerships“, International Maritime Organization, 1994
- [7] Mumm, H.; Shigunov, V.; „Schlussbericht zum Teilvorhaben Beurteilung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit eines seegehenden Binnenschiffsleichters (Fkz: 03SX359C)“, DNV GL, Hamburg, 2016
- [8] Valkhof, H.H.; Hoogeven, T.; Dallinga, R.P.; Toxopeus, S.L.; Verwoest, T.F.; „A Tug & Barge System for Sea and River Service“. In: Transactions of SNAME 108 (2000), Seiten 71–98

## Schriftenreihe Projektträger Jülich

1. **Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie**  
Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung  
hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-006-7
7. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-104-0
8. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-187-3