



# Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik

Tagungsband der Statustagung 2012

Schriftenreihe Projektträger Jülich







# Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik

Tagungsband der Statustagung 2012

Schriftenreihe Projektträger Jülich



## Grußwort

Die maritime Industrie ist ein bedeutender Wirtschaftszweig für den Standort Deutschland. Mehr als 90% des interkontinentalen und strategisch unverzichtbaren Warenverkehrs wird über den Seeweg abgewickelt. Etwa 400.000 Beschäftigte erwirtschaften insgesamt einen Umsatz von mehr als 54 Milliarden Euro im Jahr. Herausforderungen wie der Klimawandel oder die Energiewende können ohne Beiträge der maritimen Wirtschaft nicht bewältigt werden.

Um ihre hervorragende Position im internationalen Wettbewerb weiterhin behaupten zu können, ist die maritime Wirtschaft wie jede andere Hochtechnologiebranche auf Forschung und Entwicklung angewiesen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie investiert daher im Rahmen seines Forschungsprogramms „Maritime Technologien der nächsten Generation“ jährlich rund 30 Millionen Euro, um Unternehmen im maritimen Sektor bei der Entwicklung und Umsetzung innovativer Produkte zu unterstützen.

Die Statustagung „Schifffahrt und Meerestechnik“ stellt auch 2012 wieder einige Projekte vor, die im Rahmen des Programms gefördert wurden. Alternative Antriebskonzepte werden derzeit in vielen Bereichen der Mobilität entwickelt. Welche umweltfreundlichen Brennstoffkonzepte es für die maritime Branche gibt, zeigt der Themenblock Antriebstechnik und Hydrodynamik. Ebenfalls aktuell ist die Thematik der Ölunfälle auf dem Meer. Der Bereich Schiffsicherheit und Simulation präsentiert Projekte, die sich der Ölunfallbekämpfung widmen. Bei der Umsetzung der Energiewende spielt die Offshore-Windenergie eine zentrale Rolle. Welche Chancen und Herausforderungen für die maritime Wirtschaft damit verbunden sind, legt ein Gastvortrag der Stiftung Offshore-Windenergie dar.

Ich wünsche uns allen eine erfolgreiche Tagung mit interessanten Beiträgen und anregenden Diskussionen.



Hans-Joachim Otto, Maritimer Koordinator der Bundesregierung und Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Wirtschaft und Technologie

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 der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im Programm „Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert“ bzw. im Nachfolgeprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWi finanziert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

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

Hamid Alishahi, Horst Baumann, Projektträger Jülich

#### Bildnachweis

Technische Universität Hamburg-Harburg

#### Druck

Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-89336-832-7

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

<b>SOS3 – Analyse und Optimierung eines autonomen Systems zur Offshore-Ölunfallbekämpfung</b> .....	9
Günther Clauss, Florian Sprenger, Sascha Kosleck (Technische Universität Berlin)	
<b>Entwicklung von numerischen und experimentellen Methoden zur Bestimmung der Rolldämpfung</b> .....	25
Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud, Sven Handschel, Nikolai Köllisch, Dr. Volker Müller (Technische Universität Hamburg-Harburg); Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould El Moctar, Rainer Kaiser, Henry Piehl (Universität Duisburg-Essen); Dr.-Ing. Matthias Fröhlich (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam); Dr.-Ing. Vladimir Shigunov (Germanischer Lloyd)	
<b>POWER-VR – Prozessorientierte, wettbewerbsfähigkeitssteigernde Entwicklung eines Rahmenkonzepts schiffbaulicher VR-Anwendung</b> . . .	37
Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, Dr.-Ing. Axel Friedewald (Institut für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg-Harburg); Prof. Dr.-Ing. Uwe Freiherr von Lukas, Dipl.-Inf. Benjamin Mesing (Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung)	
<b>ShipLES – Berechnung der instationären turbulenten Schiffsumströmung mit LES-basierten Verfahren</b> .....	53
Prof. Dr.-Ing. Nikolai Kornev, Dr.-Ing. Andrey Taranov, Dr. rer. nat. Evgeny Shchukin (Universität Rostock); Dipl.-Ing. Karsten Rieck, Dipl.-Ing. Pascal Anschau (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH); Dr.-Ing. Dirk Jürgens, Dipl.-Ing. Michael Palm, Dipl.-Math. Julia Springer (Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG)	
<b>FORM-PRO – Hydromedynamische Optimierung von Schiffen mit aktiver Propulsion</b> .....	65
Mattia Brenner, Stefan Harries, Stefan Wunderlich (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam); Jörn Kröger, Arthur Stück, Thomas Rung, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie (Technische Universität Hamburg-Harburg); Scott Gatchell, Lars-Uve Schrader, Jochen Marzi (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)	
<b>GasPax – Nutzung von Brennstoffen mit niedrigem Flammpunkt auf Passagierschiffen, Mega Yachten und Ro-Ro Passagierschiffen</b> .....	85
Rolf Nagel (Flensburger Schiffbau Gesellschaft); Bernhard Urban, Lürssen Werft, Sören Berg (MEYER WERFT); Jörg Müller (TGE Marine Gas Engineering); Benjamin Scholz, (Germanischer Lloyd)	
<b>CView – Unterwasserinspektion von Schiffshüllen, Piers und Anlegestellen durch autonome Unterwasser-Fahrzeuge</b> .....	101
Jörg Kalwa (ATLAS ELEKTRONIK); Jan Christian Albiez (DFKI-RIC); Dieter Kraus (IWSS); Franz-Josef Becker (IBMT); Marco Jacobi (FhAST)	
<b>CUSLAM – Lokalisierung und Kartenerstellung in beengten Unterwasserumgebungen</b> .....	115
Marc Hildebrandt, Christopher Gaudig, Patrick Merz-Paranhos, Sankaranarayanan Natarajan, Javier Hidalgo Carrio, Leif Christensen, Phillip Kloss, Frank Kirchner (DFKI GmbH – Robotics Innovation Center)	

<b>QulnLas – Qualitätsgerechte 3D Laser-Schweißbearbeitung innovativer Schiffskonstruktionen</b> . . . . .	133
C. Emmelmann M. Kirchhoff (Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS – TUHH)); W. Fricke, C. Robert (Institut für Konstruktion und Festigkeit (SKF – TUHH)); A. Drenker (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)); F. Niese (Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)); R. Wagener (Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF)); M. Kogel-Hollacher (Precitec Optronik GmbH); C. Paul (Carl Cloos Schweißtechnik GmbH); J. Thieme, T. Westphäling (IPG Laser GmbH)	
<b>LeiSe – Leichtbaukomponenten für Schiffselemente</b> . . . . .	147
Elke Kampen, Wolfgang Sichermann (Blohm+Voss Naval GmbH (BVN)); Prof. Dr.-Ing. Dieter H. Müller, Christian König (Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK), Universität Bremen); Dr. Christof Nagel, Dr. Markus Brede, Arne Fiedler (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen); Hans-Joachim Rennecke, Alexander Fabritz, Karl Kreft, Thomas Heuermann, Kay Kayser (KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, Bremen)	
<b>ULIVES – Ultraleichte Materialien für eisgängige Lastschiffe</b> . . . . .	165
Dr. Peter Kaufmann (SMK Ingenieure GmbH & Co KG); Dr. Thomas Hipke (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU)	
<b>PREFUL – Einbinden experimenteller und numerischer Resultate in die Entwicklung einer spezifischen Reibungskorrektur für Propeller</b> . . .	181
Heinrich Streckwall (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt); Lars Greitsch (Mecklenburger Metallguss GmbH)	
<b>MODESH – Neue Mess- und Simulationstechniken zur Untersuchung der Bewegung und Verformung von Schiffen im Seegang</b> . . . . .	191
A. Schumacher, P. Soukup (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt); J. Kaufmann (Germanischer Lloyd)	

# SOS3 – Analyse und Optimierung eines autonomen Systems zur Offshore-Ölunfallbekämpfung

Günther Clauss, Florian Sprenger, Sascha Kosleck  
(Technische Universität Berlin)

## Zusammenfassung

Der Seegangsunabhängige Oel-Skimmer (SOS) stampft mit einem barge-ähnlichen Bug über die seegangsbewegte Wasseroberfläche, wobei die Ölschicht als geglättete Strömung unter das fahrende Schiff gezwungen und dort - von einer querlaufenden Separationsklinge abgetrennt - in einem Moonpool im Schiffsinnen aufgefangen wird. In Glattwasser beträgt der Wirkungsgrad des Systems nahezu 100%, bei signifikanten Wellenhöhen von 3 m (maximale Wellenhöhe 5,5 m) noch etwa 50%. Da die Funktionsweise des SOS neben den durch Froude-Skalierung berücksichtigten Effekten auch auf Zähigkeitsbedingten Phänomenen wie Grenzschicht- und Wirbelbildung beruht, werden numerische Analysen bei gleichzeitiger Erfüllung aller relevanten Kennzahlen durchgeführt. Die vorgestellte Hybridmethode umgeht die Nachteile experimenteller und numerischer Analysemethoden und ermöglicht effiziente Untersuchungen von maritimen Ölunfallbekämpfungseinsätzen. GeoSim-Modellversuchsreihen in den Maßstäben 1:16, 1:25 und 1:36 dienen der Bestätigung der Berechnungen. Es zeigt sich, dass – abgesehen von lokalen Änderungen im Strömungsbild – in Modellversuchen unter Froude-Ähnlichkeit bestimmte Wirkungsgrade zuverlässig auf die Großausführung extrapoliert werden können.

## Abstract

The barge-shaped bow of the Sea State-Independent Oil Skimming System (SOS) moves through the wave field, smoothing and guiding the oil below the moving hull, where it is recovered in an internal moon pool. In calm water, the oil skimming efficiency is almost 100% and in significant waves heights of 3 m (maximum wave height 5.5 m) 50% are achieved. Since the functional principle of the SOS depends on Froude-dependent effects as well as viscous phenomena such as boundary layer and vortex generation, numerical calculations in compliance with all relevant physical numbers are conducted. The presented efficient hybrid approach bypasses the drawbacks in experimental and numerical oil recovery analysis, combining the advantages. Calculation results are confirmed by GeoSim model test series at scales of 1:16, 1:25 and 1:36. The investigations reveal that – apart from local flow field alte-

rations – oil skimming efficiencies obtained from Froude-compliant model tests are trustworthy and can be extrapolated to full scale operations.

## Einleitung und Motivation

Der Eintrag von Öl in die Weltmeere ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Neben den durch Förderung, Transport und Verbrauch von Mineralöl hervorgerufenen Verschmutzungen findet eine kontinuierliche natürliche Einsickerung durch den Meeresboden statt. Klassische Ölunfallbekämpfungskonzepte konzentrieren sich auf größere Mengen ausgelaufenen Öls, verursacht z.B. durch Tankerhavarien oder Fehler bei Offshore-Bohrungen. Statistisch betrachtet ist die Zahl solcher Unglücke über die letzten Jahrzehnte deutlich zurückgegangen, was auf verbesserte Technologien und strengere Auflagen zurückzuführen ist. Die jüngsten Katastrophen wie die Explosion der Deepwater Horizon 2010 im Golf von Mexiko (780.000 m<sup>3</sup>, Abb. 1, rechts) oder die Havarie des Containerschiffes MV Rena Ende 2011 auf dem Astrolabe-Riff vor der Neuseeländischen Nordküste (350 Tonnen, Abb. 1, links) zeigen jedoch, dass trotz aller Fortschritte weder technisches noch menschliches Versagen ausgeschlossen werden kann und auch in Zukunft mit Ölkatastrophen gerechnet werden muss. Insbesondere die Nachwirkungen der Katastrophe im Golf von Mexiko führten der Weltöffentlichkeit die Unzulänglichkeit der derzeitigen Ölunfallbekämpfungsflotte in den USA und im Rest der Welt drastisch vor Augen. Die insgesamt mehr als 5.000 eingesetzten Schiffe konnten lediglich 140.000 m<sup>3</sup> ölverschmutztes Wasser aufnehmen – eine erschreckende Bilanz.



Abb. 1: Havariertes Containerschiff MV Rena (links), sinkende Plattform Deepwater Horizon (rechts)

Ein einziges effizientes Spezialschiff, ausgelegt für

- hohe Transitgeschwindigkeit,
- Aufnahme großer Mengen överschmutzten Wassers,
- Einsatzbereich von Glattwasser bis rauer See sowie

- hohen Wirkungsgrad  $\eta = \frac{V_s}{V_D}$  (1)

(wobei  $V_s$  der Menge des aufgenommenen Öls und  $V_D$  der Menge des Öls in der Anströmung entspricht)

hätte diese Aufnahmeleistung in weniger als einem Tag erbracht. Während derzeit vorgehaltene Systeme bei Wellenhöhen von mehr als 1 m bereits nicht mehr einsetzbar sind und im Hafen auf ruhige Bedingungen warten müssen, können Spezialschiffe, welche die genannten Anforderungen erfüllen, mit der Ölaufnahme beginnen, bevor sich der Ölfilm auf weite Bereiche der Meeresoberfläche verteilt und seine chemischen Eigenschaften ändert (Emulgierung).

An der Technischen Universität Berlin wurde im Hinblick auf diese Anforderungen im Rahmen von drei BMWi-geförderten Forschungsvorhaben die sogenannte SOS-Technologie (Seegangsunabhängiger Oel-Skimmer) entwickelt und schrittweise optimiert (siehe Clauss et al. (2008) sowie Abu Amro und Sprenger (2008)).

### **Merkmale der SOS-Technologie**

Das Konzept des seegangsunabhängigen Ölskimmers wurde bereits in Deutschland und den USA patentiert, in weiteren relevanten Ländern wurden Anmeldungen eingereicht. Die SOS-Technologie basiert auf rein hydromechanischen Prinzipien und ist besonders robust, da sie ohne bewegliche Teile auskommt.

Abb. 2 zeigt das SOS-System: Ein speziell geformtes Bugsegment zwischen Katamaranrümpfen zur Strömungsführung stampft im Seegang über die överschmutzte Wasseroberfläche. Der im Wellenfeld heftig bewegte Ölfilm wird anschließend als glatte Strömung entlang der Bugunterseite bis zu einer Einlassöffnung im Schiffsboden geführt. Hier trennt eine querlaufende Separationsklinge die ölführende Schicht von der Hauptströmung und leitet das Öl-Wasser-Gemisch in ein Becken im Schiffsinnen – den sogenannten Moonpool. An der stumpfen Hinterkante des Bugsegments – vor dem Einlauf in den Moonpool – entsteht ein Wirbel, welcher die Ölpartikel zusätzlich zur

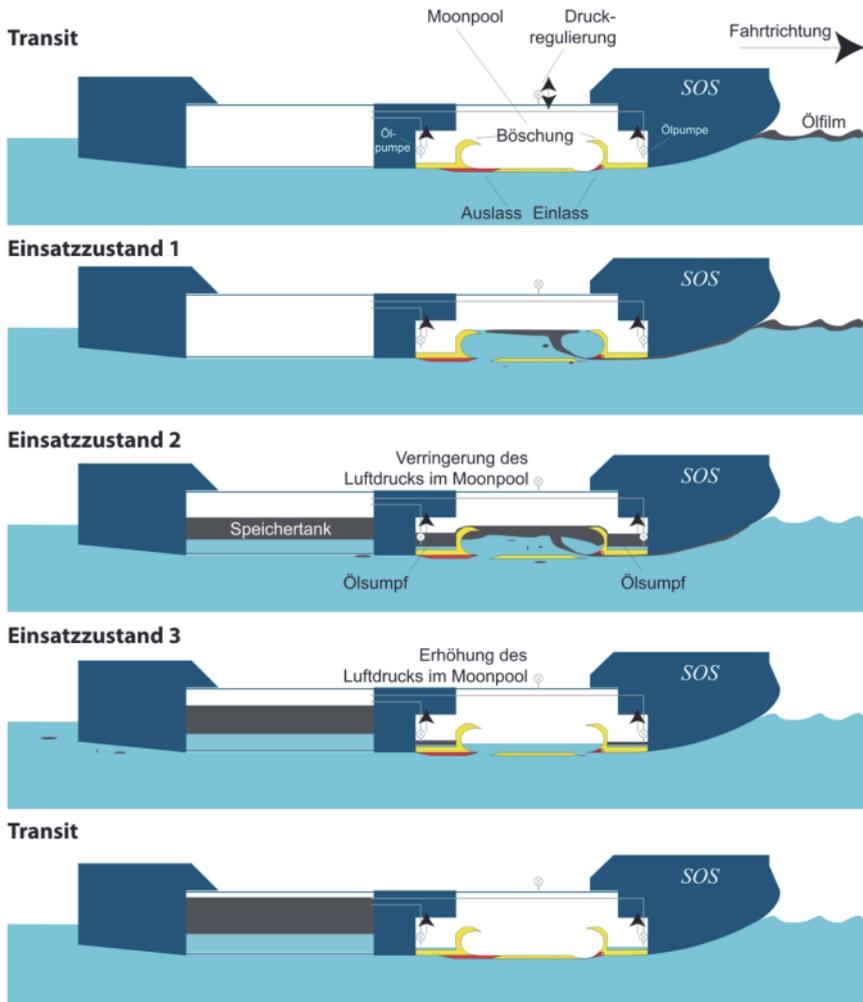
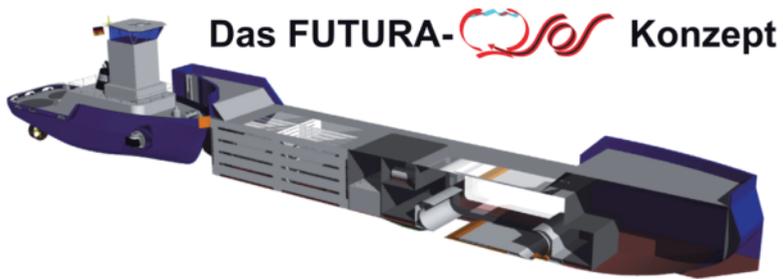


Abb. 2: Funktionsprinzip der SOS-Technologie und schematischer Ablauf eines Ölunfallbekämpfungseinsatzes

Auftriebskraft an die freie Wasseroberfläche des Moonpools beschleunigt. Sogenannte CUSP-Formen (diese speziellen Formen wurden zur Wider-

standsreduzierung von Vollheckfahrzeugen wie Bussen oder LKW entwickelt, siehe Hucho (2005): In einem persönlichen Gespräch hat Hucho daher für die Wirbelströmung im SOS-Moonpool CUSP-Geometrien empfohlen.) dienen der Stabilisierung des Wirbels und beeinflussen das Strömungsbild, um zu verhindern, dass die Ölpartikel den Moonpool mit dem Wasser durch den Auslass wieder verlassen. Durch gezielte Regulierung des Innendrucks in diesem hermetisch abgeschlossenen Bereich wird die Überlaufhöhe über die Böschungen so eingestellt, dass zusätzlich zur obersten Schicht – der Ölschicht – möglichst wenig Wasser in die Ölsümpfe läuft. Dort findet eine Nachseparation statt und das Öl wird in konzentrierter Form in bordeigene Speichertanks gepumpt. Die separat steuerbaren Einlass- und Auslassklappen sind vor bzw. hinter einer festen Bodenplatte angeordnet und können je nach Bedarf nach innen oder außen schwenkbar bzw. als Schieber konstruiert werden. Dadurch ist die optimale Durchflussrate durch den Moonpoolbereich individuell einstellbar. Da bei der SOS-Technologie – im Gegensatz zu bekannten Systemen – nicht versucht wird, den Ölfilm direkt von der bewegten Wasseroberfläche zu entfernen, sondern der Separationsprozess in beruhigten Zonen unterhalb und innerhalb des Schiffes stattfindet, ist das System selbst bei rauer See mit signifikanten Wellenhöhe bis zu 3 m noch wirkungsvoll einsetzbar. Zu den weiteren Vorteilen der SOS-Technologie zählt:

- Einbau in verschiedene Schiffe mit geringem Aufwand und Kosten möglich
- Verringerte Feuer- und Explosionsgefahr durch gekapselten Moonpool
- Durchgängiges Deck mit zusätzlichem Platzangebot in freier Atmosphäre, d.h. getrennt vom hermetisch abgeschlossenen Ölskimming-System
- Innendruckregulierung durch Videoüberwachung und Fernsteuerung von der Brücke
- Steuerung des Volumenstroms durch den Moonpool mit Klappensystem
- Abschirmung des Moonpools vom dynamischen Druck des Wellenfeldes durch Bodenplatte
- Möglichkeit einer schnellen Evakuierung des Moonpools durch Druckerhöhung im hermetisch abgeschlossenen Bereich

Zur Erprobung der SOS-Technologie wurde das Skimming-System in ein Trägerschiff mit der von New Logistics GmbH entwickelten FUTURA-Rumpf-

form integriert. Das sogenannte FUTURA-SOS Konzept wurde numerisch sowie in GeoSim-Modellversuchen in den Maßstäben 1:36, 1:25 und 1:9 analysiert. In den nachfolgenden Abschnitten wird der SOS zunächst im Hinblick auf Maßstabseffekte diskutiert.

### Untersuchung von Maßstabseffekten

Seegangversuche im Modellmaßstab werden unter der Einhaltung der Froude'schen Ähnlichkeit durchgeführt, d.h. das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkraften, ausgedrückt durch die Froude-Zahl

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (2)$$

wird skaliert. Die Geschwindigkeit des Ölskimmers wird hierbei mit  $v$  und dessen Länge mit  $l$  bezeichnet,  $g$  ist die Erdbeschleunigung. Bei einer vollständigen Untersuchung des SOS-Prinzips müssen jedoch auch durch die Froude-Zahl nicht skalierbare Effekte wie Grenzschicht- und Wirbelbildung sowie die physikalischen Eigenschaften der beteiligten Medien berücksichtigt werden. Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst erläutert, wie die relevanten Phänomene skaliert werden können und welchen Einfluss sie auf die Extrapolation des Wirkungsgrads vom Modellmaßstab zur Großausführung haben.

### Numerische Bewertung relevanter Kennzahlen

Bei der Untersuchung des Strömungsfeldes in und um den SOS treten die Vorteile numerischer Simulationsverfahren gegenüber Modellversuchen deutlich zu Tage: Sie ermöglichen die lokale und globale Visualisierung und Kontrolle beliebiger physikalischer Größen. Die bisherigen – erfolgreich validierten – Untersuchungen des Ölskimmersystems wurden ausschließlich unter Einhaltung Froude'scher Ähnlichkeit durchgeführt. Um Aussagen über den Wirkungsgrad des SOS in der Großausführung treffen zu können, werden durch die Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (3)$$

welche das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften beschreibt, auch viskose Effekte wie Grenzschicht- und Wirbelbildung berücksichtigt (siehe Abb. 3, links). Die Strömungsgeschwindigkeit wird hierbei mit  $v$ , die charakteristische Länge mit  $l$  und die kinematische Viskosität mit  $\nu$  bezeichnet. Die physikalischen Eigenschaften der am Separationsprozess beteiligten Medien werden schließlich durch die Morton-Zahl

$$Mo = \frac{g \mu^4 \Delta \rho}{\rho^2 \sigma^3} \quad (4)$$



Abb. 3: Grenzschichteffekte und Wirbelbildung am SOS hängen von der Reynolds-Zahl ab (links), Aufstiegsverhalten und Phasengrenzeffekte hängen von der Morton-Zahl ab (rechts)

charakterisiert (siehe Abb. 3, rechts). Hierbei steht  $\mu$  für die dynamische Viskosität des Wassers,  $\Delta\rho$  für den Dichteunterschied zwischen Öl und Wasser,  $\rho$  für die Dichte des Wassers und  $\sigma$  für die Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Wasser und Öl. Die gleichzeitige Erfüllung von Froude'scher und Reynolds'scher Ähnlichkeit ist in einem physikalischen Versuchsbecken nicht möglich, kann aber in einem numerischen Strömungskanal erreicht werden.

Im Folgenden werden dreiphasige CFD-Analysen (Computational Fluid Dynamics, Luft/Wasser/Öl) im Maßstab 1:15 präsentiert. Das für die Unter-

	Großausführung	Szenario ①	Szenario ②
Fr [-]	0,108	0,108	0,108
Re [-]	<b>6,353e<sup>07</sup></b>	<b>1,093e<sup>06</sup></b>	<b>6,353e<sup>07</sup></b>
Mo [-]	1,218e <sup>-10</sup>	1,218e <sup>-10</sup>	1,218e <sup>-10</sup>
$v_{H_2O}$ [m <sup>2</sup> /s] (bei 10°C)	<b>1,005e<sup>-06</sup></b>	<b>1,005e<sup>-06</sup></b>	<b>1,730e<sup>-08</sup></b>
$\rho_{H_2O}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	998,2	998,2	998,2
$v_{Öl}$ [m <sup>2</sup> /s] (bei 10°C)	1,501e <sup>-04</sup>	1,501e <sup>-04</sup>	1,501e <sup>-04</sup>
$\rho_{Öl}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	919,5	919,5	919,5
$\sigma$ [N/m] (bei 10°C)	<b>0,0186</b>	<b>0,0186</b>	<b>8,267e<sup>-05</sup></b>

Tab. 1: Relevante Kennzahlen und Strömungsparameter für die Großausführung sowie zwei gewählte numerische Szenarien im Maßstab 1:15

suchungen generierte zweidimensionale Rechengebiet wird durch ein Hybridgitter (Hexaeder und Tetraeder-Zellen) mit etwa 70.000 Zellen diskretisiert (bei Clauss et al. (2010) finden sich detaillierte Informationen zum gewählten numerischen Modell). Wie Tab. 1 zu entnehmen ist, werden für eine Fahrtgeschwindigkeit von 3,76 kn in Glattwasser zwei Szenarien betrachtet. Szenario 1 stellt den bisher betrachteten Fall dar, in dem wie im Modellversuch lediglich nach Froude skaliert wird. In diesem Fall ist die Reynolds-Zahl kleiner als für die Großausführung. In Szenario 2 dagegen wird durch Verringerung der kinematischen Viskosität des Wassers gleichzeitig Reynolds-Ähnlichkeit erreicht. Um zu gewährleisten, dass auch die Morton-Zahl dem Wert für die Großausführung entspricht, wird zusätzlich die Oberflächenspannung an der Phasengrenze zwischen Öl und Wasser verringert.

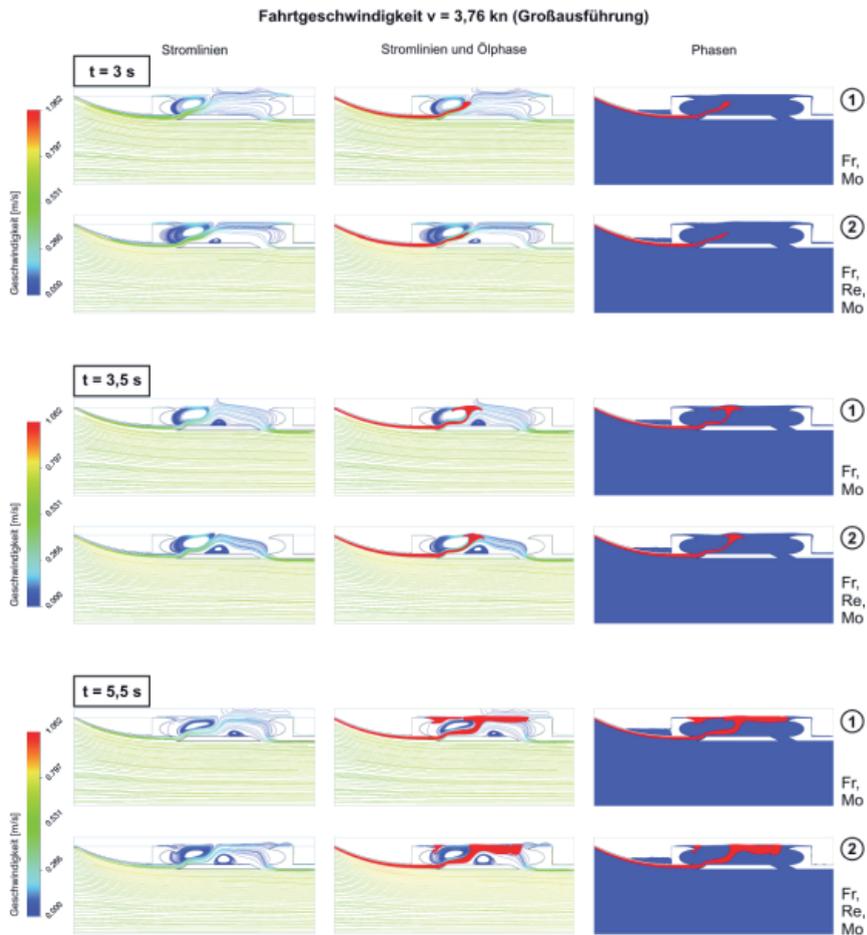


Abb. 4: Vergleich der numerisch berechneten Strömungsbilder im Moonpool (Maßstab 1:15) für Szenario 1 (Fr- und Mo-Ähnlichkeit) und Szenario 2 (Fr-, Re- und Mo-Ähnlichkeit) bei  $v = 3,76$  kn in Glattwasser

In Abb. 4 sind die Geschwindigkeitslinien (linke Spalte), die mit der Ölphase überlagerten Geschwindigkeitslinien (mittlere Spalte) sowie die Phasenverteilung (rechte Spalte) für drei diskrete Zeitschritte der transienten Simulationen beider Szenarien dargestellt. Bei  $t = 3$  s Simulationszeit tritt der Ölfilm in den Moonpool ein und steigt zur freien Flüssigkeitsoberfläche im Schiffsinnen auf, welche er im zweiten Zeitschritt bei  $t = 3,5$  s erreicht. Im letzten Zeitschritt ( $t = 5,5$  s) schließlich hat sich der Ölfilm an der Wasseroberfläche des Moonpools ausgebreitet. Zwischen den beiden numerischen Szenarien lassen sich keine signifikanten Differenzen hinsichtlich des globalen Strömungsbilds und des Aufstiegsverhaltens der Ölpartikel feststellen, lediglich lokal begrenzte Unterschiede sind auszumachen: der Wirbel über der Einlassöffnung zum Moonpool erscheint in Szenario 2 leicht gestreckt gegenüber Szenario 1, wodurch der Punkt, an dem das aufsteigende Öl die freie Oberfläche des Moonpools erreicht, leicht nach hinten verschoben ist. Davon abgesehen lässt sich festhalten, dass die Funktionsweise des SOS durch eine Vernachlässigung der Skalierung viskoser Effekte nicht beeinflusst wird – Modellversuchsergebnisse sind daher eine vertrauenswürdige Datenbasis.

### **Entwicklung einer effizienten Hybridmethode**

Experimentelle Erprobungen von maritimen Ölunfallbekämpfungskonzepten stellen eine komplexe Herausforderung dar. Die aufwändigen Versuchsreihen erfordern ein Seegangsbecken, in das man idealerweise kontrolliert Mineralöl, mindestens jedoch einen geeigneten Ölersatzstoff einbringen kann. Im Anschluss an die Untersuchungen muss die Versuchsanlage gemäß geltender Umweltschutzregelungen kosten- und arbeitsintensiv gereinigt werden. Diese Prozedur kann umgangen werden, indem man anstelle von Modellversuchen numerische Simulationsverfahren einsetzt. Minimalanforderungen an ein solches Verfahren umfassen transiente Berechnungen einer dreiphasigen Strömung in einem dreidimensionalen Rechengebiet und die Anwendung dynamischer Gittermethoden, um seegangsinduzierte Schiffsbewegungen und die Fahrtgeschwindigkeit des Systems zu berücksichtigen. Eine solche ganzheitliche Simulation ist jedoch sehr zeitintensiv und erfordert ein entsprechendes Rechencluster.

Die in Abb. 5 schematisch dargestellte, entwickelte Hybridmethode kombiniert die Vorteile von Modellversuchen und numerischen Verfahren und umgeht dabei die Nachteile. In Modellversuchen werden Seegang, Schiffsbewegungen (insbesondere Tauchen und Stampfen) und die Schiffposition relativ zum Wellenblatt aufgemessen, hierzu ist keine Verschmutzung der Versuchseinrichtung nötig. Die gemessenen Auslenkungen der Wasseroberfläche werden anschließend mit dem schnellen und zuverlässigen in-house Potentialtheoriecode WAVETUB numerisch reproduziert. Kurz vor der Position des Ölskimmers werden die Geschwindigkeitsprofile an den kommerziel-

len CFD-Löser ANSYS FLUENT übergeben, wo sich die Wellenausbreitung vom Einlass zur diskretisierten FUTURA-SOS Geometrie in einem zweidimensionalen Rechengebiet fortsetzt. Um Rechenzeit zu sparen wird die Berechnung der Wellen-Struktur-Interaktion im CFD-Löser durch Vorgabe der Bewegungen aus den Modellversuchen ersetzt. Eine detaillierte Beschreibung der numerischen Modelle und beispielhafte Ergebnisse finden sich bei Clauss et al. (2012b). Zur Validierung der numerischen Resultate werden GeoSim-Versuchsreihen (Geometrically Similar) durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse dieser Modellversuche in drei verschiedenen Maßstäben präsentiert.

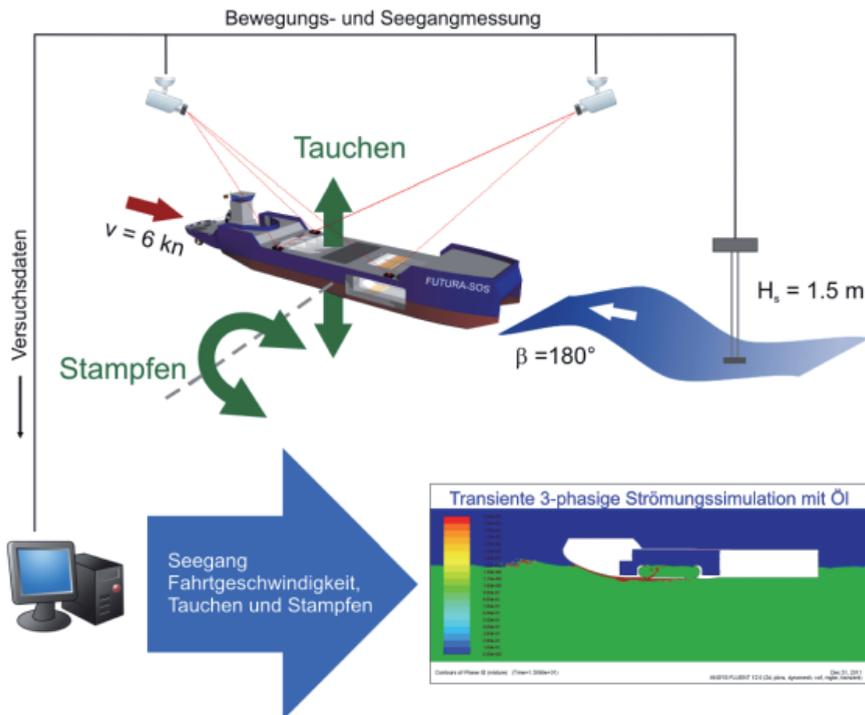


Abb. 5: Schema des Hybridansatzes zur effizienten Simulation von Ölunfallbekämpfungseinsätzen

### GeoSim-Modellversuche

Die systematischen experimentellen Untersuchungen dienen der Bestimmung des Wirkungsgrads des FUTURA-SOS Konzepts in den Maßstäben 1:16, 1:25 und 1:36 (siehe Abb. 6). Versuchsparameter sind die Seegangstärke (Glattwasser und irreguläre Seegänge aus JONSWAP-Spektren im Bereich  $1 \text{ m} \leq H_s \leq 3 \text{ m}$ , Großausführung), die Fahrtgeschwindigkeit ( $3 \text{ kn} \leq v \leq 5 \text{ kn}$ , Großausführung) und die Überlaufhöhe über die Böschungen im Moonpool ( $-1 \text{ mm} \leq h_0 \leq +1 \text{ mm}$  im Modellmaßstab, d.h. für die Großausfüh-

rung entsprechend  $\pm 16$  mm,  $\pm 25$  mm und  $\pm 36$  mm) in insgesamt 90 Modellversuchen. Ziel der Versuchsreihen (bei korrekter Froude-Skalierung, die Reynolds-Zahl ist zu klein, nähert sich mit steigender Modellgröße jedoch dem Wert für die Großausführung) ist die experimentelle Bestätigung der Schlussfolgerung aus den numerischen Maßstabsanalysen: Durch Vernachlässigung der Skalierung von Zähigkeitseinflüssen ist kein Fehler bei der Extrapolation von Wirkungsgraden auf die Großausführung messbar.

Aus Umweltschutzgründen wurde Kunststoffgranulat (Dichte  $\rho = 920$  kg/m<sup>3</sup>, Durchmesser  $d_p = 500$   $\mu$ m) anstelle von Mineralöl für die Modellversuche verwendet. Der Wirkungsgrad der Granulataufnahme nach Gl. (1) ist in der Praxis jedoch nicht trivial zu bestimmen: VS entspricht der Menge des aufgenommenen Granulats, welche nach einem Versuchsdurchlauf relativ einfach zu messen ist. Die Bestimmung der Menge der Kunststoffpartikel in der Anströmung  $V_D$  setzt jedoch voraus, dass die Verteilung des Granulats an der Wasseroberfläche auf der Versuchsstrecke bekannt ist. Insbesondere bei Seegang kann dieser Wert jedoch nicht exakt bestimmt werden, vielmehr wird vor den Versuchen die folgende Prozedur zur Bestimmung des Wirkungsgrads  $\eta$  festgelegt: Aus der gegebenen Skimmerbreite  $B$  und der Länge Versuchsstrecke  $L$  wird die Skimming-Fläche  $A$  des jeweiligen Versuchsdurchlaufs bestimmt (siehe auch Abb. 7, links):

$$A = B \cdot L \quad (5)$$

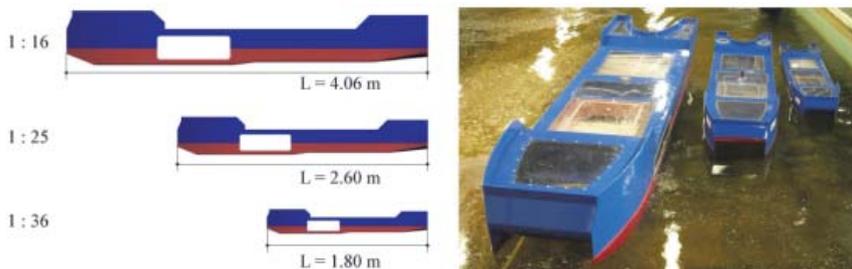


Abb. 6: Vergleich der Abmaße der FUTURA-SOS Modelle in den drei untersuchten Maßstäben

Mit Hilfe eines speziell gefertigten Messrahmens wird in einem repräsentativen Oberflächenausschnitt von 1 m<sup>2</sup> die Dicke der Granulatschicht auf der Versuchsstrecke als prozentualer Wert des Granulatdurchmessers bestimmt. Abb. 7 (rechts) verdeutlicht exemplarisch, wie durch Erzeugung eines Bereiches von konstanter Bedeckung mit der Höhe eines Granulatdurchmessers der Bedeckungswert  $C = 0,4$  ermittelt wird.



Abb. 7: Bestimmung der Skimmingfläche A (links) und der Granulatbedeckung der Versuchsstrecke im Seegangsbecken

Aus den so bestimmten Größen lässt sich nun die Menge des Granulats in der Anströmung berechnen:

$$V_D = A \cdot C \cdot d_p \quad (6)$$

Die Ergebnisse aus den GeoSim-Versuchsreihen sind in Abb. 8 in zehn Diagrammen zusammengefasst, sortiert nach der Überlaufhöhe über die Böschung im Moonpool (abnehmend von links nach rechts) und der Seegangstärke (zunehmend von oben nach unten). Wie zu erwarten werden für Einsätze in Glattwasser bei allen drei Maßstäben die höchsten Wirkungsgrade gemessen ( $80\% \leq \eta \leq 100\%$ ). Bei den beiden kleineren Modellmaßstäben ist für  $v = 3$  kn ein Abfall des Wirkungsgrades auf etwa  $\eta \approx 25\%$  zu beobachten. Dieses Phänomen ist der Tatsache geschuldet, dass die Geschwindigkeiten während der Versuche Froudeabhängig skaliert werden, d.h. 3 kn bzw. 1,54 m/s in der Großausführung entsprechen im Modellmaßstab 1:16 noch 0,39 m/s, im Maßstab 1:25 noch 0,31 m/s und für das kleinste Modell (1:36) nur noch 0,26 m/s. Bei diesen geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen Schiffsrumpf und Wasseroberfläche ist die am Rumpf anliegende Strömung zur Einlassöffnung im Schiffsboden zu schwach, um das Granulat unter den Rumpf zu ziehen, es kommt zu einem Staueffekt vor dem Bug. Bereits bei geringen Wellenhöhen – und damit zunehmenden Relativgeschwindigkeiten – ist dieses Phänomen nicht mehr zu beobachten.

Die Ergebnisse der Versuchsfahrten in den drei Modellmaßstäben bei entsprechend skalierten JONSWAP-Seegängen mit einer signifikanten Wellenhöhe von  $H_s = 1$  m (Großausführung, siehe zweite Zeile in Abb. 8) zeigen zunächst eine Verringerung des Wirkungsgrades auf einen Bereich  $50\% \leq \eta \leq 80\%$ . Für diese Seegangstärke lassen sich zwei Tendenzen ablesen: Der Wirkungsgrad der Ölaufnahme steigt mit wachsender Modellgröße und sinkt mit geringeren Fahrtgeschwindigkeiten und der Reduzierung der Überlaufhöhen über die Böschung. Mit zunehmender Seegangstärke lassen sich jedoch keine klaren Tendenzen mehr ausmachen, mit Ausnahme des kontinuierlich abnehmenden Wirkungsgrades ( $30\% \leq \eta \leq 60\%$  für  $H_s = 2$  m, siehe

dritte Zeile in Abb. 8 und  $20\% \leq \eta \leq 50\%$  für  $H_s = 3$  m, siehe vierte Zeile in Abb. 8). Die zunehmende Streuung der Ergebnisse mit zunehmender Seegangsstärke ist auf die oben erwähnten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Menge des Granulats in der Anströmung  $V_D$  zurückzuführen. Mit Ausnahme der Staueffekte vor dem Skimmerbug bei niedrigen Geschwindigkeiten und kleinen Modellgrößen sind keine klaren Maßstabeffekte auszumachen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Reynolds-abhängige hydrodynamische Effekte – wie der Wirbel über der Einlassöffnung zum Moonpool – den Wirkungsgrad der Großausführung nicht beeinflussen und die ermittelten Wirkungsgradbereiche auf die Großausführung extrapoliert werden können. Weitere Ergebnisse der Versuchsreihen finden sich bei Clauss et al. (2012a)

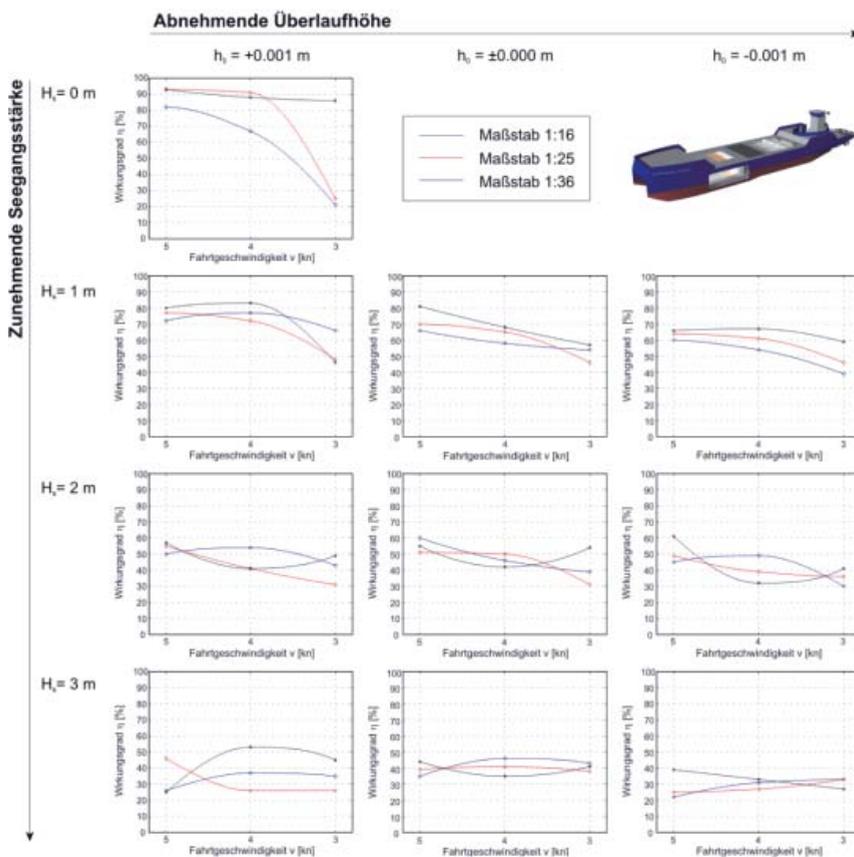


Abb. 8: Sortierung der GeoSim-Versuchsergebnisse für die drei Modellmaßstäbe hinsichtlich der Überlaufhöhe über die Böschung (abnehmend von links nach rechts) und der Seegangsstärke (zunehmend von oben nach unten)

## Schlussfolgerungen und Perspektiven

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SOS3 konnte durch numerische Simulationen unter Einhaltung aller relevanter physikalischer Kennzahlen sowie durch GeoSim Modellversuchsreihen nachgewiesen werden, dass Ölaufnahmewirkungsgrade, welche unter Vernachlässigung der Skalierung von Zähigkeitseffekten bestimmt wurden, eine zuverlässige Datenbasis darstellen. Zu geringe Reynolds-Zahlen im Modellmaßstab führen zwar zu geringfügigen lokalen Änderungen des Strömungsbildes im Moonpool, nicht aber zu Fehlern bei der Extrapolation von Wirkungsgraden auf die Großausführung. Um aufwändige Modellversuche mit Mineralöl oder Ölersatzstoffen bzw. rechenintensive ganzheitliche numerische Simulationen zu umgehen, wurde außerdem ein effizientes hybrides Analyseverfahren für Ölunfallbekämpfungseinsätze entwickelt: In ein zweidimensionales viskoses Strömungsfeld mit drei Phasen werden experimentell ermittelte Seegangs-, Schiffspositions- und Schiffsbewegungsdaten implementiert.



*Abb. 9: Impressionen von der Probefahrt mit dem FUTURA-SOS Prototyp auf der Elbe in Hamburg*

Im Frühjahr 2011 wurde vom Lizenznehmer der SOS-Technologie auf der Hamburger Jöhnk-Werft ein Demonstrator gebaut. Ein 52 m langes und 8 m breites Binnenschiff wurde dazu mit einer veränderten Buggeometrie und dem Moonpool-Bereich ausgestattet. Erste Probefahrten auf der Elbe verliefen erfolgreich: Bei Glattwasserbedingungen konnten etwa 90% des ausgebrachten Popcorns (ein auch vom Havariekommando verwendeter Ersatzstoff für Mineralöl) wieder geborgen werden (siehe Abb. 9). Weitere Testfahrten im Seegang sind für Ende 2012 angesetzt.

Sowohl die Ergebnisse mit dem 52 m-langen Demonstrationssystem wie auch mit den FUTURA-SOS-Schiffen in den Maßstäben 1:36, 1:25 und 1:16 bestätigen – in Übereinstimmung mit den numerischen Analysen – die hohe Effizienz des SOS-Systems – auch bei rauen Seegangsbedingungen. Wäre

bei der eingangs diskutierten Deepwater Horizon-Ölkatastrophe im Golf von Mexiko dieses System einsatzbereit gewesen, so hätte das FUTURA-SOS-Schiff 320.000 m<sup>3</sup> ölhaltiges Wassergemisch pro Tag verarbeiten können, d.h. mehr als die gesamten 140.000 m<sup>3</sup> Abschöpfleistung aller 5.000 eingesetzten Schiffe.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Vorhabens „SOS3 – Analyse und Optimierung eines autonomen Trägersystems zur Offshore-Ölunfallbekämpfung“ (FKZ 03SX270) und dem Projektträger Jülich, hier namentlich Frau Dipl.-Ing. Barbara Grothkopp und Frau Dipl.-Ök. Karla Haller für die hervorragende Begleitung des Projektes.

## Literatur

Abu Amro, M., Sprenger, F., An Innovative Offshore Oil Skimming System for Operations in Harsh Seas, *Ship Technology Research*, Vol. 55, Seiten 147-156, 2008

<http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2008/Ship-Technology-Research-2008-SOS.pdf>

Clauss, G., Abu Amro, M., Sprenger, F., *SOS – Integration eines seegangsunabhängigen Ölskimmers in ein Ölunfallbekämpfungsschiff*, Tagungsband der Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik, Warnemünde, Deutschland, 2008

<http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2008/BMWi-Statustagung-2008-SOS.pdf>

Clauss, G., Sprenger, F., Kosleck, S., *Numerical Analyses of Scaling Effects and the Flow Field Inside an Innovative SeaState Independent Oil Skimming System – SOS*, Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China, 2010

[http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2010/OMAE\\_2010\\_20146\\_SOS3.pdf](http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2010/OMAE_2010_20146_SOS3.pdf)

Clauss, G., Kosleck, S., Sprenger, F., Grüter, L., *Oil Skimming Efficiency of the SOS: Scaling from GeoSim Model Tests to Full Scale Prototype Operations*, Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brasilien, 2012(a)

<http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2012/OMAE2012-83624.pdf>

Clauss, G., Kosleck, S., Sprenger, F., Stuppe, S., *A Hybrid Analysis Method for Investigating Oil Cleanup Operations at Sea*, Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brasilien, 2012(b)

<http://130.149.35.79/downloads/publikationen/2012/OMAE2012-83014.pdf>

Hucho, W., *Aerodynamik des Automobils*, Verlag Vieweg & Teubner, 5. Auflage, Wiesbaden, 2005

# Entwicklung von numerischen und experimentellen Methoden zur Bestimmung der Rolldämpfung

Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud, Sven Handschel, Nikolai Köllisch, Dr. Volker Müller (Technische Universität Hamburg-Harburg); Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould El Moctar, Rainer Kaiser, Henry Piehl (Universität Duisburg-Essen); Dr.-Ing. Matthias Fröhlich (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam); Dr.-Ing. Vladimir Shigunov (Germanischer Lloyd)

## Kurzfassung

Die Rollbewegung eines Schiffes ist im Vergleich zu den anderen Freiheitsgraden schwach gedämpft. Im Fall von Resonanz können große Rollwinkel auftreten. Bisher wird lediglich ein kleiner Anteil der Rolldämpfung, wie z. B. die Wellenabstrahlung, mit theoretischen Ansätzen zufriedenstellend berechnet. Modellversuche liefern die unbekanntenen viskosen Anteile der Rolldämpfung.

Im Rahmen des Vorhabens wurden neue Messverfahren zur Bestimmung der Rolldämpfung von Schiffen entwickelt, die vor allem bei großen Rollamplituden eine höhere Genauigkeit aufweisen. Zur Bestimmung der einzelnen Komponenten der Rolldämpfung wurden zwei numerische Simulationsverfahren eingesetzt. Der Vergleich zwischen Mess- und Rechenergebnissen zeigt, dass die numerischen Simulationen eine effiziente Alternative zu Modellversuchen bieten.

## Einleitung

Berechnungsverfahren für potenzialtheoretische Strömungen zur Simulation von Bewegungen und Belastungen von Schiffen im Seegang haben in den letzten Jahrzehnten eine hohe Genauigkeit erreicht. Die Rollbewegung wird jedoch stark durch viskose Rolldämpfungsphänomene beeinflusst. Die Genauigkeit bisheriger Verfahren wird durch die unzureichend bestimmbare Rolldämpfung eingeschränkt.

Um viskose Dämpfungsphänomene in Verfahren für potenzialtheoretische Strömungen zu berücksichtigen, werden Korrekturfaktoren meist in Form von Koeffizientenmodellen verwendet. Rolldämpfungskoeffizienten werden in der Regel mittels kostenintensiven Modellversuchen oder mit empirischen bzw. semi-empirischen Verfahren ermittelt. Diese Verfahren basieren auf Versuch-

sergebnissen unter Verwendung typischer Schiffsgeometrien der 60er und 70er Jahre des 20. Jahrhunderts ([1] Himeno, 1981 und [2] Blume, 1979). Systematische Untersuchungsergebnisse für moderne Schiffsformen sind nicht vorhanden.

Das Gesamtvorhaben hat die Entwicklung und Validierung von Rechenverfahren zur Bestimmung der Rolldämpfungskoeffizienten zum Ziel. Da in Abhängigkeit vom Anwendungsfeld – Schiffsentwurf, Entwicklung von Schiffssicherheitskriterien und weitere – verschiedene Anforderungen an die Handhabbarkeit und Genauigkeit der Verfahren gestellt werden, sind Verfahren erforderlich, die eine Bestimmung der Rolldämpfungskoeffizienten von einer einfachen Abschätzung bis hin zu detaillierten Berechnungen ermöglichen. Neben den numerischen Untersuchungen werden verschiedene experimentelle Methoden im Schlepptank der Schiffsbauversuchsanstalten in Potsdam und Hamburg sowie im Windkanal der Technischen Universität Hamburg-Harburg zur Bestimmung der Rolldämpfung verglichen und auf ihre Einsatzspektrien untersucht. Die experimentellen Untersuchungen dienen zugleich als Validierungsdaten für die Entwicklung und Anwendung von numerischen Verfahren.

### **Moderne Schiffsformen – Basisgeometrien und deren Formvarianten**

Moderne Schiffsformen werden häufig nach zwei Gesichtspunkten entworfen: Erhöhung der Transportkapazität und Verringerung des Leistungsbedarfs im Glattwasser. Die Berücksichtigung dieser Kriterien führt zu einem Schiffsentwurf mit starkem Spantausfall, einem völligeren Mitschiff und einem Spiegelheck (siehe Abb. 1).

Für die numerischen Untersuchungen der Rolldämpfung wurden 5 Basis-schiffsformen mit Anhängen (3 Containerschiffe, 1 Passagierschiff, 1 RoPax-Fähre) mit unterschiedlichen Spantformen generiert (siehe Tabelle 1). Theoretische Entwicklungsarbeiten bezüglich der Berechnung und des Abgleichs wesentlicher Formparameter und hydrostatischer Kennwerte für moderne Schiffsformen, bei denen eine erhöhte Gefahr der Rollerregung besteht, wurden von der SVA vorgenommen.

Für die jeweiligen fünf Basisschiffsformen wurden insgesamt 6 Formvariationen entwickelt. Dies erfolgte durch Änderung des Breite-Tiefgang-Verhältnisses, des Vorschiffes und des Kimmradius in zwei Schritten. Geeignete Parameter für Formvariationen wurden erarbeitet. Für die resultierenden 30 Schiffsformvariationen plus 5 Ausgangsformen erfolgten zudem Propeller-auslegung und Geschwindigkeitsprognose.



Abb. 1: Post-Panamax Containerschiff DTC – Modellbau Schiffbau-versuchsanstalt Potsdam

<b>Typ</b>	<b>Länge</b>	<b>Breite</b>	<b>Tiefgang</b>	<b>Verdrängung</b>	<b>Geschw.</b>	<b>Leist.</b>
	<b>L<sub>pp</sub></b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>∇</b>	<b>V</b>	<b>PDs</b>
	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[kts]	[MW]
<b>Post-PanM.</b>	355	51	14,5	173408	24,5	65
<b>Feeder</b>	110	18	7,10	10430	17,0	7,2
<b>PanMax</b>	268	32,2	12,0	68590	23,0	38
<b>RoPax</b>	171,4	26	6,00	14760	21,5	16,2
<b>Pax</b>	250	32	7,20	39500	21,0	20,5

Tab. 1: Schiffsabmessungen der Basisgeometrien

## Modellversuche

Das Rolldämpfungsmoment kann auf unterschiedliche Weise bestimmt werden. Innerhalb des Verbundvorhabens wurde das Rolldämpfungsmoment für das Post-Panamax „Duisburg Test Case“ (DTC) [3] gemessen.

In der Hamburger Schiffsbau-Versuchsanstalt wurden zu Beginn des Verbundprojekts klassische Rollauschwingversuche und erregte Rollschwingversuche durchgeführt, welche als Stand der Technik angesehen werden. Diese beiden Techniken unterliegen u.a. der Einschränkung, dass das Dämpfungsmoment nur in der Rolleigenfrequenz messbar ist.

Um eine aussagekräftige Parameterstudie für Schiffsformen und deren unterschiedliche Ladefälle durchzuführen zu können, wurde eine Anlage für ge-

fürte Rollversuche in kurzer Versuchszeit in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam entwickelt und im Verbundvorhaben eingesetzt. Dabei wird das Modell um eine feste Achse gedreht und statt der Bewegung, das Moment direkt, gemessen.

Um viskose Rolldämpfungsphänomene im Detail zu bestimmen, wurde für den Windkanal der Technischen Universität Hamburg-Harburg ein Bewegungssimulator entwickelt und eingesetzt. Ein Doppelmodell des „Duisburg Test Case“ wird, ähnlich zu den geführten Rollbewegungsversuchen im Schlepptank, sinusförmig in eine Rollbewegung versetzt. Auch hier kann das Rollmoment gemessen werden. Durch den einfachen Zugang zum Messobjekt im Windkanal sind detaillierte Untersuchungen des Rolldämpfungsphänomens mittels optischer Verfahren möglich.

### 1. Rollausschwingversuche und erregte Rollschwingversuche

Beide Versuchstechniken wurden für die gleichen Randbedingungen eingesetzt [4]. Ergebnisse wurden anschließend verglichen (siehe Abb. 2).

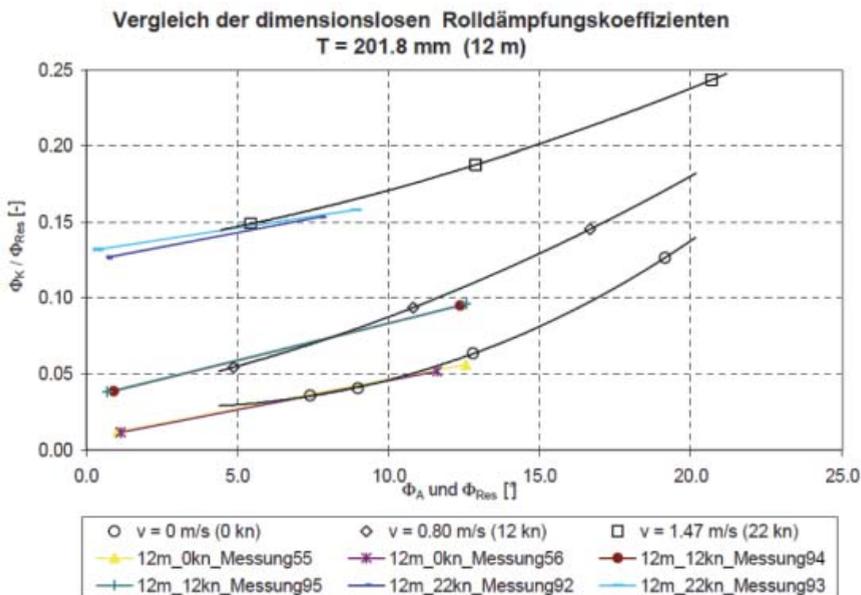


Abb. 2: Vergleich der Rolldämpfungskoeffizienten mit Rollausschwingversuchen und erregten Rollschwingungen

Bei großen Rollamplituden erzielen Rollausschwingversuche eine signifikant kleinere Rolldämpfung als bei erregten Rollschwingversuchen. Ursache dafür ist der Wirbelanteil, welcher bei Beginn des Rollausschwingversuchs nicht ausgebildet ist und durch die kontinuierliche Amplitudenabnahme eine andere Charakteristik als bei erregten Rollschwingversuchen aufweist [5, 6].

## 2. Geführte Rollbewegungsversuche

Zur Messung des Rollmoments mit einer geführten Rollbewegung wurde eine vorhandene 2-Zylinderhydraulikanlage mit einem zusätzlichen

Hydraulikzylinder bei der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam derart erweitert, dass ein Schiffsmodell zu sinusförmigen Rollschwingungen angeregt werden konnte. Bei Auswertung erster Laborserien zeigte sich allerdings, dass mit dieser Anlage keine ausreichende Genauigkeit hinsichtlich der geplanten Validierung numerischer Simulationen zu erzielen war. Deshalb erfolgte eine Neukonstruktion der Anlage auf Basis eines elektrischen Antriebs (Servomotor und Getriebe) mit direkter Kopplung zur Rollachse und unmittelbarer Messung des Rollmoments. Die durchgeführten Laborserien bei Variation von Geschwindigkeit, Rollamplitude, -frequenz und Rollachsenhöhe lieferten für die Validierung deutlich bessere Ergebnisse [7].

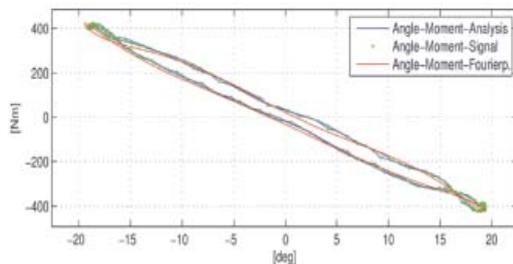
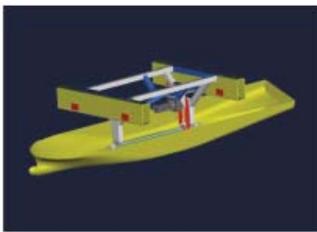


Abb. 3 und 4: Versuchsanlage der SVA Potsdam, Messung mit elektrischem Antrieb (Auftragung des Rollmoments über Rollwinkel)

## 3. Versuche im Windkanal

Druckdominierende Strömungsphänomene wie die Rolldämpfung von Schiffen können durch die Eulersche Ähnlichkeit, eine Obermenge der Froudeschen und Reynoldsschen Ähnlichkeit, auch im Windkanal mit Hilfe von Doppelmodellen untersucht werden. Die kinematische Ähnlichkeit ist damit gewährleistet.

Für den Windkanal der Technischen Universität Hamburg-Harburg wurde ein Bewegungssimulator für  $5\frac{1}{2}$ -Freiheitsgrade entwickelt (Abb. 5). Der Bewegungssimulator umrahmt die Messstrecke, so dass die volle Länge von 5,50 m für Untersuchungen zur Verfügung steht. Das Doppelmodell „Duisburg Test Case“ wird an 8 Drahtseilen periodisch um die Längsachse gedreht. Die Drahtseile sind an einem innerhalb des Modells befindlichen Längsträger befestigt. Die Messungen von Kräften und Momenten sind über Kraftmesswaagen möglich, welche die einzige Verbindung zwischen Längsträger und Rumpfhülle darstellen (Abb. 6). Die Drahtseile haben einen Durchmesser von 4 mm und können Modelle bis zu 100 kg bewegen.



Abb. 5: Bewegungssimulator mit DTC-Doppelmodell im Windkanal der Technischen Universität Hamburg-Harburg

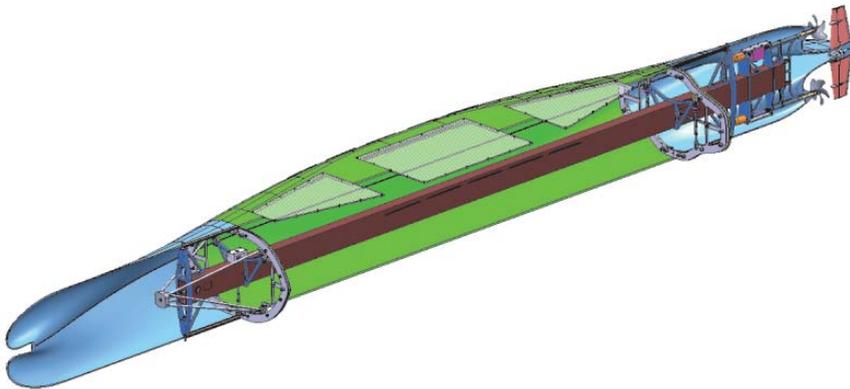


Abb. 6: Doppelmodell „Duisburg Test Case“ – Aufbau: Längsträger mit Modellhülle

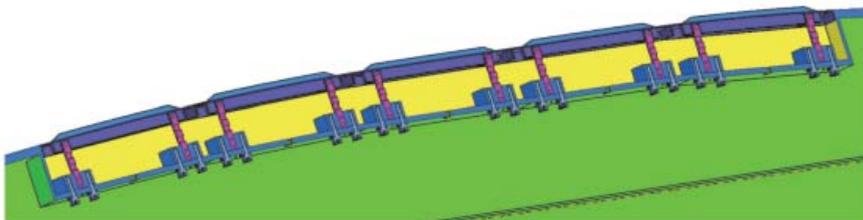
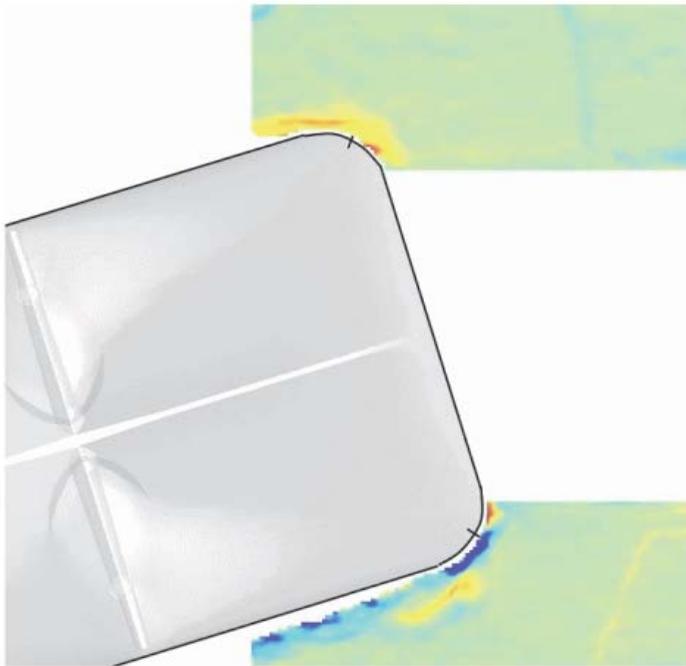


Abb. 7: Doppelmodell „Duisburg Test Case“ – Schlingerkielmesswaagen (rosa)

Die maximale Rollfrequenz beträgt 2,5 Hz. Somit können typische Rolleigenperioden für Großausführungen untersucht werden. Kräfte an Schlingerkielen werden über speziell entwickelte Schlingerkielmesswaagen erfasst (siehe Abb. 7). Es ist damit möglich, die Wirkung des Schlingerkiels auf den Schiffsrumpf zu untersuchen. Zugleich können numerische Methoden detailliert validiert werden. Das Strömungsfeld um das Modell wurde mit einem PIV-System optisch erfasst (Abb. 8).



*Abb. 8: Particle-Image-Velocimetry-Messungen um das rollende Doppelmodell DTC im Windkanal*

### **Validierung numerischer Methoden**

Zur Berechnung des Rolldämpfungsmoments werden die beiden RANSE-Löser STAR-CCM+ und OpenFOAM basierend auf der Finite Volumen-Methode verwendet. Die freie Wasseroberfläche wird mit einer Volume of Fluid-Methode modelliert. Um große Rollamplituden zu simulieren, ist das Rechengebiet in einen rotierenden Zylinder und ein unbewegliches äußeres Gebiet unterteilt (Rotor-Stator-Prinzip, siehe Abb. 9). Für die geometrische Diskretisierung wurde ein Hexaedernetz mit lokalen Verfeinerungen an der Schiffsgeometrie sowie an der freien Wasseroberfläche verwendet (siehe Abb. 10).

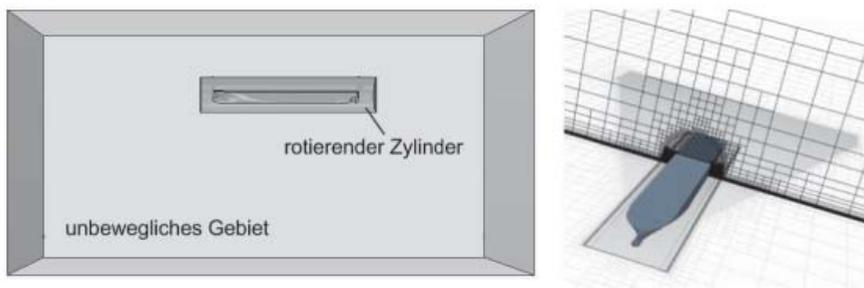


Abb. 9 und 10: Aufbau des Rechengebiets, geometrische Diskretisierung

Neben dem direkten Vergleich der Zeitverläufe von Messung und Simulation (Abb. 11) lag das Hauptaugenmerk auf einem Vergleich des äquivalenten Dämpfungskoeffizienten  $\hat{B}_{44}$  (Abb. 12):

$$\hat{B}_{44} = \frac{B_{44}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}$$

Die numerische Bestimmung der Rolldämpfung erzielt im Vergleich zu den Messungen im Schlepptank gute Ergebnisse. Die Tendenzen über Rollwinkel, Schiffsgeschwindigkeit, u. a. Parameter stimmen überein. Die Unterschiede des Rolldämpfungskoeffizienten  $\hat{B}_{44}$  lagen zwischen 4 und 25%.

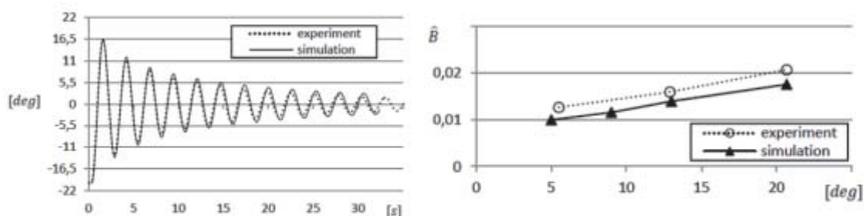


Abb. 11 und 12: Vergleich der Messungen des DTCs mit Simulationen für Rollauschwingversuche, erregte Rollschwingungen (Rolldämpfungskoeffizient)

Beim Germanischen Lloyd wurde ein Ansatz verfolgt, bei welchem das Rolldämpfungsmoment von der momentanen Rollgeschwindigkeit abhängt [9]. Das Rolldämpfungsmoment hängt bei dieser Annahme nur schwach von der Vorgeschichte der Rollbewegung ab. Rolldämpfung kann in diesem Fall aus Berechnungen für stationäres Drehen mit unterschiedlichen konstanten Rollgeschwindigkeiten in unbegrenztem Wasser definiert werden, was zu wesentlich kürzeren Simulationszeiten führt. Ergebnisse des Rolldämpfungsmoments  $\hat{B}_{44}$  im Vergleich zu instationären Rechnungen sind in Tabelle 2 für unterschiedliche Ladefälle und verschiedene Rollamplituden von  $10^\circ$  und  $20^\circ$  ( $b_{eff10}$  und  $b_{eff20}$ ) aufgeführt.

$GM, m$	Test	$b_{\text{eff}10}$	$b_{\text{eff}20}$
7.6	free roll decay	1.904E+09	2.251E+09
7.6	forced roll	2.906E+09	3.215E+09
7.6	steady rotation	2.186E+09	2.424E+09
2.95	free roll decay	1.716E+09	2.075E+09
2.95	fixed roll axis	1.920E+09	2.393E+09
2.95	fixed roll axis, fine grid	1.920E+09	2.233E+09
2.95	forced roll	1.930E+09	2.318E+09
2.95	steady rotation	2.081E+09	2.214E+09
1.1	free roll decay	1.178E+09	1.540E+09
1.1	forced roll	1.439E+09	1.983E+09
1.1	steady rotation	2.051E+09	2.154E+09

Tab. 2: Berechnete Rolldämpfungskoeffizienten

## Untersuchung moderner Schiffsgeometrien und deren Anhänge

Zur Untersuchung von modernen Schiffsgeometrien wurden für die Basisgeometrien und ihre Varianten die Einflüsse unterschiedlicher Parameter wie Rollamplitude, Rollperiode, Rollachse und Fahrtgeschwindigkeit variiert.

Um den Einfluss einzelner Anhänge zu untersuchen, wurden zusätzliche numerische Modelle entwickelt. Abbildung 13 zeigt die Umströmung zweier Schlingerkielprofile bei periodischer Bewegung. Deren Effekt auf die Rolldämpfung wurde untersucht [11].

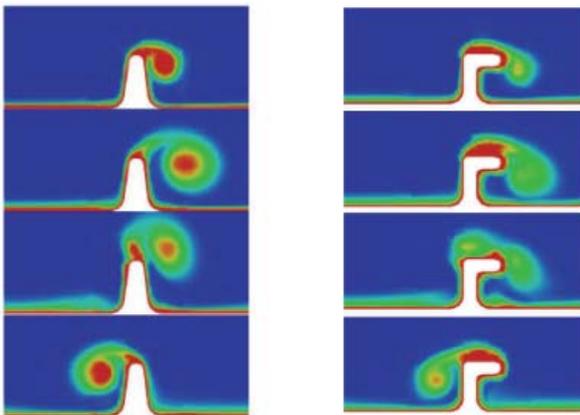


Abb. 13: Vergleich der Umströmung von zwei tiefgetauchten Schlingerkielprofilen

Durch die Verwendung eines multivariaten Regressionsmodells und eines neuronalen Netzes wurden globale Vorhersagemodelle entwickelt, mit denen Rolldämpfung von modernen Schiffsformen bereits vor der Durchführung numerischer Berechnungen oder Modellversuche abgeschätzt werden kann.

Derzeit werden die restlichen vollautomatisierten numerischen Simulationen auf den Hochleistungsrechnern der beiden Universitäten Duisburg-Essen und Hamburg-Harburg durchgeführt. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen hierfür Beispielergebnisse.

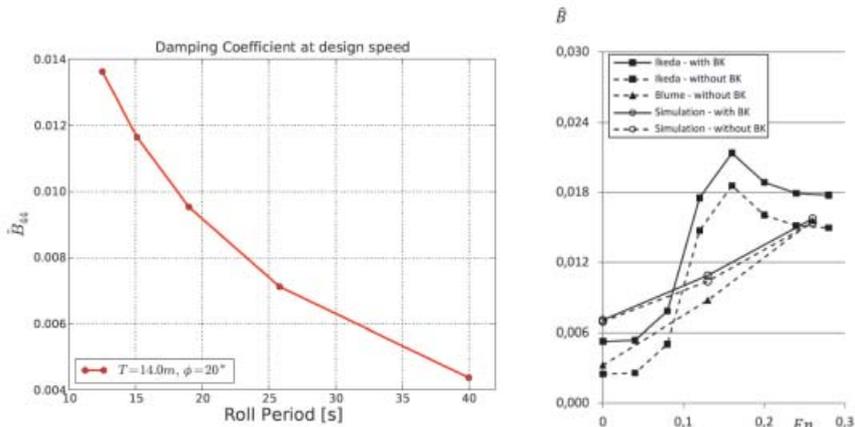


Abb. 14 und 15: Rolldämpfungskoeffizient – eines Containerschiffs über die Rollperiode, eines RoPax-Schiffes im Vergleich zu experimentellen und semi-experimentellen Methoden von Blume und Ikeda

### Zusammenfassung

Die Rolldämpfung von Schiffen wurde mit unterschiedlichen Verfahren gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass der ermittelte Dämpfungskoeffizient Unterschiede vor allem bei großen Rollamplituden aufweist.

Numerische Simulationen sind in der Lage, Rolldämpfungskoeffizienten von Schiffen zu berechnen. Etablierte empirische und semi-empirische Modelle zeigen teilweise starke Abweichungen zu den numerischen Ergebnissen, die zu unrealistischen Simulationsergebnissen der Rollbewegungen führen. Numerische Simulationen stellen somit eine Alternative zu Modellversuchen dar.

## Literatur

- [1] Blume, P., „Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung und ihre Anwendung zur Abschätzung extremer Rollwinkel“, Schiffstechnik, Bd. 26, 1979
- [2] Himeno, H., „Prediction of Ship Roll Damping – State of the Art“, University of Michigan, Technical Report, 1981 (in Englisch)
- [3] El Moctar, O., Shigunov, V., Zorn, T., „Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking“, Ship Technology Research, 2012
- [4] Schumacher, A., „Rolldämpfungsversuche mit dem Modell eines großen Containerschiffes“, HSVA Bericht S625 / 10, 2010
- [5] Handschel, S., Köllisch, N., Soproni, J.P., Abdel-Maksoud, M., „A numerical method for estimation of ship roll damping for large amplitudes“, 29th Symposium of Naval Hydrodynamics, Gothenburg, 2012 (in Englisch)
- [6] Handschel, S., Köllisch, N., Abdel-Maksoud, M., „Bestimmung der Rolldämpfungskoeffizienten moderner Schiffsförmungen“, STG-Sprechtag – Seeverhalten von Schiffen, 2012
- [7] Fröhlich, M., Habermann, S., Welzer, M., „Einsatz einer innovativen Versuchsanlage zur Messung des Rollmoments an einem zu Rollschwingungen angeregten Modell eines ULCCs“, STG-Sprechtag – Seeverhalten von Schiffen, 2012
- [8] Handschel, S., Köllisch, N., Abdel-Maksoud, M., „Roll Damping of Twin-Screw Vessels: Comparison of RANSE with Established Methods“, 11th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Athen, 2012 (in Englisch)
- [9] Shigunov, V. – Abschlussbericht – Projekt GL-RollBest
- [10] Piehl, H., Höpken, J., El Moctar, O., „Influence of shape variation on hydrodynamic damping of rigid body motion“, Proceedings of the 14th Numerical Towing Tank Symposium (NUTTS), Poole/United Kingdom 2011 (in Englisch)
- [11] Piehl, H., El Moctar, O., „Vortex Shedding from a Bilge Keel in a Transient Turbulent Flow“, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Brasil, 2012 (in Englisch)



# **POWER-VR – Prozessorientierte, wettbewerbsfähigkeitssteigernde Entwicklung eines Rahmenkonzepts schiffbaulicher VR-Anwendung**

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, Dr.-Ing. Axel Friedewald (Institut für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg-Harburg);  
Prof. Dr.-Ing. Uwe Freiherr von Lukas, Dipl.-Inf. Benjamin Mesing (Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03SX273 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## **Einleitung**

Um die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schiffbaus zu stärken und hochtechnologische Marktsegmente gegen Konkurrenten verteidigen zu können, sind sowohl Produkt- als auch Prozessinnovationen notwendig. Einen entscheidenden Beitrag dazu kann die Virtual Reality (VR)-Technik leisten, mit der neben der Produktentwicklung auch Gebrauchsverhalten und Umwelteigenschaften des Produkts frühzeitig bewertet und dem Kunden demonstriert werden können. Für einen wirtschaftlichen Einsatz dieser Technik in der maritimen Industrie müssen zum einen die Unternehmensprozesse gezielt verändert werden, zum anderen bedarf es weiterer Anpassungen der VR-Software und ergänzender IT-Werkzeuge an die Randbedingungen der Unikatproduktion.

Die angesprochenen Herausforderungen betreffen nicht nur Werften, sondern alle Beteiligten in der schiffbaulichen Wertschöpfungskette. Das Forschungskonsortium des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags geförderten Verbundprojekt POWER-VR – Prozessorientierte, wettbewerbsfähigkeitssteigernde Entwicklung eines Rahmenkonzepts schiffbaulicher VR-Anwendung – umfasste daher neben Blohm & Voss Shipyards GmbH, Flensburger Schiffbaugesellschaft mbH & Co. KG, HDW GmbH und Meyer-Werft GmbH die Zulieferunternehmen MAN Diesel & Turbo SE und Davit International GmbH, die IT-Dienstleister Marinesoft GmbH und Siemens Industry Software GmbH & Co. KG sowie die Forschungseinrichtungen Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Institut für integrierte Produktentwicklung der Universität Bremen und Fraun-

hofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung. Die Grundlage für alle Entwicklungen lieferten eingangs definierte Szenarien potenzieller VR-Untersuchungen im Lebenszyklus eines Schiffes (Abb. 1).

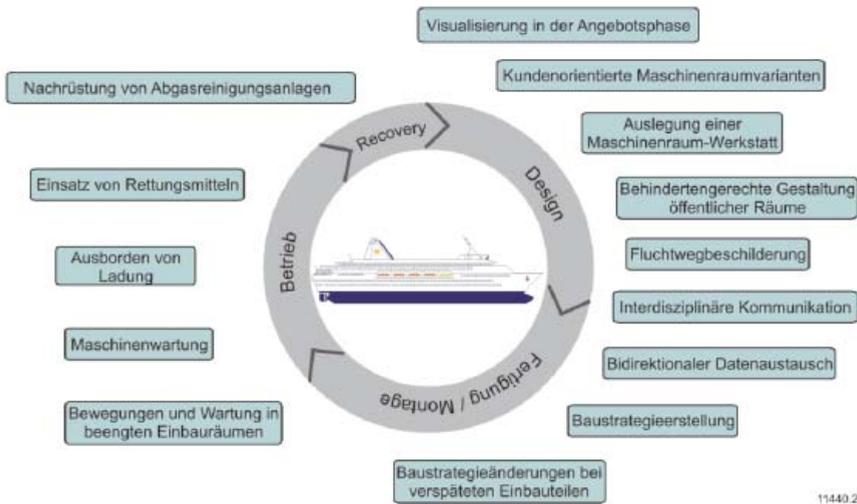


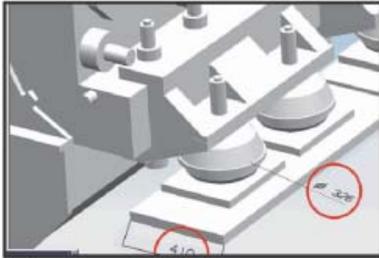
Abb. 1: Potenzielle VR-Szenarien im Lebenszyklus eines Schiffes [FR112a]

Eine effiziente VR-Untersuchung [LOE11a] ist in die vorhandenen Wertprozesse integriert. Dies beginnt bei der geeigneten Bereitstellung von Daten sowie deren Import bzw. Konvertierung von 3D-Geometrien. Notwendig sind dazu sowohl auf der Werft erzeugte Modelle als auch Daten von Zulieferern. Für die VR-Untersuchung müssen diese gegebenenfalls modifiziert und um zusätzliche (Meta-)Daten mit weiteren Informationen ergänzt werden. Die Szenenaufbereitung umfasst die Konfiguration der VR-Tools, wie beispielsweise die Adaption des immersiven Menüs an die Anforderungen bestimmter Untersuchungen oder Anwendergruppen. An die eigentliche Untersuchung schließt sich die Dokumentation an, bei der die Untersuchungsergebnisse als Screenshots, Videos oder Text für unterschiedliche Zielgruppen aufbereitet werden. In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte, im Verbundvorhaben entwickelte Lösungsansätze zur schiffbauspezifischen Unterstützung dieser Aufgaben dargestellt.

### Interoperabilität

Mit einem VR-System werden Daten visualisiert, die in 3D-CAD-Systemen erzeugt wurden. Falls keine direkte Konvertierung in das VR-Datenformat möglich ist, erfolgt der Austausch in der Regel über Verwendung eines neutralen 3D-Austauschformats. Um die Qualität der Konvertierung zu beurteilen, erarbeiteten die Projektpartner einen Kriterienkatalog und bewerteten zahlreiche Konvertierungsalternativen für die gängigsten im Schiffbau eingesetz-

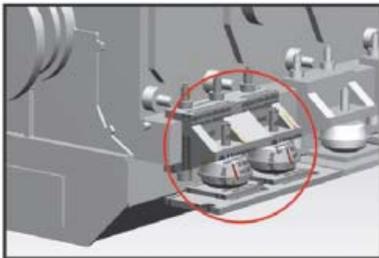
ten CAD-Systeme [LOE11b]. Dazu wurden 3D-Daten eines MAN-Motors mit bestimmten Merkmalen angereichert (Abb. 2). So wurden beispielsweise Bemaßungen und Oberflächenrauigkeiten hinzugefügt, Texturen und Farbinformationen ergänzt und teilweise auch Materialien geändert. Weiterhin wurden statische Metadaten und Product Manufacturing Information (PMI) definiert und den Bauteilen des Motors hinzugefügt. Die Ergebnisse dieses Benchmarks zeigen, dass besonders das in der Automobilindustrie weit verbreitete JT-Format eine hohe Datenqualität erzielen kann.



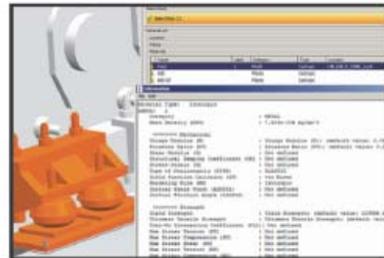
a) Bemaßungen



b) Transparenz und Oberflächengüte



c) Texturierung



d) Farbe und Metainformationen

12138.1

Abb. 2: Beispielszenario für Datenzugriffskonzepte [LOE11b]

Um nicht nur korrekte, sondern auch „leichte“ Modelle eines Zulieferers zu erhalten, wurde darüber hinaus am Beispiel des Motors ein methodisches Vorgehen zur Modellerstellung erarbeitet. Dies umfasst sowohl die notwendigen statischen Metadaten, also Anschlussinformationen und Gewichte, als auch für Planungsaufgaben bedeutende Metainformationen, wie beispielsweise alle Termininformationen für die Fertigungs- und Montageplanung. Letztere können z.B. aus den betrieblichen ERP- oder PDM-System ausgelesen werden.

Sind die Untersuchungsschwerpunkte für eine VR-Session identifiziert, müssen die Daten anwendergerecht aufbereitet werden. Ein wichtiges Hilfsmittel hierfür ist ein Framework für das Authoring der DV-Kette auf Basis der quell-offenen EclipseRCP/OSGi-Technologie. Das Framework kann problemlos um weitere Komponenten erweitert werden. Eine grafische Oberfläche er-

möglichst es den Endanwendern, die Datenaufbereitungskette visuell zu erstellen (Abb. 3). Dies trägt maßgeblich zur Effizienzsteigerung bei und erlaubt es auch weniger erfahrenen Anwendern, die Aufgabe der Datenkonvertierung in einfacher Weise durchzuführen.

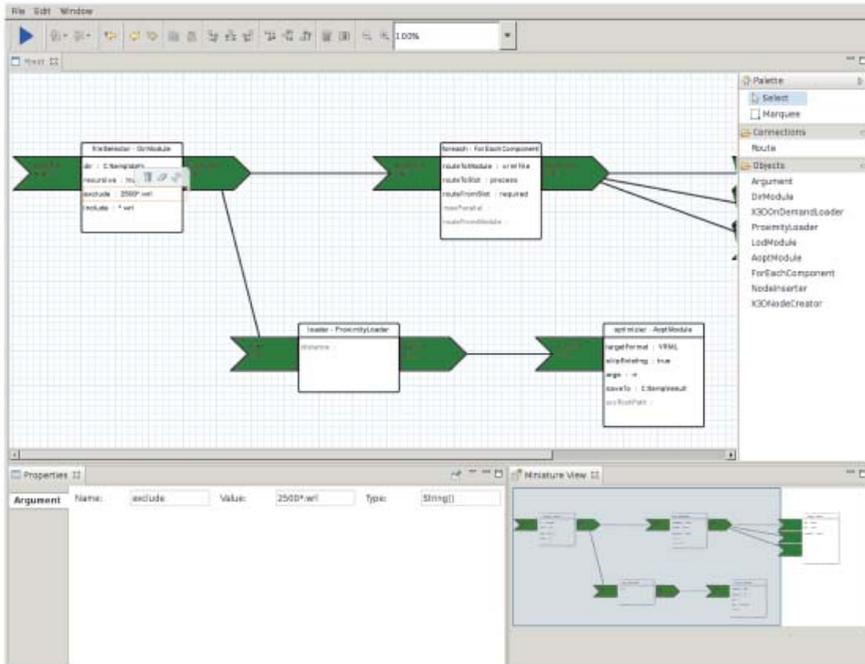


Abb. 3: Authoring-Editor für die Datenaufbereitungskette [FRI12a]

## Prozessübergreifende Werkzeuge

Darüber hinaus untersuchte das Forschungsprojekt Ansätze, die VR-Untersuchungen selbst zu verbessern und zu vereinfachen. Während im Projekt USE-VR [LUK09], [NED09] dazu einzelne Aspekte wie die Adaption der Benutzungsoberfläche an die Untersuchungsaufgabe entwickelt wurden, standen hier die Verbesserung der Ergebnisse durch Anbindung externer Simulatoren, die verbesserte Nutzbarkeit von Menschmodellen für ergonomische Analysen und eine vereinfachte Sessionsteuerung im Vordergrund.

Unternehmen können das Potenzial von VR zur Unterstützung des schiffbaulichen Produktionsprozesses umso besser nutzen, je realistischer und umsetzungsnäher die Darstellung der Ergebnisse ist. Dazu reichen in vielen Fällen die Standardwerkzeuge aus. Für einige Untersuchungen, insbesondere für Transport- und Montagevisualisierungen bei beengten Raumverhältnissen, ist es jedoch erforderlich, das korrekte physikalische Verhalten in der virtuellen Umgebung darzustellen (Abb. 4). Dazu wurde eine frei verfügbare

Physik-Engine für die Abb. unterschiedlicher physikalischer Effekte über eine im Projekt entwickelte Middleware an die VR-Software gekoppelt. Für die VR-Untersuchung lädt der Anwender ein aufbereitetes Geometriemodell in die Physik-Engine. Diese übergibt die berechneten Effekte zur Laufzeit an die VR-Software. Ein typisches Szenario ist die Darstellung von Kranbewegungen (mit Komponenten wie Kranhaken, Laufkatze und Quertraverse) mit schweren Lasten. Darüber hinaus wurden auch Lösungen zur Anbindung von nicht echtzeitfähigen Simulatoren entwickelt, die über das angesprochene Authoring-System adaptiert werden können.

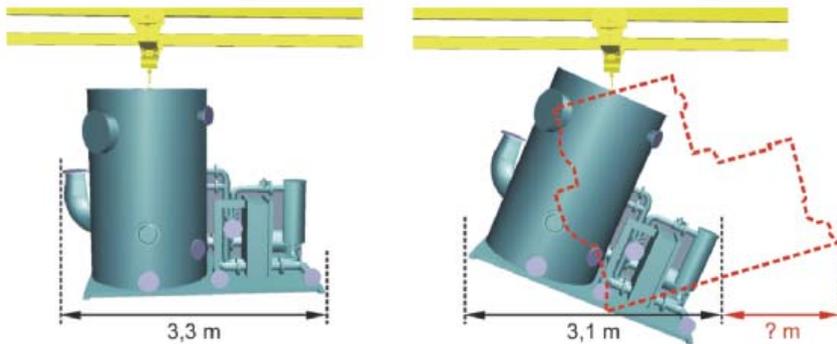


Abb. 4: Auswirkung von Physikeffekten auf die VR-Szene [LOE12]

Auch aufgrund des demographischen Wandels werden die Anforderungen an die Ergonomie zunehmen, so dass die Bedeutung der virtuellen Absicherung mit Hilfe von Menschmodellen im Schiffbau in Zukunft steigen wird. Bislang erfordert die Komplexität und Vielzahl an Einstellmöglichkeiten einer ergonomischen Absicherung jedoch einen VR-Experten für die Untersuchungen. Das im Forschungsprojekt weiterentwickelte ViP-Toolset ermöglicht es nun auch Benutzern ohne VR-Expertenwissen, eine solche Absicherung durchzuführen. Ein Ergonomieassistent begleitet den Anwender durch den Prozess und unterstützt ihn während der Untersuchung sowohl am Desktop als auch in der immersiven Umgebung. So wurde insbesondere das Positionieren des virtuellen Menschmodells mit einem dreistufigen Vorgehen – Grobpositionierung, vorkonfigurierte Haltung, Feinpositionierung – erleichtert; dies war bisher einer der aufwändigsten Schritte bei Ergonomieuntersuchungen an einem großen Objekt wie einem Schiff. Für Kraftanalysen werden nun aus Ergonomie-Datenbanken maximal zulässige Werte für statische und dynamische Analysen bereitgestellt. Die statische Analyse überprüft, ob die Person die vorgegebene Kraft in der jeweiligen Haltung aufbringen kann. Die dynamische Analyse sichert die gesamte Bewegung ab, die benötigt wird, um z. B. einen Hebel umzulegen. Die Ergebnisse werden sowohl während der Untersuchung angezeigt als auch für spätere Auswertungen dokumentiert (Abb. 5).



Abb. 5: Auswertung einer Kraftuntersuchung [FRI12b]

Zusätzlich wurde auch das Menschmodell RAMSIS am Beispiel von instant-reality [FEL09] in eine VR-Umgebung integriert. Das Hauptaugenmerk lag dort auf einer möglichst effizienten Durchführung von Ergonomie-Untersuchungen (Sichtkegel, Erreichbarkeitsräume, Komfort- und Kraftanalysen). Dabei wurde der Ansatz verfolgt, die Position und Pose des Benutzers optisch aufzunehmen und in Echtzeit auf das Menschmodell in der virtuellen Welt zu übertragen. Dies führte zu einer deutlichen Steigerung der Benutzerfreundlichkeit im Vergleich zu der sonst erforderlichen manuellen Eingabe von Position und Körperhaltung. Die Interaktionen zur Auswahl der Anwendungsfälle oder zur Einstellung der Parameter für die jeweiligen Untersuchungen erfolgen auch hier über das Touch-Display eines mobilen Gerätes.

Einen weiteren prozessunabhängigen Entwicklungsschwerpunkt bildete die vereinfachte Steuerung der VR-Session. Marktgängige VR-Systeme sind von komplexen, hierarchischen Menüs in der immersiven Umgebung geprägt. Die Ergebnisse des POWER-VR-Projekts vereinfachen die Bedienung zum einen durch kontextspezifische Menüs, die die Funktionen anwender- und aufgabenspezifisch bereitstellen (Abb. 7). Zum anderen wurde ein Tablet-Computer als portables Eingabegerät an die VR-Software angebunden, der neue Möglichkeiten für die immersive Arbeitsweise eröffnet. Der Tablet-Computer zeigt neben Befehlen auch zusätzliche erläuternde Informationen an, die der Anwender in der jeweiligen Situation benötigt. Diese können in der immersiven Umgebung sonst nur schwer dargestellt werden. Neben



*Abb. 6: Kopplung des Menschmodells RAMSIS mit einer optischen Posenerkennung in der VR-Umgebung instantreality.*

Tablet-Computern wurde auch die Steuerung über einen Multi-Touch-Tisch umgesetzt. Dieser dient in einem VR-Arbeitsraum als Steuerungsplatz. Für die Navigation wurde die Anzeige von 2D-Decksplänen zur Auswahl der 3D-Position auf den verschiedenen Touch-Geräten umgesetzt. Es hat sich gezeigt, dass die Eingabe über Tablet-Computer und Multi-Touch-Tisch insbesondere für Systemsteuerungs- und Navigationsaufgaben (z. B. Grobpositionierung) besonders geeignet ist.

Die bisherige Flystick-Bedienung ist nicht intuitiv und eignet sich daher nicht zum simultanen Einsatz neben dem Tablet-PC. Daher wurde zusätzlich eine Steuerung der Software über Armgesten entwickelt. Die Gesten werden von einem Kinect-Sensor erfasst und über die Middleware an die VR-Software übergeben. Alternativ lässt sich der Sensor zum Bodytracking einsetzen, was anders als beim klassischen markerbasierten Tracking keine Kalibrierung

erfordert. Dies reduziert den Vorbereitungsaufwand erheblich. Das System beschränkt sich bisher auf das Steuern großer Körperteile wie Rumpf, Beine und Arme, was für die meisten Anwendungen im maritimen Umfeld ausreichend ist.

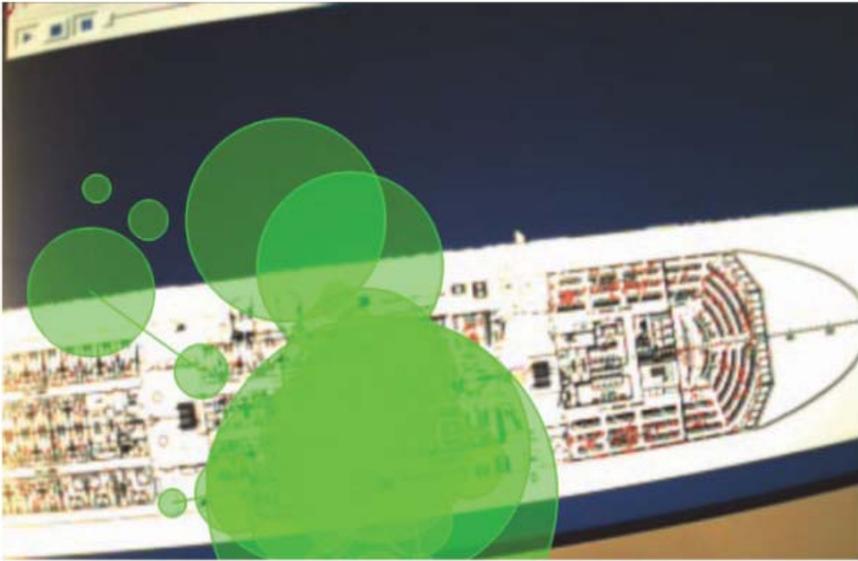


12113

Abb. 7: Tabletsteuerung von Absicherungsaufträgen [FRI12c]

Daneben erlangt die Nutzung des Produktmodells im gesamten Lebenszyklus eine zunehmende Bedeutung. Eine Visualisierung muss hier insbesondere auch für Nutzer möglich werden, die nicht mit den komplexen Produktstrukturen vertraut sind, aber häufig vor Ort mit mobilen Geräten auf 3D-Modelle zugreifen möchten. Dazu wurde ein prototypischer Viewer entwickelt, der die im JT-Format verfügbaren Detaillierungsstufen für eine an die Leistung des Endgerätes angepasste Visualisierung nutzt und damit eine flexible Navigation im Modell ermöglicht. Zudem wurde untersucht, wie die JT-Spezifikation um erweiterte Metadaten ergänzt werden kann, um beispielsweise Rückmeldungen verbauter Komponenten auswerten und visualisieren zu können.

Die entwickelten Lösungen wurden in einer Evaluierung auch auf ihre Gebrauchstauglichkeit untersucht. Dazu wurde das Analyse-Werkzeug Real-Eyes [SCH07] um die Funktion der verteilten Aufzeichnung und Wiedergabe erweitert. Dies ermöglicht es festzustellen, wohin der Benutzer besonders häufig oder lange sieht. Untersuchungen mit der Software zeigten, dass die Anwender mit der im Verbundprojekt adaptierten Multitouch-Steuerung eine Evakuierungssimulation deutlich einfacher bedienen konnten als mit der konventionellen Flystick-Steuerung (Abb. 8).



*Abb. 8: Darstellung der Betrachtungsdaten des Nutzers [FRI12a]*

### **Werkzeuge zur Unterstützung der Design-Phase**

Für den Designprozess wurden zum einen High-End-Visualisierungen erzeugt, die sich insbesondere für die frühzeitige Einbindung des Kunden eignen (Abb. 9). Zum andern wurden Simulationsmodelle an VR-Software angebunden, um z. B. Wellensimulationen oder Rettungsmittelauslegungen [MES12] (Abb. 10) zu betrachten. Dazu wurden neben marktgängiger VR-Software auch Game-Engines untersucht, die für realitätsnahe Videospiele eingesetzt werden. Für die Evaluierung der parametrisierten Simulationsmodelle wurden auch Mixed-Reality (MR)-Technologien erprobt, beispielsweise für die Überlagerung von Videos mit der Darstellung der simulierten Bewegung der Anlage mit Hilfe des MR-Frameworks *instantreality*.



## Werkzeuge zur Verbesserung der Schiffsicherheit

Insbesondere für Passagierschiffe ist Sicherheit ein Schlüsselkriterium beim Schiffsdesign und -betrieb. Simulationsanwendungen werden schon heute standardmäßig für den Nachweis der Konformität mit IMO Regeln eingesetzt. Solche Werkzeuge, wie beispielsweise das von TraffGo und dem Germanischen Lloyd entwickelte AENEAS, basieren im Normalfall auf 2D-Decksplänen, in denen die Personenbewegung in einer darunterliegenden Zellstruktur simuliert wird.

Um die Simulationsergebnisse besser bewerten zu können, wurden diese mit den Konstruktionsdaten des Schiffes kombiniert und in einer VR-Umgebung dargestellt. Durch die Kombination von 2D-Simulationsdaten mit 3D-Daten des Schiffes können zusätzliche Erkenntnisse bezüglich kritischer Punkte wie Treppen und anderen Engstellen gewonnen werden. Dies erlaubt deren Optimierung schon früh in der Designphase, wo Änderungen noch mit geringem Kosteneinsatz erreicht werden können. Beim Review der Simulation kann die auswertende Person frei navigieren oder das Schiff aus der Perspektive eines Passagiers erkunden. Zudem ist die Veränderung einfacher Umweltparameter wie Rauch und Licht möglich (Abb. 11). Dies bietet die Möglichkeit, problematische Stellen insbesondere in Hinblick auf Gänge und Treppen zu erkennen sowie die Auslegung der Fluchtwegsbeschilderung zu überprüfen. All dies bietet wichtige Informationen für die Werft, wodurch Design-Verbesserungen, Sicherheitsverbesserungen sowie Kostenreduktion erreicht werden können.



Abb. 11: Darstellung von Passagieren und Konstruktionsdaten in VR bei verschiedenen Beleuchtungssituationen [MES11]

## Werkzeuge zur Unterstützung der Fertigungs- und Montageplanung

Die Komplexität der Produkte, insbesondere von Kreuzfahrt- und Marineschiffen, stellt die Werften immer wieder vor planerische Herausforderungen. VR eignet sich besonders dazu, montagerelevante Prozesse und Auf-

gabenstellungen räumlich zu visualisieren. Insbesondere bei einer intuitiven Bedienung kann VR die Planung derartiger Prozesse wirksam unterstützen. Um Untersuchungen einfach und schnell durchführen zu können, wurden im Projekt Hilfsmittel entwickelt, die sowohl die Festlegung von Montagereihenfolgen als auch die Umplanung vereinfachen, die z.B. wegen einer verspäteten Zulieferung größerer Komponenten erforderlich werden. So wurde ein Filtermechanismus entwickelt, der durch die Auswertung von dynamischen Metadaten aus dem PDM- oder ERP-System die Visualisierung einer spezifischen Montagesituation erlaubt. Eine Tabletsteuerung ermöglicht es, während der VR-Session Komponenten nach flexiblen Kriterien auszuwählen und darzustellen. So können z. B. alle zu einem bestimmten Zeitpunkt verbauten Komponenten einer Sektion angezeigt werden. Ergeben sich Probleme wegen der Verspätung von Komponenten, lässt sich ein alternativer Montagepfad in der Session ermitteln und mit sog. Constraints dokumentieren. Diese Constraints können auch von einer Termin- und Kapazitätssimulation genutzt werden (Abb. 12).

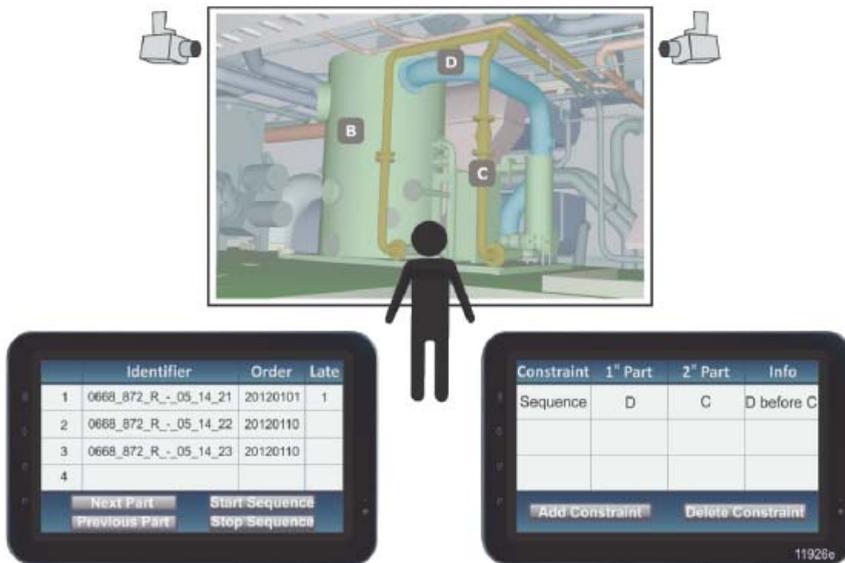


Abb. 12: Immersive Erzeugung von Constraints [LOE11c]

## Werkzeuge zur Unterstützung von Wartungsprozessen

Ein wichtiges Ziel des Forschungsprojektes war die Unterstützung von Wartungsprozessen. Die bisherige Lösung bei MAN basiert auf Arbeitskarten und Zeichnungen für jeden Wartungsprozess. Aus diesen Karten muss der Werker erkennen, welche Arbeitsschritte er wo durchzuführen hat. Das ist nicht immer intuitiv und führt leicht zu Fehlern, weshalb eine bessere Visualisierung der Prozesse erreicht werden sollte. Im Rahmen des Projektes wurden

anhand eines identischen Beispiels die Alternativen 3D-PDF-Dateien zur Visualisierung, VR zur Visualisierung und Überprüfung sowie ein interaktives Präsentationssystem zur Erzeugung von Wartungsdokumentation verglichen und die spezifischen Vor- und Nachteile bewertet. 3D-PDF bietet den Vorteil, mit Standard-Software, die in der Regel auf jedem Rechner kostenfrei verfügbar ist, nutzbar zu sein. Das interaktive Wartungssystem, welches in einem Browser lauffähig ist, ermöglicht ein einfaches Erstellen und Verändern von Arbeitsschritt-Animationen, z.B. Eindrehen einer Schraube, und ist dadurch besonders für die Qualifikation von Mitarbeitern geeignet (Abb. 13). Die VR-Lösung bietet viele Analysemöglichkeiten und ist damit auch für eine Planung von Wartungsprozessen prädestiniert.

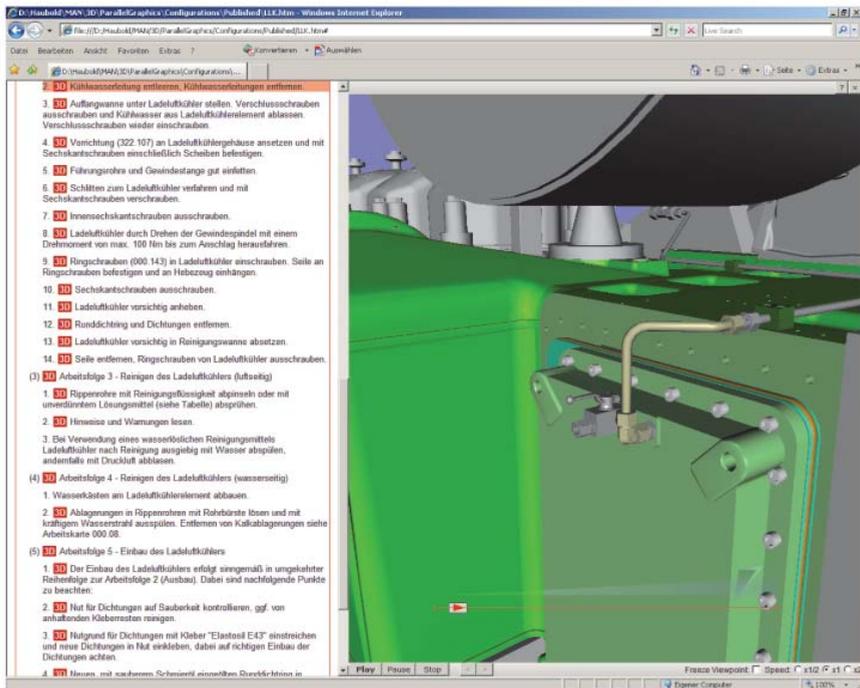


Abb. 13: Beispiel für eine interaktive Wartungsdokumentation [FRI12a]

## Werkzeuge zur Unterstützung beim Retrofit

Zur Unterstützung der zunehmend erforderlichen Retrofit-Maßnahmen wurden zwei Ansätze umgesetzt. Zur Unterstützung der Konstruktion können zunächst kommerzielle Lösungen zur Rekonstruktion eines 3D-Modells aus Fotos genutzt werden. Für das 3D-Modell wurden automatische Segmentierungsalgorithmen umgesetzt, die das 3D-Modell in strukturelle Bausteine zerlegen (bspw. Rettungsboot und Davit trennen).

Für den Bereich des Marketings wurde eine Mixed Reality Lösung umgesetzt, mit der 3D-Modelle der einzubauenden Komponenten im Kontext des umzubauenden Schiffes visualisiert werden können. Auf diese Weise können schnell verschiedenste Varianten visualisiert werden (Abb. 14).



*Abb. 14: Originalansicht des umzurüstenden Schiffes (links oben), 3D-Modell des einzubauenden Davits (links unten), überlagerte Mixed-Reality-Darstellung (rechts)*

## **Zusammenfassung**

Das Verbundvorhaben POWER-VR hatte zum Ziel, VR-gestützte Untersuchungen stärker in die schiffbaulichen Produktentstehungsprozesse zu integrieren. Nachdem im Forschungsprojekt USE-VR der Nutzen von Virtual Reality für den Schiffbau nachgewiesen werden konnte, sollten weitere Vorgehensweisen und Werkzeuge entwickelt werden, um die Spezifika der schiffbaulichen Unikatproduktion noch besser berücksichtigen zu können. Führende Unternehmen der Werftindustrie sowie Zulieferer und IT-Dienstleister wirkten mit, um relevante Szenarien zu definieren und diese zusammen mit den beteiligten Forschungseinrichtungen in Demonstratoren umzusetzen.

Ein besonderer Fokus lag zunächst auf der Interoperabilität, um einerseits ein handhabbares Datennutzungskonzept zu entwickeln sowie andererseits eine nahtlose Prozessintegration zu gewährleisten. Ein weiteres Ziel war es, den Anwendungsaufwand für VR zu reduzieren. Die aufwandsarme Nutzung von VR für Fragestellungen im Produktentstehungsprozess wurde im Rahmen dieses Projektes ausgiebig betrachtet.

Die exemplarische Umsetzung von schiffbaulichen VR-Engineering-Werkzeugen zeigte das große Potenzial von VR und schuf Akzeptanz für seinen

Einsatz. Die Validierung anhand integrierter Szenarien, die sowohl prozessübergreifende als auch prozessspezifische Erweiterungen beinhalten, demonstriert im besonderen Maße die Einsatzmöglichkeiten in der maritimen Industrie. Daher leistet das Projekt aus Sicht aller Beteiligten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schiffbaus.

## Literatur

- [FEL09] Fellner, D.; Behr, J.; Bockholt, U.: *instantreality – A Framework for Industrial Augmented and Virtual Reality Applications*. In 2nd Sino-German Workshop Virtual Reality & Augmented Reality in Industry, Proceedings 2009, S. 78-83.
- [FRI12a] Friedewald, A.; Lödding, H.; Lukas, U. v.; Mesing, B. (Hrsg.): *Einsatz und Entwicklung innovativer VR-Technologien im Schiffbau - Ergebnisse des Verbundvorhabens POWER-VR*, TuTech-Verlag, Hamburg 2012
- [FRI12b] Friedewald, A.; Lödding, H.; Titov, F.: *Ergonomie-Absicherung in Virtual Reality mit dem ViP-Toolset*. In Lukas, U. v. et al. (Hrsg.): *Computergraphik für die Praxis*, Rostock, 2012.
- [FRI12c] Friedewald, A.; Heinig, M.; Schäfer, Chr.; Lödding, H.: *Produktivitätssteigerung von virtuellen Absicherungsaufträgen*. In: Schenk, M. (Hrsg.) 15. IFF-Wissenschaftstage: *Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme*, Tagungsband, Magdeburg 2012, S. 277-283.
- [LOE11a] Lödding, H.; Friedewald, A.; Heinig, M.; Schleusener, S.: *Virtual Reality supported Assembly Planning in the Shipbuilding Industry*. In: Bertram, V. (Hrsg.): *10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT 2011)*, Berlin 2011, S. 253-263.
- [LOE11b] Lödding, H.; Friedewald, A.; von Lukas, U.; Mesing, B.; Roth, M.; Schleusener, S.; Titov, F.: *Prozessübergreifender Datenaustausch im Schiffbau - Mehr Qualität im Schiffbau Engineering*. In: *Digital Engineering Magazin (08)*, 2011, S. 34–35.
- [LOE11c] Lödding, H.; Friedewald, A.; Heinig, M.: *Improving Assembly Planning Simulation with the Use of Virtual Reality in the Maritime Industry*. In: RINA (Hrsg.): *15th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2011)*, Papers Volume I, Triest, 2011, S. 157-163.
- [LOE12] Lödding, H.; Friedewald, A.; Schleusener, S.: *Coupling Virtual Reality and Physics Engines for Ships*. In: Bertram, V. (Hrsg.): *11th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT 2012)*, Liège 2012, S. 172-180.

- [LUK09] von Lukas, U.; Mesing, B.; Vahl, M.: Schiffbau-Engineering mit Virtual Reality – Adaption an die Unikat-Produktion, Abschlussbericht Fkz. 03SX233C, Rostock, 2009.
- [MES11] Mesing, B.; Kluwe, F.; von Lukas, U. (2011): Evaluating Evacuation Simulation Results in a Virtual Reality Environment. In: Volker Bertram (Hg.): 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '11). Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg, S. 326–334.
- [MES12] Mesing, Benjamin; König, Christian R.; von Lukas, Uwe; Tietjen, Thorsten; Vinke, Andree (2012): Virtual Prototyping of Davits with Parameterized Simulation Models and Virtual Reality. In: Volker Bertram (Hg.): 11th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '12). Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg, S. 336–343.
- [NED09] Nedeß, C.; Friedewald, A.; Neumann, L.; Schäfer, C.; Schleuse-ner, S.: Schiffbau-Engineering mit Virtual Reality – Adaption an die Unikat-Produktion, Teilvorhaben „Produktionsorientiertes VR-Engineering“, Abschlussbericht Fkz. 03SX233B, Hamburg, 2009.
- [SCH07] Schultz, R; Peter, C.;Blech, M.; Voskamp, J.; Urban, B.: Towards Detecting Cognitive Load and Emotions in Usability Studies Using the RealEYES Framework. HCI (10) 2007: S. 412-421.

# ShipLES – Berechnung der instationären turbulenten Schiffsumströmung mit LES-basierten Verfahren

Prof. Dr.-Ing. Nikolai Kornev, Dr.-Ing. Andrey Taranov, Dr. rer. nat. Evgeny Shchukin (Universität Rostock); Dipl.-Ing. Karsten Rieck, Dipl.-Ing. Pascal Anschau (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH); Dr.-Ing. Dirk Jürgens, Dipl.-Ing. Michael Palm, Dipl.-Math. Julia Springer (Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG)

## Einleitung

Für numerische Strömungssimulationen stehen dem Entwurfsingenieur leistungsfähige Computerprogramme zur Verfügung, die jedes viskose Strömungsproblem auf die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zurückführen. In der industriellen Anwendung treten jedoch häufig komplexe Strömungsvorgänge auf, die durch Wechselwirkungen unterschiedlicher Teilsysteme gekennzeichnet sind. In der Schiffshydrodynamik ist dies dort der Fall, wo sich Schiffskörper und Propulsor in großem Maße gegenseitig beeinflussen. So bestimmt einerseits die Umströmung des Schiffes das Arbeitsumfeld des Propulsors. Andererseits wirken die durch den Propulsor induzierten Geschwindigkeiten auf das Strömungsfeld um das Schiff zurück.

Die auftretenden Strömungsvorgänge sind durch eine hohe Dynamik und Instationarität gekennzeichnet (Turbulenzen). In den kommerziell verfügbaren CFD-Programmen werden für deren Simulationen RANSE-Verfahren (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) eingesetzt. Diese Lösungsverfahren erfassen jedoch nicht die hochgradig instationäre Strömungscharakteristik im Hinterschiffsbereich, so dass der Berechnung einer realitätsnahen zeitaufgelösten Zuströmung des Propulsors am Schiff Grenzen gesetzt sind. Für den Schiffskörper und den Propulsor charakteristische Wechselwirkungen, induziert durch instationäre Effekte, werden nur ansatzweise und damit unzureichend numerisch abgebildet. Die genaue Erfassung der Instationaritäten bietet Potential zur Verbesserung des Propulsorentwurfes und zur Verminderung der Kavitations- und Vibrationsanfälligkeit.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde auf Basis von LES (Large Eddy Simulation) eine praxisreife Anwendung entwickelt, die die o.a. Defizite überwindet.

## Ziel und Struktur des Vorhabens ShipLES

Die Entwicklung einer praxisreifen numerischen Methode zur Modellierung der instationären wirbelbehafteten Schiffsumströmung bei großen Reynolds-

zahlen unter Einsatz von LES-Verfahren und auf Basis des Codes Open-FOAM, deren Verifizierung durch Berechnungen und stereometrische Strömungsvisualisierung an Testgeometrien und die Einführung in schiffbauliche Anwendungen waren die Ziele des Forschungsvorhabens ShipLES.

Das Forschungsvorhaben ShipLES war ein Verbundvorhaben von 3 Partnern, der Universität Rostock, Lehrstuhl für Modellierung und Simulation (LeMoS), der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH (SVA) und der Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG (Voith). Die Kompetenz zur Entwicklung und grundlegenden Validierung des numerischen Modells lag in den Händen des LeMoS. Der SVA oblagen im Projekt experimentelle und numerische Untersuchungen an Testgeometrien und schiffbaulich spezifische Berechnungen. Voith steht im Projekt für eine zügige Umsetzung der Verfahren zur Nutzung in der Produktentwicklung.

### Entwicklung der hybriden Methode

Die bekannteste hybride Methode, DES (Detached Eddy Simulation), transformiert abhängig vom Wandabstand die URANS-Gleichungen (Unsteady RANS) in LES-Gleichungen und kann damit turbulente Strukturen erfassen, ist dabei aber stark vom Wandabstand und der Gitterstruktur abhängig und für hohe Reynoldszahlen immer noch sehr rechenintensiv. Im Unterschied dazu wird im hier entwickelten hybriden Modell, abhängig von der relativen Auflösung des Rechengebietes, zwischen URANS- und LES-Formulierungen der Transportgleichungen umgeschaltet, wobei für die Berechnung der turbulenten Viskosität eine Übergangsfunktion verwendet wird.

Das neue hybride Modell basiert auf der Feststellung, dass die grundlegenden Transportgleichungen in LES und URANS die gleiche Form haben, aber unterschiedlich interpretiert werden:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \overline{p}^*}{\partial x_i} + \frac{\partial (\overline{\tau}_{ij}^l + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j}$$

Der Überstrich meint in LES eine räumliche Filterung, in URANS kennzeichnet er die Reynoldssche Mittelung. Dabei werden die laminaren und turbulenten Spannungen  $\tau_{ij}^l$  und  $\tau_{ij}^t$  unterschiedlich berechnet. Die Bestimmung der Bereiche für LES bzw. URANS wird dynamisch zu jedem Zeitschritt und für jede Zelle anhand der relativen Auflösung des Gitters bestimmt. Die relative Auflösung ist dabei definiert durch das Verhältnis von integralem Längenmaß  $L$  zur Zellenweite  $\Delta$ . Falls das turbulente integrale Längenmaß  $L$  in einer Zelle größer als die Zellenweite ist, können die turbulenten Strukturen aufgelöst werden, und es wird die Formulierung der Transport-Gleichungen für

LES verwendet; anderenfalls kommt die URANS-Formulierung zum Einsatz [1] (siehe Abb. 1):

$$L > \Delta \rightarrow LES$$

$$L < \Delta \rightarrow URANS$$

Für die Berechnung der turbulenten Viskosität wird zwischen beiden Zonen ein sanfter Übergang durch die folgende Interpolation implementiert:

$$\nu(x) = \frac{\nu_t - \nu_{SGS}}{\pi} \arctan\left(\frac{10x}{x_2 - x_1} - 5\frac{x_2 + x_1}{x_2 - x_1}\right) + \frac{1}{2}(\nu_t + \nu_{SGS})$$

Mit der Entwicklung der hybriden Methode ist ein Beitrag zur Erhöhung der Genauigkeit der numerischen Modellierung der Schiffshydrodynamik erzielt worden. Das erhöht die Vorhersagesicherheit der Wechselwirkung zwischen Schiff und Propeller, der Vibration und der Kavitation des Propellers hinter dem Schiff wesentlich.

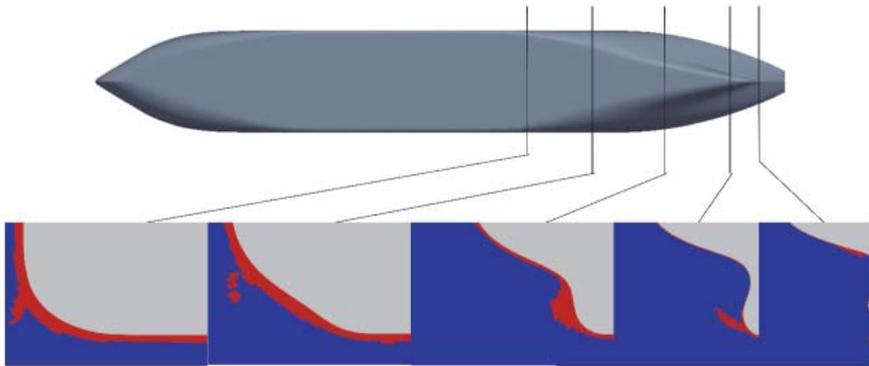


Abb. 1: Dynamisch ermittelte Rechengebiete für LES- bzw. URANS-Simulation (rot: URANS; blau: LES)

## Experimentelle und numerische Untersuchungen an Testkörpern

Bereits die auch in der Literatur [2] - [5] immer wieder untersuchten LES-Testfälle des umströmten Zylinders und Quaders zeigen den hauptsächlichen Mangel von URANS-Simulationen auf, der der schiffbaulichen Simulation immer wieder Grenzen setzt: hochgradig instationäre Effekte – vor allem im Nachstrom – werden nicht erfasst. Im Vergleich zweier momentaner Geschwindigkeitsfelder aus LES- bzw. URANS-Simulation um einen schräg angeströmten 3-dimensionalen Quader (siehe Abb. 2) ist die turbulente Natur der Strömung in der LES-Simulation deutlich zu erkennen. Die zeitabhängigen Kraftschwankungen am Quader werden in der LES-Simulation deutlich naturnäher simuliert und würden im Vergleich zur URANS-Simulation zu signifikanten Unterschieden z.B. in der Auslegung einer Struktur führen.

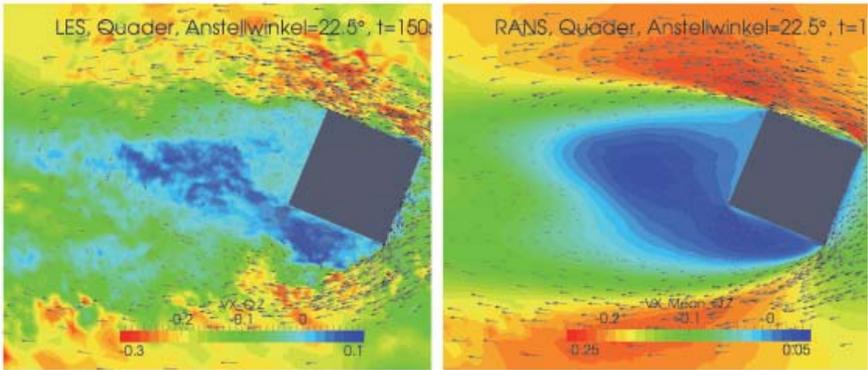


Abb. 2: Momentanes Geschwindigkeitsfeld der Simulation eines Quaders in schräger Anströmung, links: LES; rechts: URANS

Die in diesem Projekt durchgeführten stereoskopischen PIV-Messungen an einen Quader und einem Zylinder in freier Anströmung dienten vor allem der Plausibilisierung der durchgeführten LES-Simulationen, aus denen statistische Daten der Turbulenz erzeugt wurden. Abb. 3 zeigt die Versuchsdurchführung der PIV-Messungen, bei denen gegenüber dem eigentlichen Messobjekt ein zweiter Körper angebracht wurde, um ein größtmögliches Maß an Symmetrie bezüglich der Mittelebene des Schwertes zu erreichen.



Abb. 3: Stereoskopische PIV-Messung des Geschwindigkeitsfeldes um einen Quader, das eigentliche – geschwärzte – Messobjekt liegt im Bild links vom Schwert

In den korrespondierenden LES-Simulationen wurde an dieser Stelle eine Symmetrie-Randbedingung verwendet. Die Grenzschichtprofile, die in Abb. 4 auszugsweise gezeigt werden (an der Oberseite des gerade angeströmten Quaders im Abstand von 10 mm aus PIV- und LES-Daten extrahiert) zeigen, dass die LES-Simulationen die physikalische Realität insbesondere im Bereich der Scherschicht sehr gut wiedergeben.

Die statistische Auswertung der simulierten Strömung erfolgte mittels der Energiespektren der in diskreten Punkten aufgezeichneten Geschwindigkeitsschwankungen (siehe Abb. 5). Außerdem wurden statistische Werte aus den höheren Momenten dieser Zeitreihen berechnet (RMS, Skewness, Kurtosis), die zur Validierung der im hybriden Modell erzeugten Turbulenzdaten dienen.

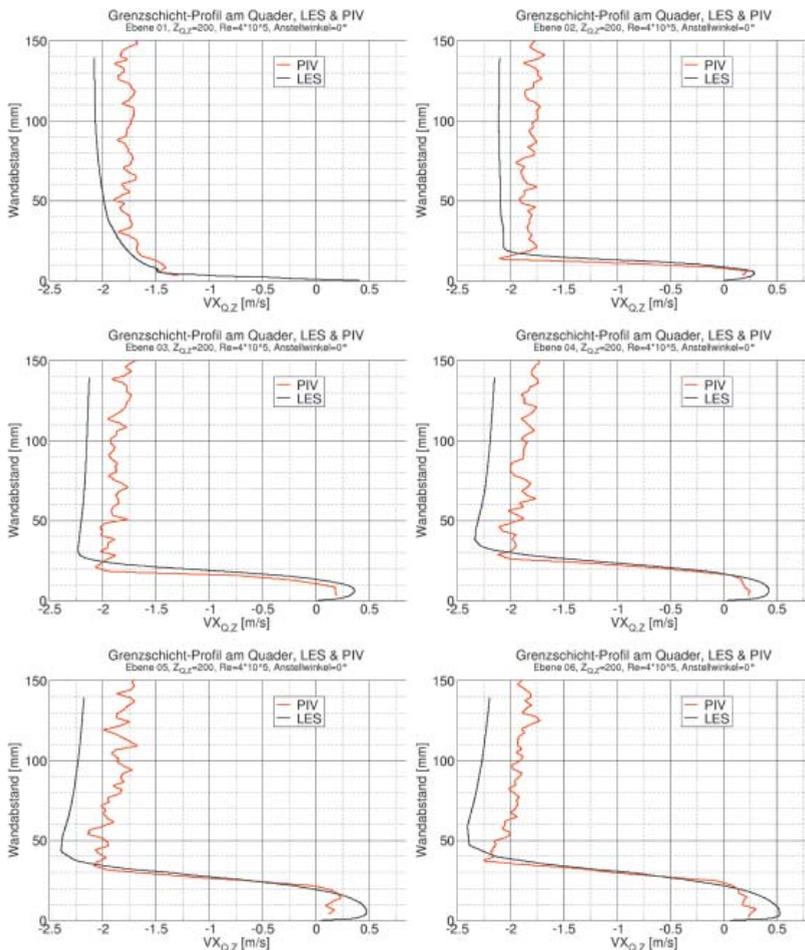


Abb. 4: Mit PIV gemessene Grenzschichtprofile des gerade angeströmten Quaders, dargestellt sind die ersten 6 Profile, gemessen über 60 mm ab Vorderkante des Quaders mit Abstand 10 mm

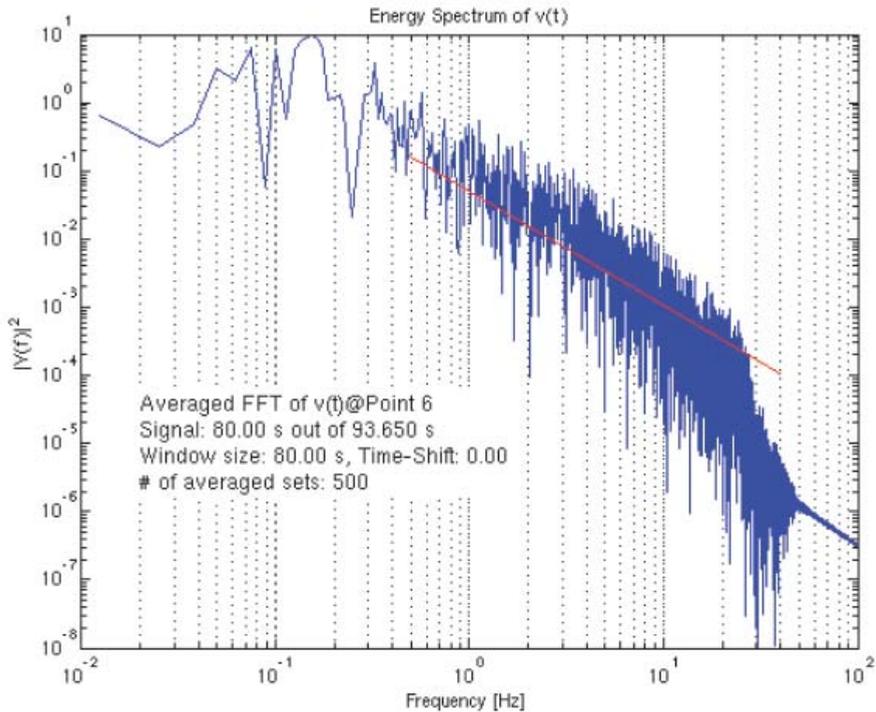


Abb. 5: Beispiel eines Energiespektrums der vertikalen Geschwindigkeitskomponente der Quaderumströmung in einem Punkt im Nachlauf des Quaders, die rote Gerade entspricht dem  $-5/3$  Gesetz des Inertialbereiches (siehe z.B. [2], [6])

Bei der Anwendung des hybriden LES-URANS-Verfahrens an einem Modell des KVLCC2-Tankers konnte im Nachstromfeld erstmals eine permanent vorhandene, deutlich instationäre Struktur erfasst werden, deren Existenz auch mit stereoskopischen PIV-Messungen nachgewiesen werden konnte. Die Bildfolge in Abb. 6 zeigt drei Zustände des Nachstromfeldes mit einem zeitlichen Abstand von ca. 0.7 s, in denen sich vor allem die Zuströmung in den beiden oberen Quadranten des Nachstromfeldes stark ändert. Die rechte Bildhälfte der Simulationsrechnungen (rechte Spalte) zeigt dazu den Zustand des Geschwindigkeitsfeldes in einer URANS-Simulation zu den entsprechenden Zeitschritten. Dort ist keinerlei Instationarität festzustellen.

Der direkte Vergleich der zeitlich gemittelten Ergebnisse des hybriden Modells bei der Nachstromberechnung des Testfalles 2.1 des Göteborg Workshops 2012 zeigt auch hier die Verbesserung, die der Einsatz dieses Lösers bringt. Die axialen Geschwindigkeiten im inneren Drittel der Propellerscheibe liegen deutlich näher an den Messwerten als bei der reinen URANS-Lösung (siehe Abb. 7)

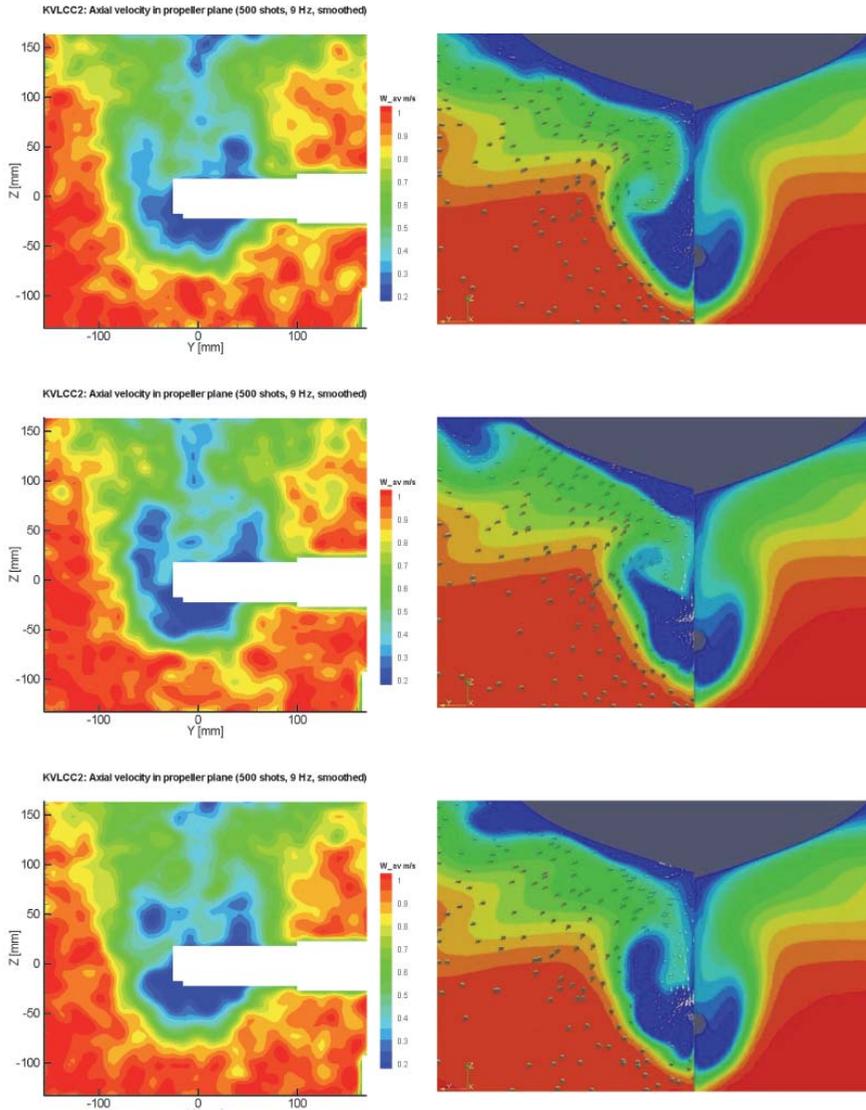


Abb. 6: Permanent vorhandene instationäre Struktur in der Propellerebene beim Modell des KVLC2-Schiffe, links: PIV-Messungen (die weißen Bereiche entstehen durch die Abschattung des Laserlichtschnittes durch die Propellerwelle); rechts: CFD-Simulation (linke Bildhälfte: hybrides Modell, rechte Hälfte: URANS-Simulation)

Auch bei der Berechnung des freifahrenden Propellers P1304 (PPTC Potsdam Propeller Test Case) mit dem hybriden Modell ergibt sich eine gute Übereinstimmung der mittleren axialen Geschwindigkeiten mit experimentellen Daten, wie der Vergleich mit stereoskopischen PIV-Messungen im Kavi-

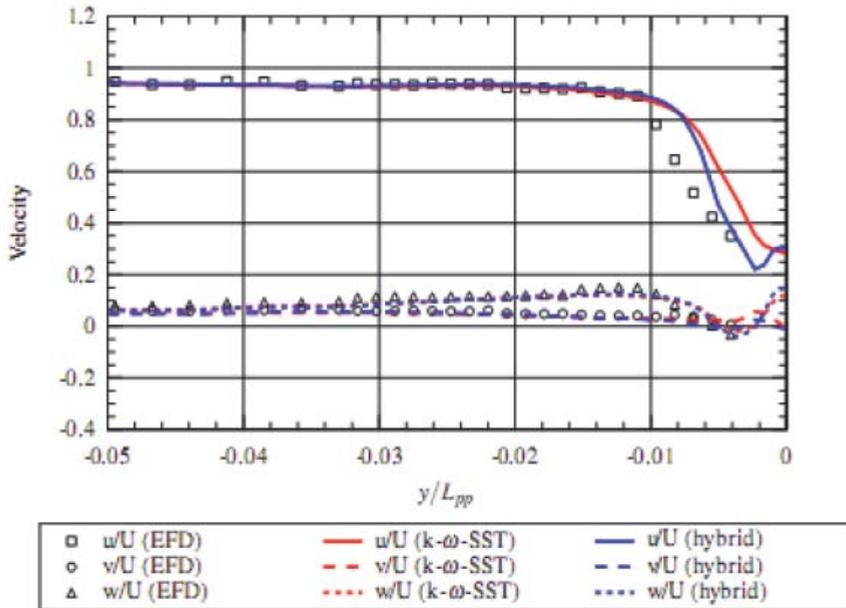


Abb. 7: Komponenten des mittleren Nachstromes am KCS-Schiff, das hybride Modell liegt auch hier näher an den Messergebnissen als die entsprechende URANS-Simulation

tationstunnel zeigt (siehe Abb. 8). Hier wurde 50 mm stromab von der Propellerebene das Geschwindigkeitsprofil entlang einer Linie von der Propellerachse bis zum Außenradius verglichen.

Besonders deutlich wird der Vorteil des hybriden Modells gegenüber herkömmlichen URANS-Verfahren bei der Berechnung des instationären Propellerschubes. Abb. 9 zeigt im Vergleich die Ergebnisse einer entsprechenden Simulation mit URANS und hybridem Modell. Während die Schubkraft bei URANS eine Schwankungsbreite im Bereich von nur 4% liegt und praktisch stationär ist, zeigt der deutlich instationäre Schubverlauf der hybriden Rechnung Ausschläge bis zu 26% und wirkt damit erheblich realistischer als die URANS-Ergebnisse. Eine Berechnung des Schubes mit Ingenieurmethoden bildet die URANS-Berechnung mit ähnlichen Standardabweichungen ab (ca. 4 – 5%), die Spitzenbelastungen von ca. 16% gibt nur die hybride Methode wieder [7], [8].

Das hybride Turbulenzmodell eignet sich auch für den Einsatz bei der Berechnung einer freien Wasseroberfläche. Ebenfalls am Göteborg Testfall 2.1 wurde das Wellensystem bei einer Froudezahl von  $Fn = 0.26$  simuliert und mit den experimentellen Daten aus [9] abgeglichen. Die sich einstellende

Wellenkontur zeigt Abb. 10. Im direkten Vergleich schneidet das Resultat des hybriden Löser besser ab als alle dort veröffentlichten Ergebnisse [10].

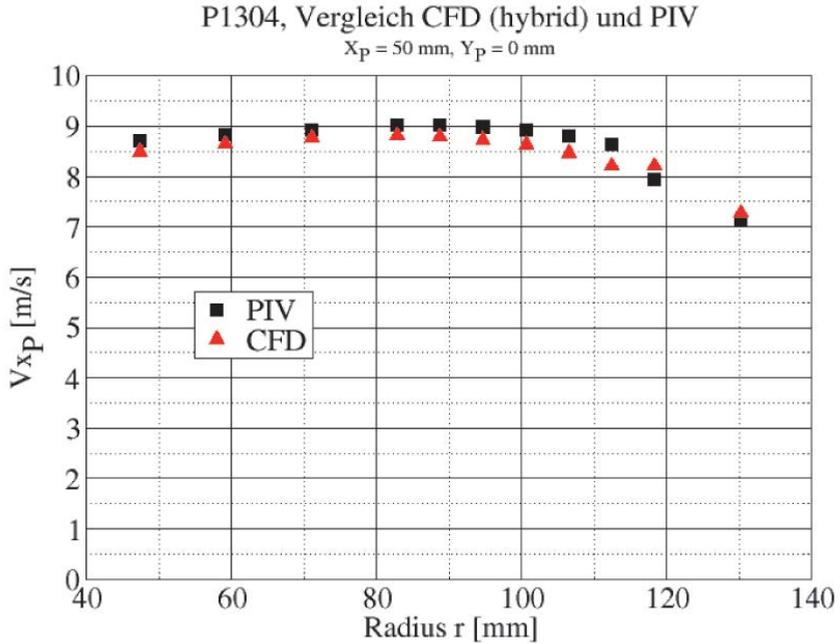


Abb. 8: Vergleich der Simulations- und PIV-Messergebnisse des freifahrenden Propellers P1304

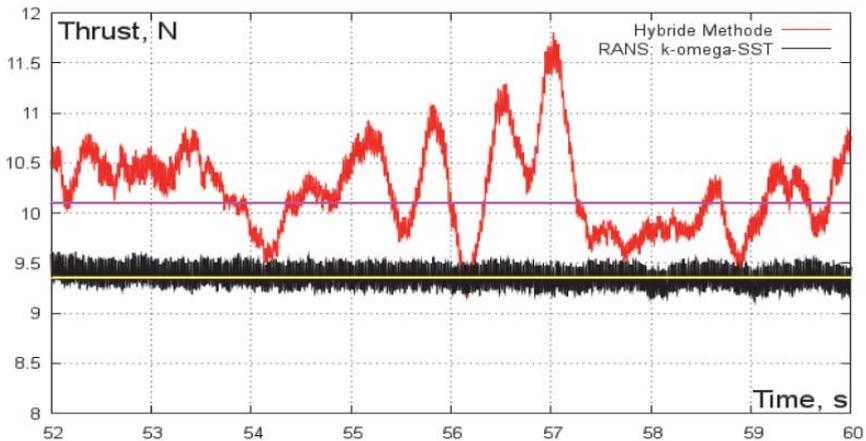


Abb. 9: Schubkraftverlauf bei Verwendung von URANS mit  $k$ - $\omega$ -SST-Modell und hybridem Modell

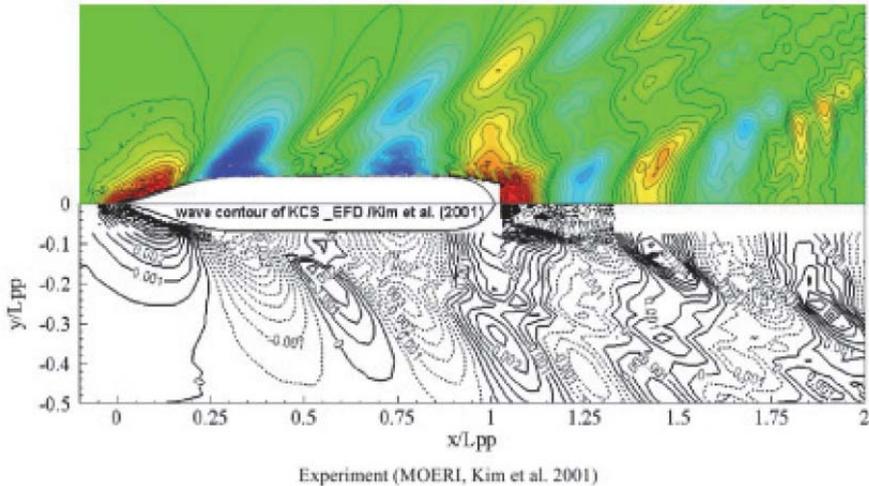


Abb. 10: Mit dem hybriden Modell berechnetes Wellensystem [11] und experimentelle Daten aus [9]

## Literatur

- [1] Kornev, N.; Taranov, A.; Shchukin, E.; Kleinsorge, L. (2011), "Development of hybrid URANS-LES methods for Flow simulations in the ship stern area", Ocean Engineering, 2011, Vol. 38, 1831-1838
- [2] Fröhlich, J. (2006), „Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen“, Teubner
- [3] Fröhlich, J.; Rodi, W. (2004), „LES of the flow around a circular cylinder of finite height“, International Journal of Heat and Fluid Flow, Nr. 25, S. 537 – 548
- [4] Frederich, O.; Scouten, J.; Luchtenburg, M.; Thiele, F.; Jenssch, M.; Hüttmann, F.; Brede, M.; Leder, A. (2008), „Joint Numerical and Experimental Investigation of the Flow Around a Finite Wall-Mounted Cylinder at a Reynolds Number of 200.000“, Proceedings of the ERCOFTAC International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, ETMM7, S. 517-522
- [5] Feymark, A.; Alin, N.; Bensow, R.; Fureby, C. (2009), „LES of the Flow around an Oscillating Cylinder“, NuTTS 2009
- [6] Pope, S. B. (2009), „Turbulent Flows“, Cambridge University Press
- [7] Kornev, N.; Taranov, A.; Shchukin, E.; Driesel, S.; Batrak, Yu.; Anshau, P. (2012), "CFD prediction of unsteady forces on marine propellers", submitted to Ocean Engineering

- [8] Kornev N.; Taranov A.; Shchukin E.; Springer J.; Palm M.; Batrak, Yu. (2012), "Development, application and validation of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area", 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26-31 August 2012
- [9] Kim, W.J.; Van, D.H.; Kim, D.H. (2001), "Measurement of Flows around modern commercial ship models", Exp. in Fluids, 31:567-578
- [10] Jürgens, D.; Palm, M.; Springer, J. (2012), „Berechnung der instationären turbulenten Schiffsumströmung mit LES-basierten Verfahren“, Abschlussbericht zum Projekt ShipLES, Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co, KG
- [11] Kornev N.; Taranov A.; Shchukin E. (2012), „Hybrid RANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area“, erscheint im Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2011



# FORM-PRO – Hydrodynamische Optimierung von Schiffen mit aktiver Propulsion

Mattia Brenner, Stefan Harries, Stefan Wunderlich (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam); Jörn Kröger, Arthur Stück, Thomas Rung (Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie, Technische Universität Hamburg-Harburg); Scott Gatchell, Lars-Uve Schrader, Jochen Marzi (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)

## 1 Motivation und Ziele

Steigende Brennstoffkosten und Umweltschutzanforderungen, wie die von der IMO eingeführten Emissionsbegrenzungen (EEDI, EEOI, SEEMP), zwingen Entwickler, Produzenten und Betreiber von Seeschiffen dazu, sich verstärkt um eine Verminderung des Brennstoffverbrauchs zu bemühen. Neben notwendigen Entwicklungen in der Motorentechnik kann die Hydrodynamik hierzu einen erheblichen Beitrag leisten, da Schiffswiderstand und Propulsionsverluste den wesentlichen Anteil am Energieverbrauch von Handelsschiffen darstellen. Nachdem in der Vergangenheit oft die Rumpfform nur im Hinblick auf den (Form-)Widerstand untersucht wurde, wird in dem vorliegenden Beitrag das Gesamtsystem Schiff-Propeller optimiert, da nur in der Kombination der Energieverbrauch signifikant minimiert werden kann.

Die kontinuierliche Steigerung der verfügbaren Rechenleistung und die hohe Effizienz moderner Algorithmen erlauben mittlerweile auch im industriellen Umfeld den Einsatz von Reynolds-gemittelten Navier-Stokes (RANS) Verfahren zur Optimierung von Schiffsrumpfen. Die Formoptimierung erfolgt in der CAE Integrations- und Entwicklungsumgebung FRIENDSHIP-Framework (FFW), in der die Rumpfform parametrisch beschrieben und das Optimierungsverfahren gesteuert wird. Die hydrodynamische Bewertung des Designs wird mit dem RANS-Löser FreSCo+ durchgeführt, erweitert um die adjungierten Gleichungen. Der Einfluss der Propulsion wird über ein Propellermodell abgebildet. Die Optimierung kann wahlweise im Modellmaßstab oder für die Großausführung durchgeführt werden.

Als Beispiel wird die Hinterschiffsoptimierung eines völligen Bulk-Carriers gezeigt – ein Schiffstyp, bei dem besondere Probleme bei der Interaktion von Propeller und Schiffsrumpf erwartet werden. Ziel war die Reduzierung der benötigten Antriebsleistung ( $P_D$ ) sowie eine Homogenisierung des Nachströmfeldes. Die numerisch optimierte Form wurde in einem Propulsionsversuch getestet und mit dem ursprünglichen Entwurf verglichen.

## 2 Methodik

### 2.1 Hydrodynamische Formoptimierung

Bei der hydrodynamischen Formoptimierung unterscheidet man im Allgemeinen zwischen lokaler und globaler Optimierung. Im industriellen Kontext sind meist nur graduelle Änderungen einer Ausgangsform in einem eng begrenzten Parameterraum realisierbar. Die industrielle Formoptimierung stützt sich daher häufig auf die lokale Optimierung einer Ausgangsform anhand von Berechnungen oder Modellversuchen. Aus der Interpretation der Ergebnisse wird eine Formmodifikation abgeleitet, die auf die Verbesserung der Zielfunktion  $J$  (z.B. Widerstandsreduktion) abzielt. Die Ergebnisinterpretation verlangt vertiefte Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Zielfunktion  $J$  und den Formparametern  $\alpha_i$  und zählt zu den Kernkompetenzen des Entwerfers. Der Zusammenhang wird mathematisch durch die sogenannten Sensitivitäten – dies sind die Änderungen (bzw. Gradienten) der Zielfunktion bei Variation der Formparameter – wiedergegeben. Zur zielorientierten Erzeugung der (leicht) modifizierten Form folgt man dem (entgegengesetzten) Zielfunktionsgradienten für alle Formparameter. Vereinbart man kleine Formänderungen, dann können die einzelnen Sensitivitäten in erster Näherung durch den Differenzenquotienten

$$\frac{dJ}{d\alpha_i} \approx \frac{J(\alpha_i + \Delta\alpha_i) - J(\alpha_i)}{\Delta\alpha_i} \quad (1)$$

numerisch bestimmt und anschließend überlagert werden. Dabei ist für jeden Formparameter die Auswertung einer dazugehörigen Geometrievariation notwendig. Aus diesem Grunde führen klassische direkte Methoden für viele Formparameter und rechenintensive Analysemethoden, wie z.B. RANS-Verfahren, zu einem nicht vertretbaren Rechenaufwand. Darüber hinaus sind der Einfluss von Nichtlinearitäten und Berechnungsungenauigkeiten problematisch. Ähnliche Probleme sind mit globalen Optimierungstechniken verbunden. Gegenstand jüngerer Entwicklungen sind adjungierte Methoden. Diese liefern den Gradienten der Zielfunktion unabhängig von der Zahl der Formparameter zum Aufwand einer zusätzlichen RANS-Rechnung. Im Rahmen des FORM-PRO Projektes wurde der RANS-Löser FreSCo<sup>+</sup> um ein adjungiertes Modul erweitert, ergänzend wurden schiffshydrodynamische Zielfunktionen entwickelt. Das resultierende Bewertungsverfahren wurde in eine CAE-Entwicklungsplattform integriert und zur Optimierung von Rümpfen eingesetzt.

### 2.2 Entwicklungsplattform

Der automatisierte Prozess (s. Abb. 1) stellt einen geschlossenen Kreislauf dar, in dem über parametrische Modellierungsverfahren eine Geometrievari-

ante erzeugt wird und in diskretisierter Form an den adjungierten Strömungslöser weitergegeben wird, wo die Sensitivitäten der Geometrie bezüglich einer Zielfunktion ermittelt werden. Diese werden anschließend auf die Formparameter des Geometriemodells übertragen.

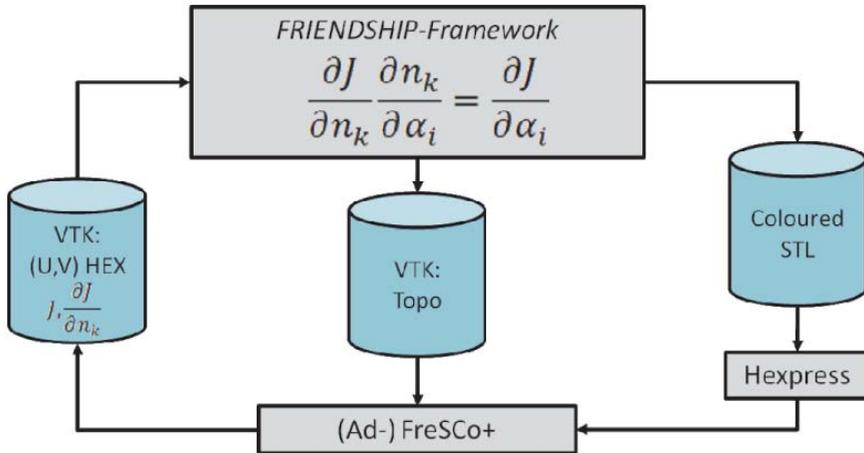


Abb. 1: Darstellung des automatisierten Gesamtprozesses

Die tesselierte Geometrie wird vom FFW in Form zweier Dateien exportiert. Die Erste ist das Coloured STL File, das vom Gittergenerator Hexpress als Grundlage für die Erstellung des Rechengitters verwendet wird. Diese Datei enthält die dreidimensionalen Koordinaten der Tesselierungsknoten und deren Farbe, die unterschiedliche Bereiche voneinander abgrenzt, z.B für die Zuweisung unterschiedlicher Randbedingungen oder Verfeinerungsstufen des Rechengitters. Die zweite Datei wird im VTK-Format ausgeschrieben und direkt von FreSCo<sup>+</sup> verwendet. Sie enthält ebenfalls die dreidimensionalen Koordinaten der Tesselierungsknoten, zusätzlich jedoch die Zuordnung auf welcher Fläche des Modells sie liegen und die Werte der dazugehörigen lokalen u,v-Koordinaten.

FreSCo<sup>+</sup> verwendet diese Datei zusammen mit der Hexpress Gitterdatei, um für die Oberflächenknoten des Hexpress Gitters (die auf dem Rumpf liegen) u,v-Positionen auf den Flächen des Modells zu interpolieren. Diese werden in ein neues VTK-File geschrieben. Weiterhin wird von FreSCo<sup>+</sup> die adjungierte Lösung des Strömungsproblems berechnet. Die Sensitivität der Zielfunktion liegt als Ergebnis der adjungierten Analyse mit Bezug auf die CFD-Diskretisierung der Designfläche vor (Änderung der Zielfunktion nach Knotenverschiebung in Normalenrichtung:  $\frac{\partial J}{\partial n_k}$ ). Für industrietypische Fälle ist die CFD-Geometrie von Schiffsrümpfen mit einer Auflösung von einigen zehntausend Knoten, und damit Freiheitsgraden, beschrieben, sodass die Sensitivität mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad, quasi-kontinuierlich

vorliegt. Im Vorhaben wurde eine neue Technik entwickelt, die diese Ausgangssensitivitäten für die CFD-Freiheitsgrade in die dazugehörigen Sensitivitäten  $\partial J/\partial ai$  (Änderung der Zielfunktion nach Parameterveränderung) der CAD-Formparameter überträgt, welche typischerweise nur noch 10-30 Freiheitsgrade  $ai$  beinhalten. Hierzu wurde ein Modul implementiert, das, aufbauend auf der Geometrieerzeugung, die Übertragung in den CAD-Parameterraum auf der Grundlage von Finiten-Differenzen realisiert.

Zunächst werden die Ausgangssensitivitäten von FreSCo<sup>+</sup> ebenfalls in das VTK-File geschrieben. Im darauf folgenden Schritt muss das FFW die Ergebnisse visualisieren und die Sensitivitäten der CFD-Oberflächenknoten auf Sensitivitäten der CAD-Parameter übertragen. Dafür muss das FWW zunächst bestimmen, wie sich die  $k$  Oberflächenknoten bei Änderung von  $i$  Parametern verschieben (Knotenverschiebung nach Parameterveränderung:  $\partial nk/\partial ai$ ). Aus dem VTK-File von FreSCo<sup>+</sup> ist bekannt welche Flächen des Modells betroffen sind und wo auf diesen Flächen (u,v-Position) die Hexpress Knotenpunkte liegen. Aus dem Modell kann bestimmt werden, von welchen freien Parametern die betroffenen Flächen abhängig sind. Die Werte der ermittelten Parameter werden systematisch in positive und negative Richtung gestört und die Normalverschiebungen der bekannten u,v-Positionen werden ausgewertet. Für jedes Element kann dann aus den Verschiebungen infolge der Störung der Gradient  $\partial nk/\partial ai$  numerisch berechnet und gespeichert werden. Dieser kann, wie die Ausgangssensitivität  $\partial J/\partial nk$  auch, als Plot auf der Rumpfoberfläche visualisiert werden.

Aus dem Vergleich der beiden Plots lässt sich bereits recht gut visuell beurteilen, welche Parameter Gebiete mit hohen Sensitivitäten beeinflussen und damit einen großen Einfluss auf die Zielfunktion haben (s. Abb. 8 b und c). Eine genauere Aussage ergibt sich, wenn man für jeden Parameter das Skalarprodukt aus  $\partial J/\partial nk$  und  $\partial nk/\partial ai$  bildet und damit die Sensitivität  $\partial J/\partial ai$  des entsprechenden Parameter erhält. Diese werden gesammelt in einer Tabelle dargestellt und geben eine Aussage darüber, welche Parameter auf welche Weise verändert werden sollte, um eine positive Veränderung der Zielfunktion herbeizuführen.

### 2.3 Primales und adjungiertes RANS Verfahren

Die Strömung wird anhand der primalen RANS Gleichung für stationäre Strömungen beschrieben.

$$R_i = 0 = \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu_{eff} S_{ij} - p\delta_{ij}) - \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + b_i \quad \text{und} \quad Q = 0 = \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \quad \text{in} \quad \Omega \quad (2)$$

Hierin bezeichnen  $\rho$ ,  $\mu_{eff}$ ,  $U_i$ ,  $S_{ij}$ ,  $p$  und  $b_i$  die Dichte, die effektive dynamische Viskosität, die kartesischen Geschwindigkeitskoordinaten, die Koordinaten des Scherratentensors, sowie Druck und Volumenkräftdichten.

In der neueren Literatur werden mit dem diskreten und dem kontinuierlichen Verfahren zwei unterschiedliche Methoden zur Behandlung des adjungierten Problems beschrieben. Im Zusammenhang mit praxisnahen modernen Strömungsberechnungsprozessen – inkl. eingebundener Bibliotheken, z.T. nicht verfügbarer Quellcodes und unterschiedlichen Programmiersprachen – ist die diskret-adjungierte Methode wegen des großen Speicher- und Rechenzeitaufwands und der schwierigen Implementierung nicht umsetzbar. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb ein kontinuierlich-adjungiertes Verfahren realisiert. Dabei werden große Teile des Navier-Stokes-Lösers wiederverwendet und man konserviert die hohe Paralleleffizienz und den geringen Speicherbedarf des Ausgangslösers für den adjungierten Löser. Ausgangspunkt der kontinuierlich adjungierten Methode ist das erweiterte Zielfunktional, d.h. die Summe aus Zielfunktion und mit Lagrangen Multiplikatoren erweiterten RANS-Gleichungen als Nebenbedingung der Optimierung.

$$L = J + \int R_i \hat{U}_i dV - \int Q \hat{p} dV. \quad (3)$$

Die Lagrange-Multiplikatoren  $\hat{U}_i$  und  $\hat{p}$  stellen die adjungierten Variablen dar. Die Anwendung des Variationsprinzips auf die erweiterte Zielfunktion ergibt nach mehrmaliger partieller Integration die im Volumen zu befriedigenden adjungierten RANS-Gleichungen zur Bestimmung der Lagrange-Multiplikatoren

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu_{eff} \hat{S}_{ij} - \hat{p} \delta_{ij}) + \rho U_j \frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_j} - \rho \hat{U}_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{\partial j}{\partial U_i} = 0 \quad (4)$$

bzw.  $\frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_i} = 0$ , mit  $\hat{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\hat{U}_{i,j} + \hat{U}_{j,i})$  und  $J = \int j dV$ .

Gleichung (3) wird um mehrere Randintegrale und die Randbedingungen der Variationsrechnung ergänzt. Die adjungierten Gleichungen sind abhängig von der gewählten Zielfunktion und werden je einmal pro Zielfunktion und Entwurfszyklus gelöst. Nach Anwendung der Randbedingungen verbleibt die gesuchte Sensitivität als Randintegral, das unter Verwendung der adjungierten Variablen für jedes Flächenelement ausgewertet werden kann. Der Zielfunktionsgradient entspricht der Änderung der Zielfunktion mit der Verdrängungsänderung bei Normalverschiebung des CFD-Flächenelements in der Designfläche.

$$\mathcal{G} = \frac{1}{d\Gamma} \frac{\delta J}{\delta n} = \frac{\delta J}{\delta V} = -\mu_{eff} \frac{\partial U^t}{\partial n} \frac{\partial \hat{U}^t}{\partial n} (\underline{t} \cdot \underline{\hat{t}}) \text{ auf } \Gamma_{ds} \quad (5)$$

Die Schwierigkeit des kontinuierlich-adjungierten Verfahrens ist die konsistente diskrete Formulierung. Die Diskretisierung der adjungierten Gleichungen basiert auf dem in diesem Projekt neu entwickelten hybrid-adjungierten Verfahren. Letzteres garantiert die konsistente Approximation der elementaren Bausteine des adjungierten numerischen Verfahrens und damit stabile, genaue Berechnungen bei sehr hohen Großausführungs-Reynolds-Zahlen.

## Zielfunktionen

Im Projekt wurden mehrere schiffshydrodynamische Zielfunktionen entwickelt, die ebenfalls miteinander kombiniert werden können. Zu den adressierten Zielen zählen volumenbezogene wie auch randbezogene Ziele. Das prominenteste in diesem Vorhaben behandelte Volumenziel ist die Homogenität des Nachstroms in Bezug auf die Axialgeschwindigkeit oder die Propellerblattanströmrichtung. Weiterhin ist die vom Propeller erbrachte Leistung ein wichtiges volumenspezifisches Ziel. Das bekannteste randspezifische Ziel ist der von einer (Teil-)Fläche erzeugte Widerstand.

Ein besonderer Fokus lag auf der Homogenisierung der Propellerzuströmung mit Hilfe der Formoptimierung des Hinterschiffs. Diesbezügliche Zielfunktionen wurden aus bekannten Gütekriterien von Schiffbauversuchsanstalten abgeleitet und in das adjungierte Kalkül übersetzt, z.B.

$$J = 1 - \frac{1}{R_O - R_I} \int_{R_I}^{R_O} \sqrt{2 \mathcal{D}_I(r) \mathcal{D}_{II}(r)} \, dr . \quad (6)$$

Die genannte Zielfunktion strebt im Idealfall gegen 1 und lehnt sich an ein Nachstromgütekriterium der SVA Potsdam an. Sie beobachtet die Abweichung der axialen Anströmung von ihrem Mittelwert  $\bar{U}^a(r)$  über den Umfang der Propellerscheibe

$$\bar{U}^a(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U^a(r) \, d\theta \quad \text{für } R_I < r < R_O . \quad (7)$$

Die Schiffsgeschwindigkeit  $U_S$  dient dabei der Normierung. Ferner wird die Variation für einen Propellerradius

$$\mathcal{D}_I(r) = \frac{1}{2\pi U_S} \int_0^{2\pi} |U^a - \bar{U}^a| \, d\theta \quad \text{für } R_I < r < R_O , \quad (8)$$

mit der relativen Bandbreite der Schwankungen im Kriterium gewichtet

$$\mathcal{D}_{II}(r) = \frac{1}{U_S} [\max(U^a) - \min(U^a)] . \quad (9)$$

Alle entwickelten Kriterien lassen sich um Nebenbedingungen (z.B. Verdrängungskonstanz) und Filterfunktionen zur räumlichen Fokussierung ergänzen.

## Gradientenglättung

Die hohe Auflösung der CFD-Sensitivitäten bietet einen detaillierten Blick in lokale Formänderungspotenziale. Die Vielzahl damit verknüpfter Freiheitsgrade kann aber auch zu lokalen Fluktuationen der Sensitivitäten führen, wodurch sich die Konvergenz der Optimierung verzögern kann. Ursache für

diese Schwankungen ist der mathematische Unterschied zwischen dem gesuchten (glatten) Gradienten und der numerisch bestimmten (rauen) Ableitung. In diesem Fall ist es vorteilhaft die Sensitivität unter Berufung auf den Riesz-Isomorphismus zu glätten. Eine in diesem Projekt etablierte, sehr effiziente explizite Glättung stützt sich auf lokal definierte Gauß-Kernel, die über einen einfachen Steuerparameter in Gestalt der Filterweite iterativ angepasst oder mehrmals hintereinander angewendet werden kann, ohne signifikant Rechenzeit zu benötigen.

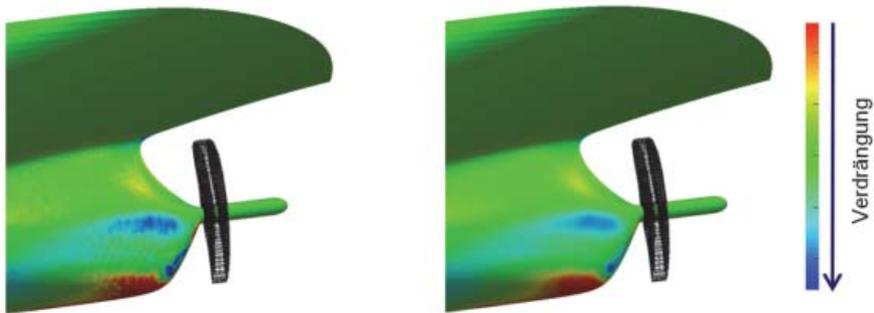


Abb. 2: Explizite Glättung der ursprünglich rauen Zielfunktionsableitungen (links) zu glatten Zielfunktionsgradienten (rechts).

## Validierung

Die Validierung des Verfahrens erfolgte anhand von generischen Strömungsbeispielen von denen hier nur eines dargestellt werden soll. Dabei handelt es sich um die turbulente Durchströmung eines S-förmigen 2D-Kanals, mit dem Ziel die Druckverlustleistung durch Formänderung zu minimieren. Es wurden Änderungen der oberen und unteren Wand im Bereich des Krümmers in Betracht gezogen. Die in Abb. 3 gezeigten Ergebnisse dokumentieren die hohe Güte des entwickelten Verfahrens. Die mit einer einzigen adjungierten Rechnung bestimmten Gradienten der Zielfunktion (ADJ) weichen kaum von den mit vielen hundert einzelnen NS-Rechnungen sehr aufwendig bestimmten lokalen Gradienten (LIN) ab.

## 2.4 Geometriemodellierung und Formvariation

Um sich für die Einbindung in einen automatisierten Variations- und Optimierungsprozess zu eignen, muss ein Geometriemodell bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Es muss eine möglichst geringe Anzahl von Freiheitsgraden besitzen, d.h. definierende Formparameter. Die Parameter müssen möglichst unabhängig voneinander sein und charakteristische Eigenschaften des Produkts beschreiben. Umgekehrt müssen bestimmte, vorhergesehene Eigenschafts- bzw. Formänderungen durch Änderung einzelner Parameter zu

erreichen sein, um zu verhindern, dass nur bestimmte Wertekombinationen sinnvolle Formen ergeben.

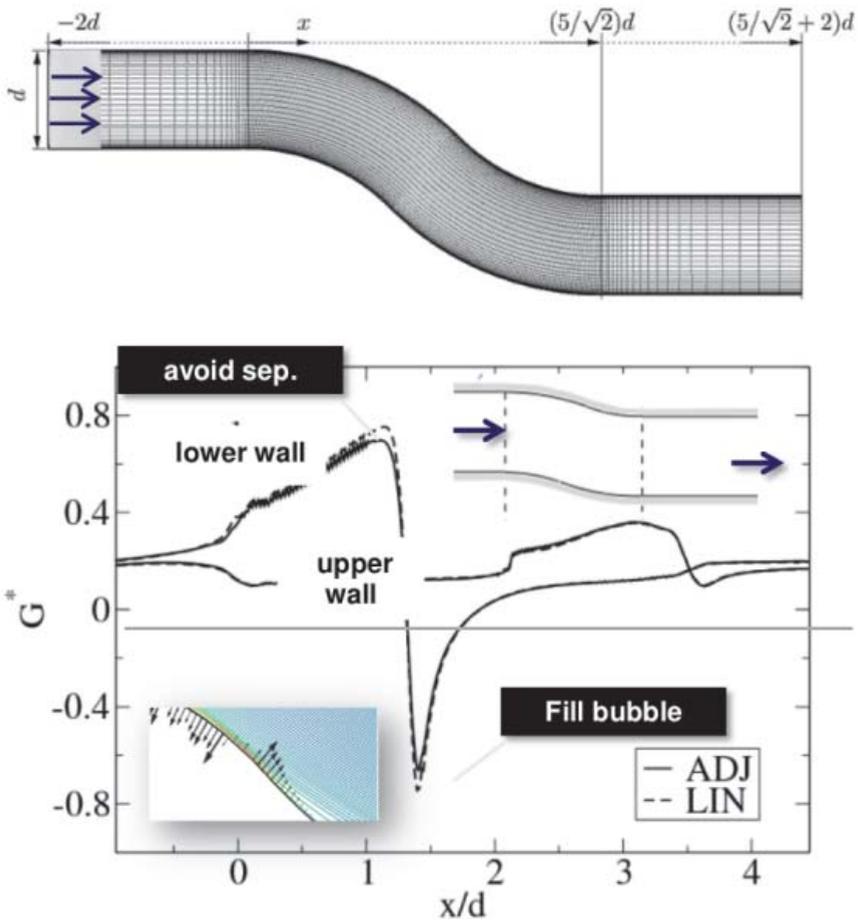
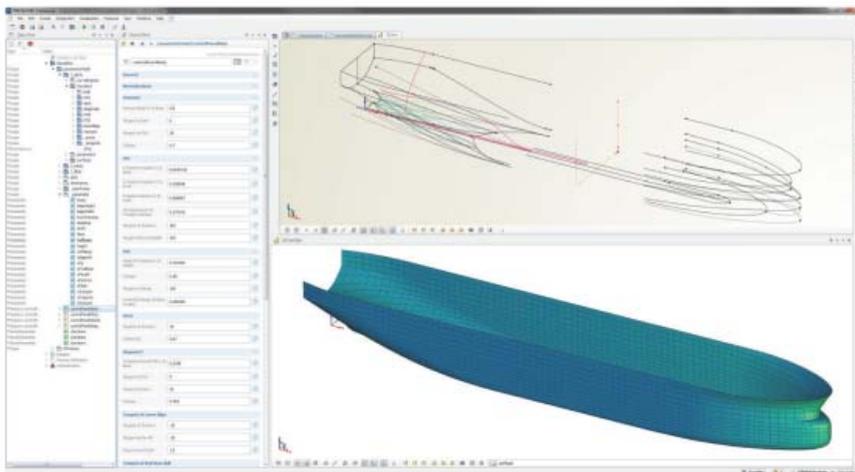


Abb. 3: Rechengitter ( $240 \times 50$  Kontrollvolumen) und Ergebnisse der Sensitivitätsstudie zur Reduktion der Druckverlustleistung eines zweidimensionalen Kanals. Der untere Teil vergleicht die mit einer adjungierten Rechnung (ADJ) bestimmten Zielfunktionsgradienten mit den durch mehrere hundert RANS-Rechnungen bestimmten Gradienten aus Finiten Differenzen (LIN).

Die erstellten Geometriemodelle basieren auf der sogenannten Metasurface-Technologie. Dies ist eine eigene und im FFW implementierte Entwicklung von FRIENDSHIP SYSTEMS. Sie erlaubt die flexible Erstellung und Parametrisierung komplexer Freiformflächen. Dabei werden, für verschiedene Bereiche des Schiffsrumpfes, Querschnitte durch die Fläche, in der Regel Spannen, topologisch in einer sogenannten Featuredefinition beschrieben. Features sind in diesem Zusammenhang höherwertige Geometrieelemente,

die mehrere Arbeitsschritte kapseln und damit eine aus mehreren primitiven Geometrieelementen bestehende Topologie beschreiben können. Eine Featurodefinition besteht im Wesentlichen aus Input-Parametern, einem Skript, das beschreibt, wie diese Parameter verwendet werden und einem Output, das die im Skript neu erstellten Objekte beinhaltet. Die benötigten Eingabeparameter werden rausgeführt und durch Eingabe von Wertekombinationen können Instanzen des Features erstellt werden. Eingabeparameter für die Generierung eines Spantes können positioneller, differentieller (Winkel) und integraler (Flächen) Natur sein; als typisches Beispiel sei hier die Spantfläche genannt. Wenn für die Eingabeparameter kontinuierliche Verteilungen in Form von parametrisierten Kurven - entsprechend dem genannten Beispiel die Spantarealkurve - vorgegeben werden, ist die Spantform an beliebigen Positionen innerhalb des Definitionsbereichs der Kurven bekannt und eine Fläche kann erstellt werden, die Metasurface (s. Abb. 4). Aus dieser speziellen Art der Flächenbeschreibung, die Informationen aus zwei Raumrichtungen kombiniert, folgt letztendlich, dass die Freiformfläche komplett durch Parameter beschrieben ist.

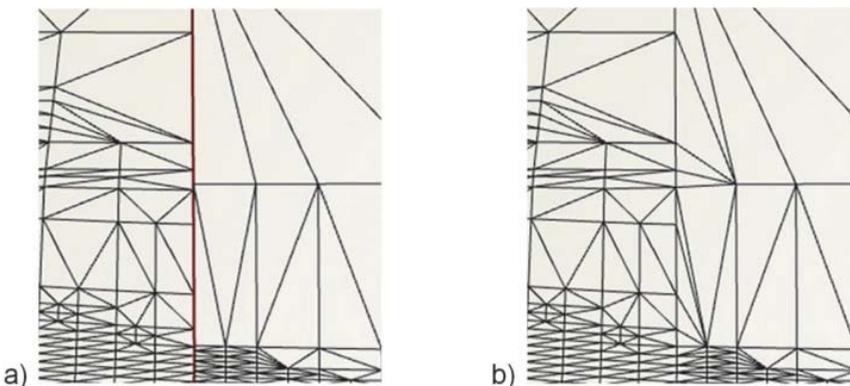


*Abb. 4: Ansicht des Geometriemodells eines Bulkers. Im oberen Grafikkfenster sieht man die Grundkurven, im unteren die Flächengeometrie.*

Nach Erstellung oder Variation der Rumpfform, muss die Geometrie des Fluidvolumens zur Erstellung des Rechengitters an Hexpress übergeben werden. Neben dem Schiffsrumpf besteht die Berandung des Fluidvolumens aus Wasseroberfläche, Symmetrieebene, Boden, Ein- und Auslass (Domainbox). Diese Flächen werden ebenfalls im FFW modelliert. Der Flächenverbund der Berandung wird in triangulierter Form als STL-File exportiert und anschließend in Hexpress eingelesen (s. Abschnitt 2.2). Dabei verlangt Hexpress mit sehr niedriger Toleranz, dass das Rechenvolumen wasserdicht ist, d.h. es

dürfen im Flächenverbund keine Lücken und Schlitzte auftreten. Weiterhin sind hängende Knoten, Überlappungen, kollabierte Dreiecke sowie wechselnde Normalenrichtungen nicht zugelassen bzw. führen zu Fehlern. Da dieser Schritt ebenfalls im automatisierten Kontext abläuft, ist es nicht möglich manuelle Reparaturen oder Aufbereitungen der Geometrie vorzunehmen. Um die automatische Erzeugung einer wasserdichten Tessellation beim Export zu ermöglichen, wurden zwei neue Objekttypen bzw. Prozessoren im FFW eingeführt: Das sogenannte Trimesh ermöglicht das Zusammenfassen mehrerer Flächen zu einem wasserdichten Volumenkörper ohne hängende Knoten, während der neue Solid Typ boolesche Operationen zur Anwendung auf den erzeugten Volumenkörpern bereitstellt.

Ein Trimesh enthält als Input eine Sammlung FFW-interner Flächen oder importierter Objekte und erstellt darauf zunächst eine krümmungsadaptive Tessellation. Die adaptive Tessellation verdichtet, von einer sehr groben Tessellation ausgehend, sukzessive, in unstrukturierter Form die Dreiecksunterteilungen, bis ein vorgegebener maximaler Abstand von der realen Flächenform erreicht ist. Demzufolge ergeben sich in Bereichen mit hoher Flächenkrümmung kleine Dreiecksunterteilungen, in Bereichen mit niedriger Krümmung dagegen große. Im folgenden Schritt können die Tessellationen der einzelnen Flächen zu einem durchgehenden, wasserdichten Verbund zusammengefügt werden. Dabei erfolgt das Zusammenfügen von Flächen weitestgehend automatisch. Die wichtigsten Einstellungsmöglichkeiten für den Benutzer sind die Einstellung für die adaptive Tessellation, die einmalig für alle Flächen des Trimeshes vorgenommen wird und dann individuell für einzelne Flächen angepasst werden kann, sowie die Snapping-Toleranz, die angibt, wie weit die Knoten einer Randkurve von denen der benachbarten Randkurve entfernt sein dürfen, bevor sie nicht mehr zusammengefügt werden.



*Abb. 5: a) Unterschiedliche adaptive Tessellation am Rand zweier benachbarter Flächen. b) Ergebnis nach Projektion und Snapping. Auf dem Rand der rechten Fläche wurden Knoten eingefügt.*

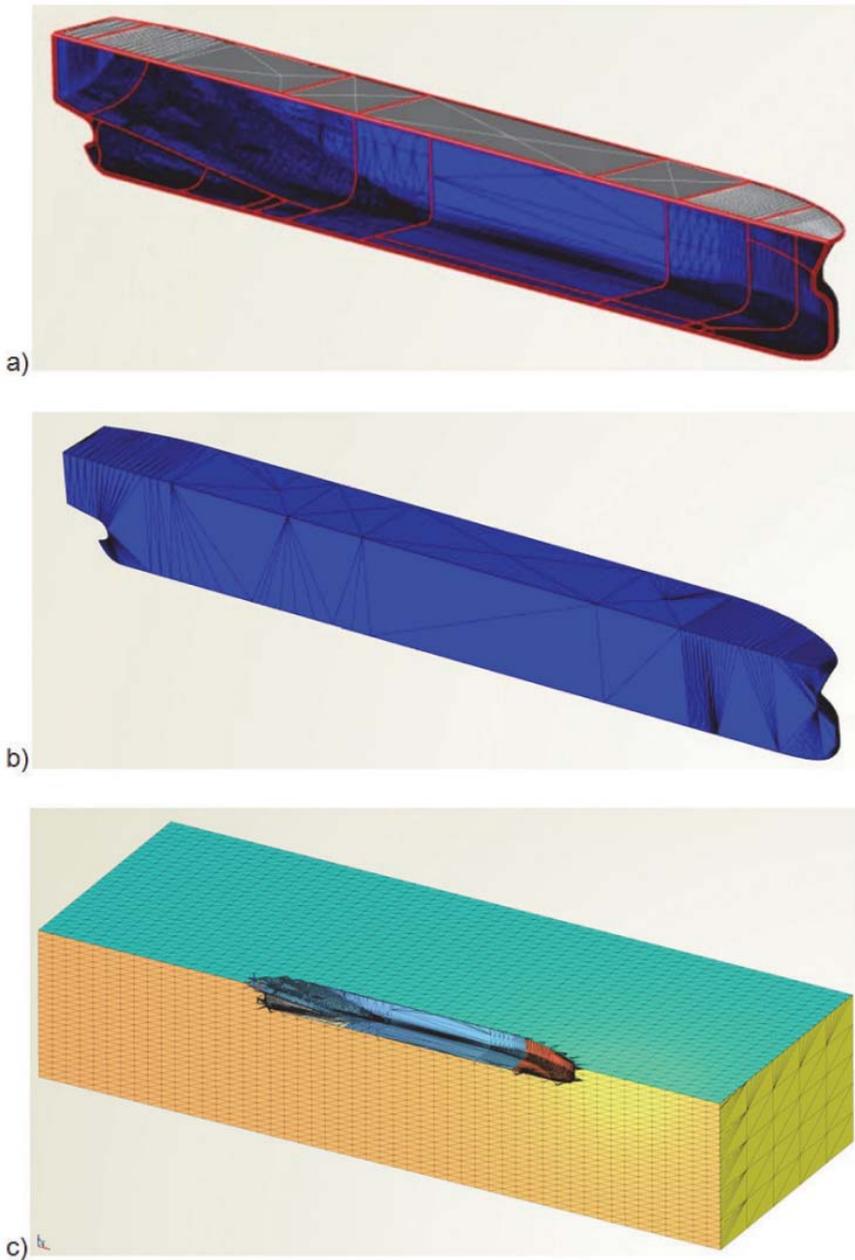


Abb. 6: a) Initialer Flächenverbund mit adaptiver Tessellierung. Die roten Kurven markieren offene Kanten. b) Ergebnis nach Snapping und Projektion der verbleibenden offenen Kanten auf die Mittschiffsebene. Delaunay Triangulierung der Fläche auf der Mittschiffsebene. c) Ergebnis des Verschnittes mit dem kastenförmigen Rechengebiet.

Die Hoffnung, dass die Randkurven benachbarter Flächen bei adaptiver Tesselierung eine gleiche Knotenanzahl besitzen, wurde dabei leider nur teilweise bestätigt. In vielen Fällen wirkt sich der interne Krümmungsverlauf der Fläche auf die Knotenverteilung auf den Randkurven aus, so dass auch bei gleichem Krümmungsverlauf der Randkurven zweier benachbarter Flächen unter Umständen unterschiedliche Knotenverteilungen vorliegen. Aus diesem Grund wurde der verwendete Snapping-Ansatz zum Zusammenfügen von Flächen um die Möglichkeit erweitert, Knoten einer Randkurve automatisch auf die benachbarte zu projizieren. Auf diese Weise wird die Anzahl der Knoten auf den benachbarten Randkurven angeglichen, so dass die Ränder anschließend durch einfaches Zusammenfassen benachbarter Knoten geschlossen werden können (s. Abb. 5). Einzelne gewählte Kanten können vom Benutzer vom Snapping-Prozess ausgenommen werden, um unerwünschte Ergebnisse zu verhindern, z.B. in der Nähe von Singularitäten.

Darüber hinaus bietet das Trimesh die Möglichkeit, die offenen Kanten einer Tesselierung auf eine Ebene zu projizieren und dann auf dieser mittels einer Delaunay-Triangulierung automatisch schließen zu lassen (s. Abb. 6b). Dies wurde als Postprocessing Option implementiert und kann durch weitere Optionen erweitert werden. Zurzeit stehen Optionen zum Entfernen sehr kleiner/kollabierter Dreiecke, zur Umkehrung der Normalenrichtungen und zur Glättung der Normalen für die Visualisierung zur Verfügung.

Die mit Hilfe des Trimeshs erzeugten Volumenkörper können anschließend mit den vom Solid zur Verfügung gestellten booleschen Operationen verschnitten werden. Diese Operationen umfassen die Vereinigung, die Differenz und sowie die Schnittmenge zweier Volumenkörper, und ermöglichen zum Beispiel das Abziehen eines Schiffskörpers von einem kastenförmigen Rechengebiet (s. Abb. 6c). Zur Durchführung der Operationen kommt ein Verschneidungsalgorithmus zum Einsatz, der zunächst die Schnittkante zwischen den beiden Volumenkörpern bestimmt, entlang der Schnittkante neu trianguliert und danach die für den resultierenden Volumenkörper nicht benötigten Teilflächen verwirft (abhängig von der Lage der entstandenen Teilflächen – innerhalb oder außerhalb des jeweils anderen Volumenkörpers – und der durchzuführenden Operation).

Weiterhin ist es möglich eine von dem Potentiallöser nuShallo berechnete freie Oberfläche als Trimesh in das FFW zu importieren und als obere Berandung für das Rechengebiet des Löser FreSCo<sup>+</sup> zu verwenden. Dies erspart den Rechenaufwand einer echten Rechnung mit freier Oberfläche, erweitert die Rechengenauigkeit jedoch im Vergleich mit einer Doppelkörperlösung mit glatter Wasseroberfläche.

### 3 Anwendung

#### 3.1 Numerische Optimierung

Die in Abschnitt 2 beschriebene Methodik zur Schiffsformoptimierung wurde am Beispiel eines Bulk-Carriers demonstriert (Abb. 7). Der ausgewählte Schiffsrumpf ist typisch für moderne Massengutfrachter aus dem Datenbestand der HSVA. Der Nachstrom eines solchen völligen Einschraubers weist eine Delle der axialen Strömungsgeschwindigkeit in der Zwölf-Uhr-Stellung des Propellers auf. Dies wirkt sich ungünstig auf die Propelleranströmung aus und führt zu unerwünschten Druckimpulsen an den Propellerflügeln. Die Rumpfform sollte so modifiziert werden, dass sich eine gleichmäßigere Umfangsverteilung der axialen Geschwindigkeit in der Propellerebene ergibt. Dies manifestiert sich in einer Zunahme des Nachstromgüte-Kriteriums  $J_{wake}$  (Gl. 7). Die Formoptimierung zielte somit darauf ab,  $J_{wake}$  zu maximieren, ohne den hydrodynamischen Widerstand nennenswert zu vergrößern. Da Bug und Mittelschiff des Bulk-Carriers den Nachstrom praktisch nicht beeinflussen, reicht es aus, die Hinterschiffsform zu modifizieren. Darüber hinaus sollte die Wirkung des drehenden Propellers auf den Nachstrom berücksichtigt werden.

Typ	$L_{pp}$ [m]	$B$ [m]	$T$ [m]	$V_S$ [kts]	$Fr$ [-]
Bulker	172,0	30,0	10,5	14,0	0,175

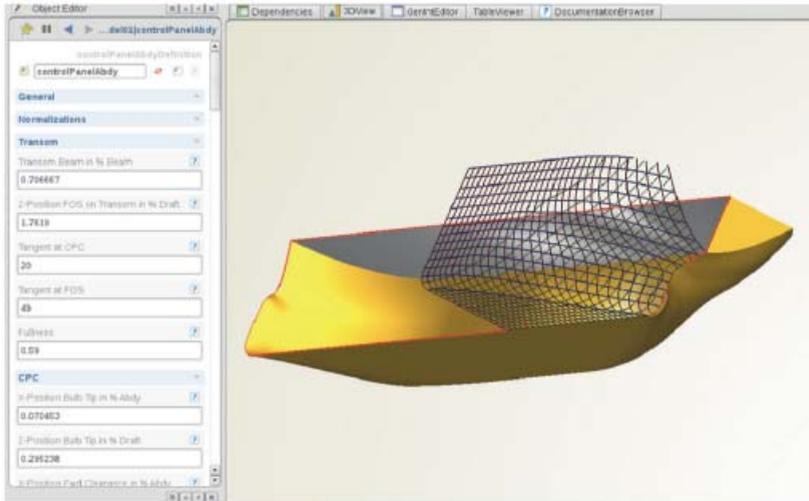


Abb. 7: Schiffsdaten und Unterwasserschiff des Bulk-Carriers  
(Doppelkörpersimulation, Maßstab 1:24,4, Reynolds-Zahl  $Re=1,02 \times 10^7$ ).

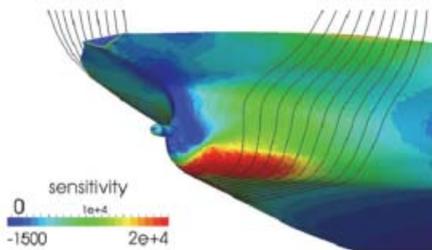
Die Formänderung erfolgte im FFW (Abb. 8a) mithilfe einer Optimierungsschleife aus einer primalen und einer dualen (adjungierten) RANS-Berechnung mit FreSCo<sup>+</sup>. Propellereffekte wurden mit der Quasi-Continuous-Methode (QCM) simuliert und der primalen RANS-Berechnung als Volumenkräftdichten in der Propellerscheibe aufgeprägt („numerischer Propulsionstest“). Die RANS-Simulationen erfolgten auf einem unstrukturierten Rechengitter mit dem Unterwasserschiff (Doppelkörpersimulation, Abb. 7). Der Einfluss der freien Wasseroberfläche auf  $J_{wake}$  blieb somit unberücksichtigt. Die Berechnungen wurden im Modellmaßstab 1:24,4 bei einer Reynolds-Zahl  $Re=1,02 \times 10^7$  durchgeführt, da der optimierte Rumpf in einem Schlepp-tankversuch getestet werden sollte.

Nach Durchlauf der Optimierungsschleife wurde die Verteilung des Sensitivitätsgradienten  $G$  (Gl. 5) auf der Rumpfoberfläche ermittelt (Abb. 8b).

(a)



(b)



(c)

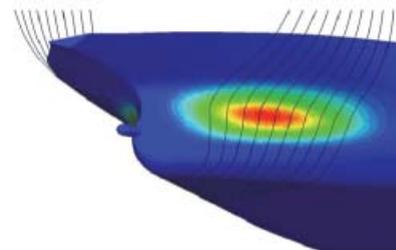


Abb. 8: (a) Ausschnitt aus dem FFW: Kontrollpaneel mit Formparametern für die Hinterschiffslinien (schwarze Gitterlinien). (b) Verteilung der Sensitivität  $G$  am Hinterschiff. (c) Einfluss des Völligkeitsparameters einer Wasserlinie auf die Hinterschiffsform.

Rote (blaue) Bereiche mit  $G > 0$  ( $G < 0$ ) weisen darauf hin, dass eine lokale Verschlangung (Verdickung) der Rumpfkontur zur erwünschten Zunahme der Nachstromgüte  $J_{wake}$  führt. Das  $G$ -Feld wurde im FFW eingelesen und auf die Formparameter des Geometriemodells übertragen. Es standen zahlreiche Parameter pro Rumpfseite (Back- und Steuerbord) zur Verfügung von denen sechs je Seite die Hinterschiffsform definierten. Von diesen sechs freien Variablen wurden die vier ausgewählt, die den größten Einfluss auf die laut adjungierter Rechnung zu verformenden Rumpfbereiche haben. Somit wurde die Form des Hinterschiffs durch insgesamt acht Designparameter verändert (s. Beispiel in Abb. 8c). Nach erfolgter Deformation wurde die neue Rumpfkontur trianguliert und als CAD-Objekt exportiert. Anschließend wurde das modifizierte Unterwasserschiff extrahiert und für die nachfolgende primäre RANS-Berechnung neu vernetzt.

Die Optimierungsschleife aus primaler und dualer RANS-Simulation kann im Prinzip so oft durchlaufen werden, bis das G-Feld innerhalb einer gewählten Toleranz verschwindet und ein lokales Optimum von  $J_{wake}$  erreicht ist. Von dieser Möglichkeit wurde hier jedoch nicht Gebrauch gemacht. Stattdessen erfolgte eine einzige Berechnung des Sensitivitätsgradienten mit anschließender Iteration über verschiedene Kombinationen der acht ausgewählten Designparameter und ausschließlich primaler RANS-Simulation. Auf diese Weise wurden 61 Hinterschiffsvarianten erstellt und hinsichtlich der erforderlichen Propellerleistung  $P_D$  bewertet (Abb. 9a). Der hydrodynamische Widerstand der aussichtsreichsten Variante wurde in einer nachfolgenden RANS-QCM-Simulation mit demjenigen der Ausgangsform verglichen (Abb. 9b). Im Gegensatz zur Formoptimierung (Doppelkörpermodell) berücksichtigte diese Simulation neben der Schwimmelage auch den Welleneffekt der freien Wasseroberfläche (Volume-of-Fluid-Modell). Es zeigte sich, dass die Wellenbilder der originalen und optimierten Rumpfform nahezu identisch sind, d.h. die Vernachlässigung der freien Oberfläche während der Optimierung führte nicht zu einer Verzerrung der Variantenbeurteilung.

Obwohl durch den Verzicht auf die primal-duale Iterationsschleife das Potenzial der adjungierten Formoptimierung nicht voll ausgeschöpft wurde, konnte  $P_D$  für alle Varianten reduziert werden (Abb. 9a). Dabei erwies sich Variante 61 mit einer Verminderung von  $P_D$  um 2,3% als am vielversprechendsten. Dieses Hinterschiff erzeugt ein gleichmäßigeres Nachstrombild als die Ausgangsform (Abb. 10); insbesondere ist der Gradient des Geschwindigkeitsdefekts oberhalb der Propellerwelle abgemildert. Der verbesserte Nachstrom bietet zusätzliches Potenzial für eine anschließende Propelleroptimierung, so dass in der Praxis eine Reduktion der Propellerleistung über die hier erzielten 2,3% hinaus erwartet werden kann. Für den verbesserten Nachstrom ist jedoch der Preis eines um 0,5% erhöhten Widerstands zu zahlen (Abb. 9b).

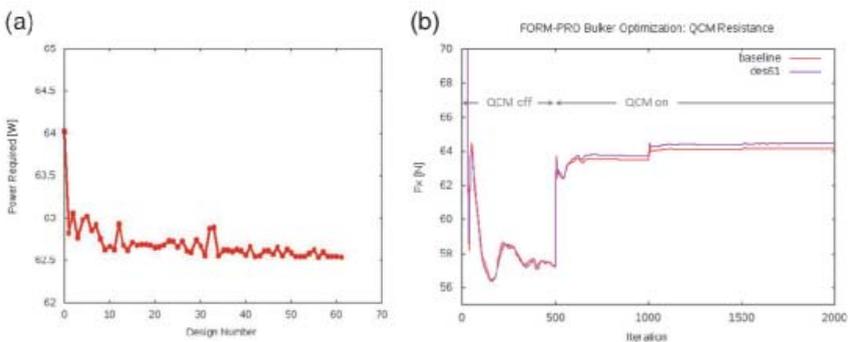


Abb. 9: Numerischer Propulsionstest des Bulk-Carriermodells (Maßstab 1:24,4). (a) Propellerleistung der Ausgangsform (Variante 0) und der modifizierten Formen (61 Hinterschiffsvarianten). (b) Vergleich des Widerstands der Ausgangsform und der finalen optimierten Form (Zielfunktion: Nachstromgüte) unter Berücksichtigung der Propulsion.

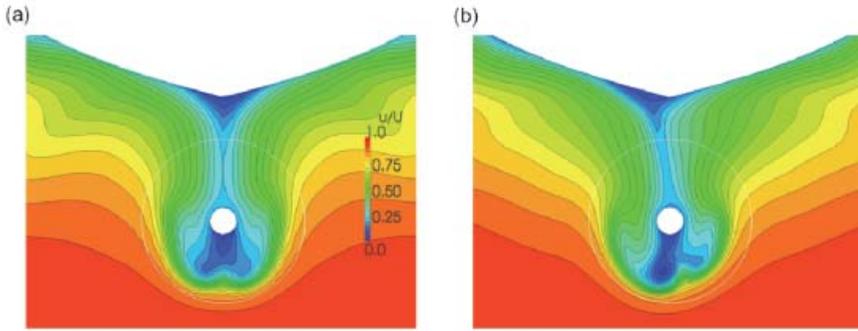


Abb. 10: Verteilung der Axialgeschwindigkeit in der Propellerebene des Bulk-Carriers (a) in Ausgangsform und (b) mit optimiertem Hinterschiff (Variante 61; Zielfunktion: Nachstromgüte).

Das Endergebnis der Optimierung war eine hydrodynamisch verbesserte Rumpfgeometrie mit veränderten Spantlinien im Heckbereich (Abb. 11). Da die Hinterschiffsvariation der Beschränkung einer einzuhaltenden Verdrängungstoleranz unterlag, fielen die Unterschiede zwischen der Ausgangsform und der modifizierten Form gering aus. Es zeigte sich, dass das optimierte Hinterschiff im Gegensatz zum originalen Entwurf asymmetrisch ist. Dies geht auf den Einfluss des drehenden Propellers auf die Hinterschiffsumströmung zurück (vgl. asymmetrische Nachstrombilder in Abb. 10) und verdeutlicht die Notwendigkeit, Propellereffekte bei der Schiffsformoptimierung zu berücksichtigen.

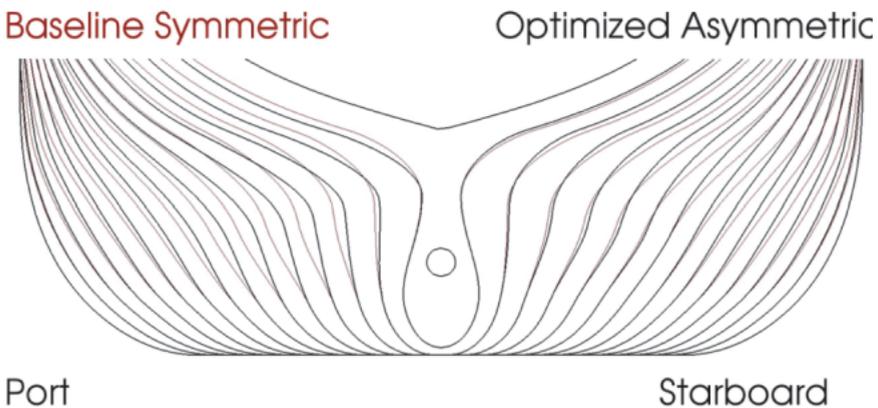


Abb. 11: Optimierung des Hinterschiffs eines Bulk-Carriers. Spantenriss des ursprünglichen Entwurfs (rote Spantlinien) und des optimierten Hinterschiffs (schwarze Spantlinien). Zielfunktion: Nachstromgüte.

### 3.2 Versuche im Schlepptank

Zur Validierung der numerischen Optimierung wurden an der HSVA Schlepp- und Propulsionsversuche mit den beiden Bulkervarianten durchgeführt (Abb. 12).

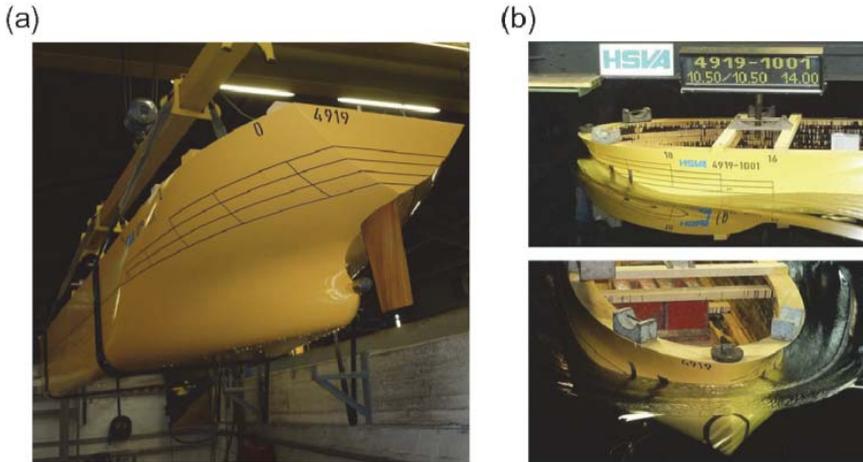


Abb. 12: Bulkervermodell mit optimiertem asymmetrischem Hinterschiff. (b) Wellenbild an Schulter und Bug des Modells mit originalem symmetrischem Hinterschiff.

Die Versuche erfolgten sowohl für die in Abschnitt 3.1 betrachtete Geschwindigkeit von 14kts als auch für weitere Geschwindigkeiten (Abb. 13), um das

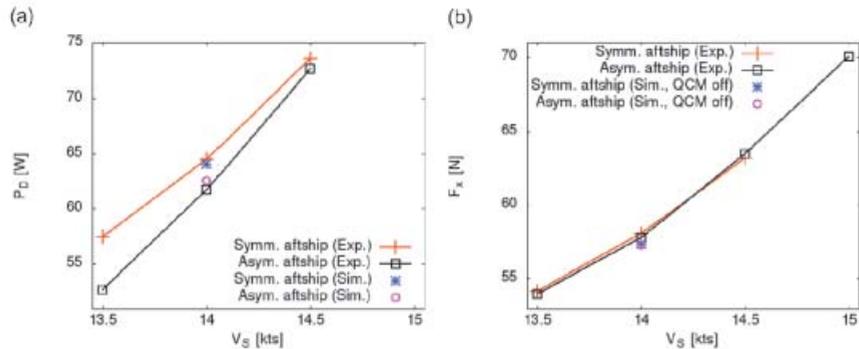


Abb. 13: Vergleich der experimentellen („Exp.“) und numerischen („Sim.“) Propulsions- und Schleppversuche. (a) Propellerleistung und (b) hydrodynamischer Widerstand (ohne Propulsion), aufgetragen über der Geschwindigkeit der Großausführung.

Verhalten des neuen asymmetrischen Entwurfs auch außerhalb des Optimierung-Betriebspunkts zu bewerten. Die numerisch prognostizierte Reduktion der erforderlichen Propellerleistung  $P_D$  durch die Hinterschiffsoptimierung wurde in den Schlepptankversuchen bestätigt und vom Betrag sogar übertroffen (4,3% Verringerung gegenüber 2,3% in den Simulationen, Abb. 13a).

Da die Leistungskurve der asymmetrischen Variante steiler ausfällt als diejenige des Originalentwurfs, ist das optimierte Schiff bei niedrigeren Geschwindigkeiten der Ausgangsform noch deutlicher überlegen (8,3% Leistungseinsparung bei 13,5kts). Beide Rumpfvvarianten hatten im Schleppversuch einen nahezu identischen Widerstand mit geringen Abweichungen zu den numerischen Ergebnissen (Abb. 13b).

## **4 Zusammenfassung**

### **4.1 Erreichte Ziele**

In dieser Studie wird eine Entwicklungsplattform zur Formoptimierung von Schiffen vorgestellt, bestehend aus dem FRIENDSHIP-Framework zur Parametrisierung des Schiffsrumpfes und dem Strömungscodex FreSCo<sup>+</sup> zur Lösung der primalen und adjungierten RANS-Gleichungen mit vorgegebener Zielfunktion. Die Formänderung erfolgt auf der Grundlage der Zielfunktionsableitung nach den Formparametern (Sensitivitätsgradient), welche mithilfe des adjungierten Kalküls trotz einer Vielzahl von freien Variablen effizient bestimmt werden kann. Die Methodik wurde für einen Bulk-Carrier bei 14 Knoten demonstriert und in einem Schlepptankversuch validiert. Als Zielfunktion diente ein Kriterium zur Quantifizierung der Homogenität der axialen Propellerzuströmung. Da der Nachstrom von der Hinterschiffsform und der Propellerwirkung abhängt, wurde hier das Hinterschiff des Bulkermodells bei aktiver Propulsion optimiert.

Das modifizierte Hinterschiff ist asymmetrisch und erzeugt einen gleichmäßigeren Nachstrom als die symmetrische Ausgangsform. Dies schlägt sich in einer besseren Anströmung des Propellers nieder, der deshalb bei einer niedrigeren Drehzahl betrieben werden kann, um den nötigen Schub zu erzeugen. Obwohl der Schub sich im Vergleich zum Originalentwurf um etwa 0,5% erhöht, kann die Antriebsleistung über die Drehzahlsenkung um gut 2,3% reduziert werden. Diese Prognose wurde im Schlepptankversuch sogar leicht übertroffen. Die Experimente zeigten, dass der asymmetrische Entwurf sich auch außerhalb des Optimierungspunkts robust verhält und v.a. bei niedrigeren Geschwindigkeiten wirtschaftlicher betrieben werden kann als

das konventionelle Schiff. Bereits in den 1970er und 80er Jahren hat Nönnecke asymmetrische Einschrauber-Hinterschiffe entwickelt und deren Vorteile bei der Propulsion demonstriert. Im vorliegenden Fall ist die Asymmetrie Ergebnis der unabhängigen Freigabe der Formparameter auf der Back- und Steuerbordseite des Rumpfes.

## **4.2 Ausblick**

Die zukünftigen Anstrengungen zielen auf die Weiterentwicklung der Optimierungsplattform ab. Dabei soll zum einen der Suchalgorithmus im FRIENDSHIP-Framework für die optimale Auswahl der Designparameter zur Formänderung verbessert werden. Zum anderen soll die Optimierungsschleife aus primaler und dualer RANS-Simulation automatisiert werden, um den Zielfunktionswert weiter zu steigern. Dies ermöglicht die Berechnung von hydrodynamisch noch leistungsfähigeren Schiffsrümpfen in noch kürzerer Zeit. Die Implementierung weiterer Zielfunktionen und deren Kombination sowie die Einbindung von Nebenbedingungen (z.B. geometrische Fixpunkte für den Maschinenraum) und Feature Lines werden ebenfalls angestrebt. Schließlich soll das adjungierte Kalkül auf Strömungen mit freier Oberfläche erweitert werden, um zukünftig auch den Einfluss des Wellenwiderstands berücksichtigen zu können.

## **4.3 Industrielle Verwertbarkeit**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Optimierungsplattform bereits jetzt einsatzfähig ist, um strömungsgünstigere Schiffsrümpfe zu entwerfen. Damit stellt sie ein nützliches Werkzeug für Schiffbau-Versuchsanstalten, Ingenieurbüros und Werften dar und ermöglicht diesen den Entwurf von umweltfreundlicheren Schiffen mit niedrigeren Betriebskosten. Mithilfe der vorgestellten Methodik lassen sich Schiffsoptimierungen sehr zügig durchführen und somit erhebliche Wettbewerbsvorteile bei der Entwicklung von energieeffizienten Schiffen realisieren.

Die vorliegende Studie ist Ergebnis des Forschungsvorhabens FORM-PRO (Förderkennzeichen 03 SX 280). Die Verfasser danken dem BMWi für die finanzielle Förderung und dem Projektträger Jülich für die administrative Unterstützung.



# GasPax – Nutzung von Brennstoffen mit niedrigem Flammpunkt auf Passagierschiffen, Mega Yachten und Ro-Ro Passagierschiffen

Rolf Nagel (Flensburger Schiffbau Gesellschaft); Bernhard Urban (Lürssen Werft); Sören Berg (MEYER WERFT); Jörg Müller (TGE Marine Gas Engineering); Benjamin Scholz (Germanischer Lloyd)

## Einleitung

Die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Schiffen steigen in immer kürzer werdenden Abständen. Unter anderem ging es in der Vergangenheit um die umweltgerechte Behandlung von Ballastwasser, Antifouling Anstriche, NO<sub>x</sub>- und SO<sub>x</sub>-Reduzierung der Abgase, Entölung von Bilgenwasser, Aufbereitung von Abwässern auf Schiffen etc. Die Veränderungen der Vorschriftenlandschaft strahlen unmittelbar auf die Werften aus, da bislang gängige Antriebskonzepte mit Schweröl langfristig unattraktiv werden. Zwar kann durch entsprechende Raffination der Brennstoffe bzw. Abgasnachbehandlung der Ausstoß an Schwefel- und Stickoxiden verringert werden. Die Technik hierfür ist weitestgehend ausgereift, aber mit hohen Herstellungs- und Folgekosten im Betrieb der Schiffe verbunden oder auch hohen Kraftstoffpreisen wie bei Diesel- bzw. Gasöl mit geringen Schwefelgehalten.

Neben den luftverschmutzenden Faktoren wird die zukünftige Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zum Schutz des Klimas eine zentrale Rolle spielen. Entsprechende Ansätze für den EEDI (Energy Efficiency Design Index) werden derzeit bei der IMO für die im Vorhaben betrachteten Schiffstypen zu Ende verhandelt, während andere Konzepte wie marktbasierende Instrumente in der IMO derzeit noch grundlegend diskutiert werden.

Mit der Entwicklung von Entwurfskompetenz auf den Werften für Schiffe mit alternativen Brennstoffkonzepten wurden zukunftsweisende Schritte unternommen, um umweltfreundliche Schiffe entwickeln zu können und so auch dem stark wachsenden Druck von seiten der Öffentlichkeit zu begegnen.

Partner des Vorhabens waren:

- Flensburger Schiffbau Gesellschaft mbH & Co KG (FSG)
- MEYER WERFT GmbH (MW)
- Lürssen Werft GmbH & Co. KG (FLW)

- TGE Marine Gas Engineering (TGE-Marine)
- Germanischer Lloyd SE (GL)

sowie als assoziierte Partner die Reedereien Aida Cruises, Scandlines und RCCL, die Klassifikationsgesellschaft DNV sowie als Technologieprovider MAN Diesel & Turbo, MaK und Saacke. Die Belange aus Sicht einer Hafenstadt mit Kreuzfahrtterminal wurden durch den Senat der Hansestadt Hamburg wahrgenommen.

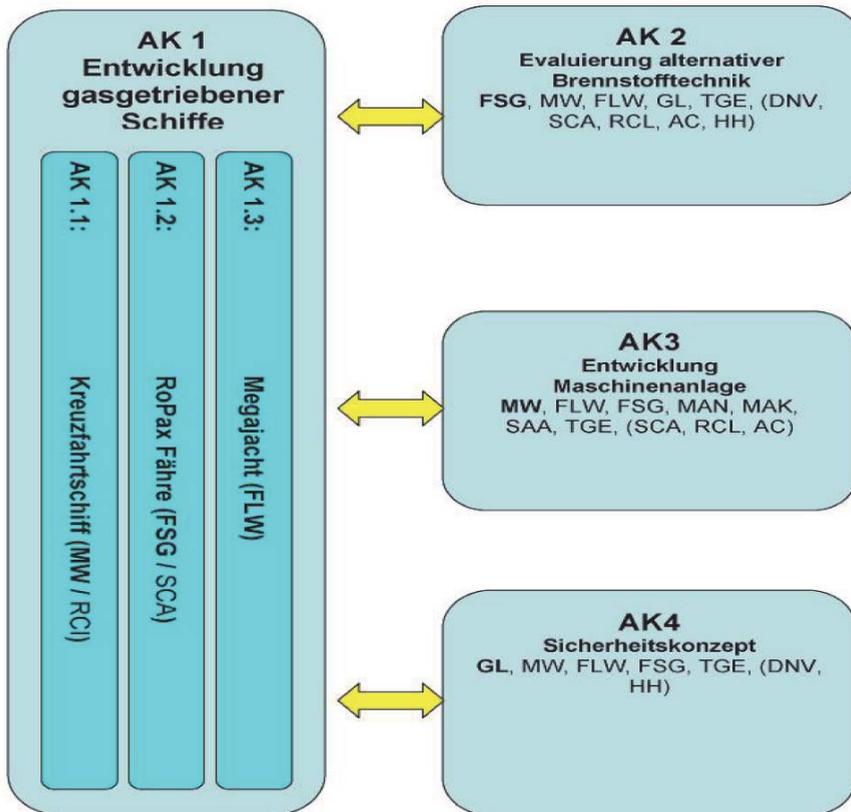


Abb. 1: Übersicht Projektstruktur

### Übersicht zur Vorschriftenlage

Gemäß den Anforderungen des IGC-Codes (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk) konnten in der Vergangenheit nur Gastanker das Boil off von LNG im Maschinenraum für die Propulsion verwenden. Ab dem Jahre 2000 kamen verschiedene gasbetriebene Schiffe, welche nicht unter die Anforderungen des IGC-Codes

fallen, mittels nationaler Ausnahmeregelungen in Fahrt. Um eine internationale Regelung für gasbetriebene Schiffe zu erarbeiten, wurde 2004 beim Marine Safety Committee (MSC) die Entwicklung eines internationalen Codes für Gas als Schiffsbrennstoff vorgeschlagen (IGF-Code; International Code of Safety for Gas-fuelled Ships). Ziel dieser Richtlinie ist die Bereitsstellung eines internationalen Standards für gasbetriebene Maschinenanlagen an Bord von Schiffen.

Als erstes Ergebnis wurde 2009 die MSC-Resolution 285(86) verabschiedet, welche in der Unterarbeitsgruppe „Bulk Liquids and Gases (BLG)“ erarbeitet wurde. Diese vorläufige Richtlinie beinhaltet Anforderungen an die Anordnung und Installation von gasbetriebenen Maschinen, um ein vergleichbares Niveau bezüglich Sicherheit und Betriebszuverlässigkeit im Vergleich zu konventionellen Maschinenanlagen zu erreichen. Diese Richtlinie besitzt keinen Status eines internationalen Codes, weswegen der Betrieb eines gasbetriebenen Schiffes derzeit noch einer gesonderten Genehmigung durch den Flaggenstaat bedarf. Die MSC.285(86) ist bis zur Fertigstellung des IGF-Codes gültig und bezieht sich ausschließlich auf den Gebrauch von LNG sowie CNG in Verbrennungsmaschinen.

Der IGF-Code befindet sich derzeit noch in der Entwicklung. Es wird eine Fertigstellung zum Jahr 2014 angestrebt, so dass dieser Code 2016 in Kraft treten kann. Alle nach IGF-Code gebauten Schiffe entsprechen ab diesem Zeitpunkt einem international, anerkannten Standard und bedürfen deswegen keiner Sondergenehmigung durch den einzelnen Flaggenstaat mehr. Darüber hinaus soll der IGF-Code alle relevanten Energiewandler abdecken, welche Gas als Brennstoff nutzen können z. B. Brennstoffzellen, Turbinen, Vier- und Zweitaktmaschinen. Dementsprechend wird der IGF-Code Anordnungen für weitere Gase z.B. Propan, Wasserstoff zur Verwendung im Maschinenraum beinhalten.

Abb. 2 gibt einen Überblick über die Sitzungen von BLG bzw. die derzeit gültigen und in der Entwicklung befindlichen Richtlinien.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Regulatory Track	BLG-13 MSC-86	BLG-14 MSC-87	BLG-15 MSC-88	BLG-16 MSC-89	BLG-17 MSC-90	BLG-18 MSC-91	BLG-19 MSC-92	BLG-20 MSC-93
		SOLAS 2010				SOLAS 2010		
		MSC.285(86)						
		Interim Guideline						
		DL Guideline						
		DL Rule Part for Ships						
		DL Rule Part for DL Guideline						
		IGF Code Development						

Abb. 2: Übersicht Richtlinien der IMO

## LNG als Treibstoff

Aus heutiger Sicht scheint sich LNG als alternativer Schiffstreibstoff durchzusetzen, wobei die Vorteile von LNG in erster Line in dessen Umweltfreundlichkeit liegt. So enthält LNG beispielsweise keinen Schwefel, da dieser bereits während der Reinigung und Verflüssigung entfernt wird. Der Hauptbestandteil von LNG ist Methan (CH<sub>4</sub>). Hierbei liegt das Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff im Idealfall bei 1:4, bei Dieselmotoren bei ca. 1:2. Weniger Kohlenstoff im Treibstoff bedeutet auch weniger CO<sub>2</sub> bei dessen Verbrennung.

<i>Temperatur bei Umgebungsdruck</i>	<i>-165 ... -160 °C (siedende Flüssigkeit)</i>
<i>Dichte (flüssig, Umgebungsdruck)</i>	<i>422 ... 488 kg/m<sup>3</sup></i>
<i>Brennwert LNG</i>	<i>45 ... 56 MJ/kg (34 ... 41 MJ/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Methanzahl LNG</i>	<i>63 ... 99</i>
<i>Brennwert BOG</i>	<i>22 ... 50 MJ/kg (19 ... 34 MJ/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Methanzahl BOG</i>	<i>75 ... 100</i>

Tab. 1: Zusammensetzung LNG

Untersucht wurde unter anderem auch die Verwendung von LPG. Zwar existiert für LPG eine weitreichende Infrastruktur, jedoch ist die ungewisse Preisentwicklung oftmals ein Hinderungsgrund für eine weitere Betrachtung. Die geringe Methanzahl von LPG sorgt für eine geringere Klopfestigkeit bei 4-Takt Motoren, sodass diese dann erheblich in der Leistung reduziert werden müssen. Dies verringert die Wirtschaftlichkeit des Antriebes.

## Gasaufbereitung

Ein Fuel Gas System besteht im Wesentlichen aus den Basiskomponenten Bunkeranschluss, Tank, Fuel Gas Aufbereitung (Pumpen, Verdampfer) und aus dem Master Gas Fuel Valve.

Zum Betrieb sind weitere Hilfssysteme notwendig: Wasser-Glycol System, Inertgas System, Ventilsystem / Ventilation, fernbedienbare Ventile, Automatisierung & Überwachung und Sicherheitssysteme, wie zum Beispiel Gas-Detektion & Brandschutz.

Da tiefkaltes LNG in den Motoren nicht direkt verbrannt werden kann, wird dieses zuerst im LNG-Vaporizer verdampft und im nachgeschalteten Fuel

Gas Heater erhitzt. Typische Dual Fuel Motoren erwarten einen Gasdruck von ca. 5 barg an der GUV (Gas Valve Unit – Gasregelstrecke am Motor) und eine Fuel Gas Temperatur von +5°C bis etwa +45°C. Als Wärmequelle für Verdampfer und Heater dient ein Wasser Glycol System, das seinen Wärmebedarf aus dem Maschinenkühlwasser bezieht.

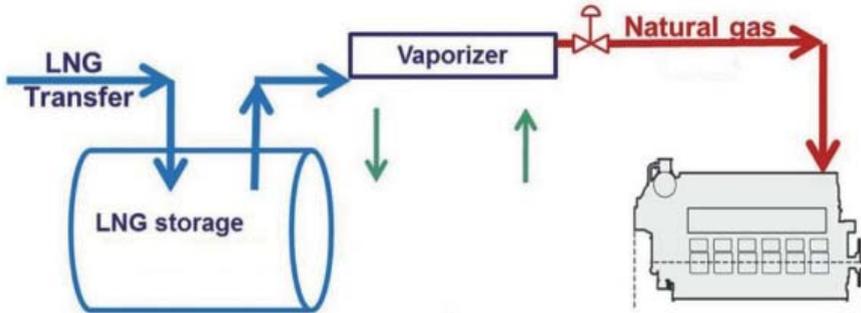


Abb. 3: Basiskomponenten Fuel Gas System

Das Fuel Gas System am Beispiel der Mega-Yacht sieht einen Tank-Auslegungsdruck von bis zu 10 barg vor. Eine Komponente bestehend aus beispielsweise einer kleinen In-Tank-Pumpe fördert eine kleine LNG Menge zum Tankverdampfer. Das dort verdampfte Gas dient der Erhöhung des Drucks in der Gasphase. Der Druck fördert dann das LNG zum eigentlichen LNG-Verdampfer und Fuel Gas Heater. Prinzipiell kann hier zur Verminderung des Tankdrucks auch Boil Off Gas (BOG) direkt zum Verbrauch der Motoren zugeführt werden. Jedoch ist der Druck in der Gasphase – der leicht oberhalb des Drucks liegt, der an der GUV benötigt wird – notwendig, um das

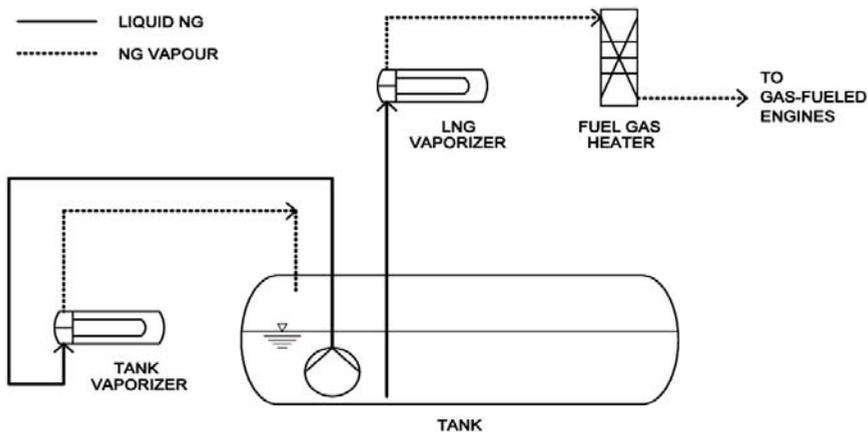


Abb. 4: Beispiel Fuel Gas System Mega-Yacht

Fuel Gas System zu versorgen. Der Vorteil dieses Systems ist, dass größere Lastschwankungen über das Druckpolster der Gasphase kompensiert werden können. Der dafür nötige relativ hohe Tank-Designdruck und die damit verbundenen Materialstärken machen dieses System jedoch bei größeren Tankkapazitäten unwirtschaftlich.

Das Fuel Gas System, welches beispielsweise für die Ro-Pax Fähre und das Kreuzfahrtschiff in Frage kommt, sieht auf Grund der größeren Tankkapazität einen Tank-Auslegungsdruck von ca. 4 barg vor. Der geringe Tankdruck reicht jedoch nicht aus, um das Gas über den statischen Druck zu den Motoren zu fördern. Eine In-Tank-Pumpe sorgt für die entsprechende Druckerhöhung und fördert die komplette LNG-Menge zum LNG-Vaporizer und Fuel Gas Heater.

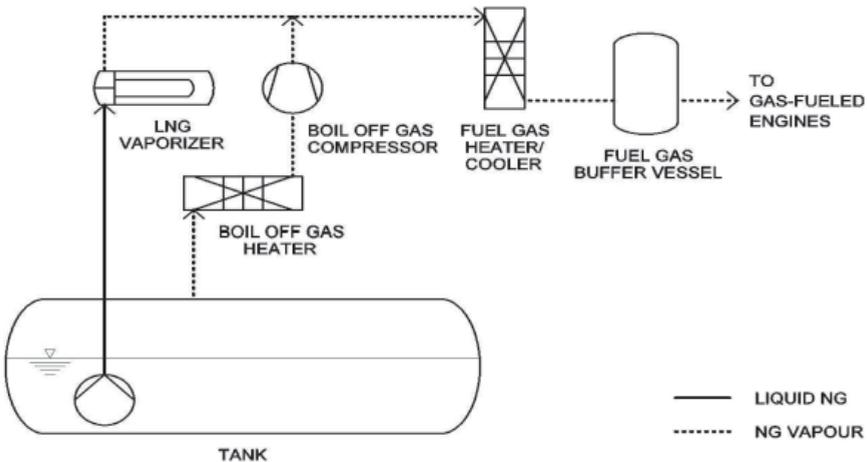
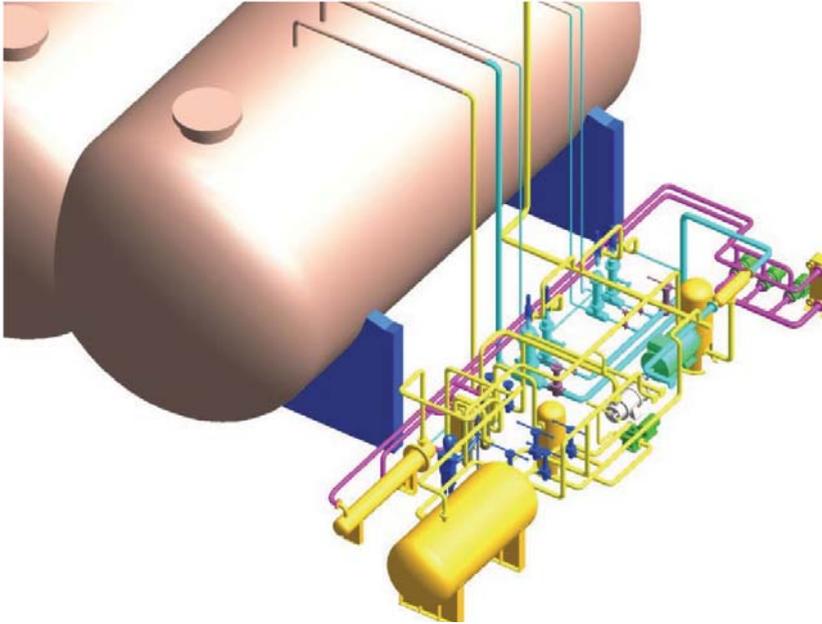


Abb. 5: LNG Fuel Gas Systems – Beispiel Ro-Pax, Kreuzfahrtschiff

Auf Grund des geringen Tank-Auslegungsdrucks muss zusätzlich ein BOG-Kompressor vorgesehen werden, welcher das BOG zu den Motoren fördern kann. Um mögliche Lastschwankungen der Motoren abfangen zu können, muss gegebenenfalls ein Gas-Pufferbehälter vor der GUV vorgesehen werden.

### Lagerung an Bord

Grundsätzlich eignen sich auch die selbsttragenden Tanks vom Typ A und Typ B für den Einsatz bei Fuel Gas Systemen. Jedoch sorgt der technisch bedingte geringe Auslegungsdruck von <math><0,7\text{ barg}</math> dafür, dass entstehendes BOG nicht im Tank gehalten werden kann. Somit muss auch bei abgeschalteter Maschine eine permanente Abnahme des BOG sichergestellt sein.



*Abb. 6: System Beispiel Ro-Pax Fähre mit Boil Off Gas Compressor und Buffer Vessel*

Typ C Tanks sind durch ihren Auslegungsdruck von 4 bis 10 barg derzeit die bevorzugte Lösung für Fuel Gas Tanks. Hier ist keine zweite Barriere notwendig (wie beispielsweise beim Typ A oder Typ B Tank). Boil Off Gas kann bis zum Auslegungsdruck im Tank gehalten werden. Als Nachteil erweist sich lediglich der größere Platzbedarf durch die zylindrische Bauform.



*Abb. 7: Zylindrischer Typ-C Tank*

## Integration der Gasanlage in 3 Schiffsentwürfe

### Passagierschiff

Das von der MEYER WERFT im Rahmen von GasPax konzipierte gasgetriebene Kreuzfahrtschiff bietet Platz für 2000 Passagiere und 550 Crewmitglieder auf einer Gesamtlänge von 240m. Vier Dual-Fuel-Motoren mit je einer Leistung von 9MW erzeugen Strom für den Antrieb des Schiffes mit elektrischen Fahrmotoren sowie für den gesamten Hotelbetrieb. Die Tankkapazität von ungefähr 1200m<sup>3</sup> LNG und knapp 1000m<sup>3</sup> MGO sind für eine 10- bis 14-tägige Kreuzfahrt ausreichend. An Bord sind zwei Maschinenräume installiert, in denen jeweils zwei der Motoren untergebracht sind. Hierdurch ist zum Einen ein redundanter Antrieb vorhanden, zum Anderen werden zusammen mit der räumlichen Trennung der Kraftstofftanks die Anforderungen von Safe Return to Port erfüllt.

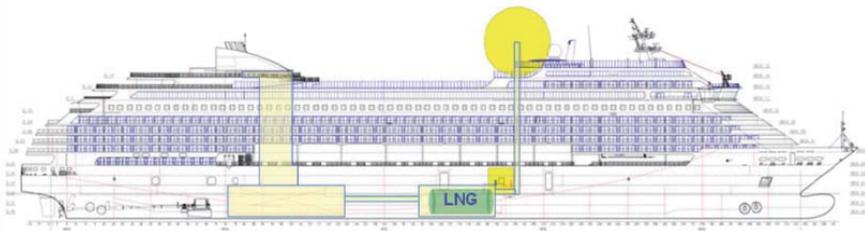


Abb. 8: Übersicht der LNG-Anordnung

An Bord befinden sich zwei Bunkerstationen, von denen sich jeweils eine an Back- und Steuerbord befindet. In ihnen werden tieftemperaturbeständigen Materialien eingesetzt, um eine Beschädigung der Schiffstruktur durch während des Bunkerns auftretende Leckagen zu vermeiden. Eine Luftschleuse zur Bunkerstation verhindert eine Gasausbreitung in die umgebenden Crewbereiche.

Als LNG-Tanks wurden Typ C-Tanks eingesetzt, die auf einen Designdruck von 4,5barg ausgelegt sind. Die zwei in Schiffslängsrichtung installierten Tanks sind jeweils in einem eigenen, gasdichten und nicht belüfteten Tankraum unterhalb der Passagierdecks und innerhalb der Crew- und Versorgungsdecks untergebracht. Ein Zugang ist nur über den durch Luftschleusen abgesicherten Gasaufbereitungsraum möglich, der sich zwischen den beiden Tankräumen befindet. Im Gasaufbereitungsraum wird das Gas für die Verbrennung in den Motoren durch Verdampfen und Druckerhöhung vorbereitet. In diesem Raum wird nur ex-geschützte Ausrüstung eingesetzt. In den Maschinenräumen sind Gas Valve Units installiert, die die Motoren mit dem im jeweiligen Betriebspunkt benötigten Gasdruck versorgen.

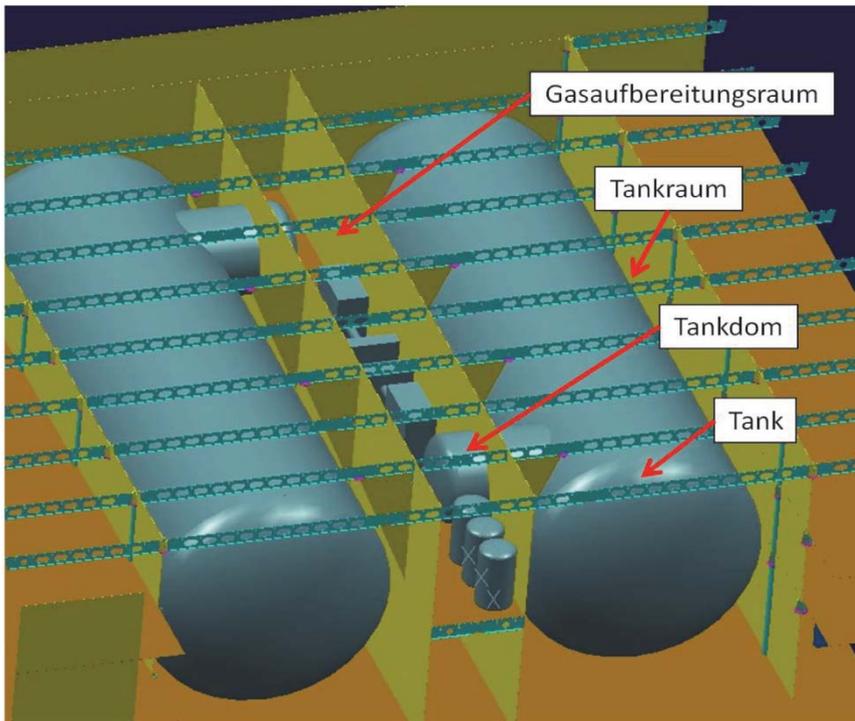


Abb. 9: Übersicht Tankanordnung

Die Belüftung der durch Gasauftreten gefährdeten Bereiche ist von der restlichen Belüftung des Schiffes getrennt ausgeführt. Die Abluft sämtlicher Bereiche wird über den im Schiff integrierten Ventilationsschacht an die Umgebung oberhalb des Sonnendecks abgegeben. In diesem Schacht sind weiterhin die Abblaseleitungen der Tanksicherheitsventile integriert, deren Austritt im Abstand von 10m von möglichen Zündquellen des Schiffes angeordnet ist.

Bezugnehmend zur Havarie des Kreuzfahrtschiffs Costa Concordia im Frühjahr 2012 vor der Küste Italiens wurde der Entwurf mit allen Projektpartnern einer erneuten Prüfung unter Berücksichtigung der Havarie unterzogen. Ergebnis der Untersuchung ist, dass das Design an sich keinerlei Probleme bereitet, jedoch eine Art Havarieplan vorhanden sein sollte, der unter anderem die Position und Erreichbarkeit der Tanks beinhaltet, Möglichkeiten der Druckentlastung vorsieht sowie Verhaltenshinweise für die Bergungsmannschaften enthält.

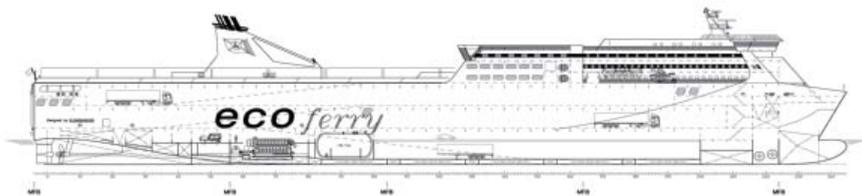
Mit Hilfe des durchgeführten Projekts wurde viel Erfahrung gesammelt, ein Kreuzfahrtschiff mit einem Gasantrieb auszurüsten. Im Rahmen der mit den Projektpartnern durchgeführten Sicherheitsuntersuchungen (HAZID, FMEA)

konnte gezeigt werden, dass ein mehr als ausreichend hohes Niveau an Sicherheit mit dem dargestellten Design erreicht werden kann. Ungeklärt geblieben ist das exakte Vorgehen beim Bunkern des LNGs, hier fehlen zum Einen Vorschriften und behördliche Vorgaben, zum Anderen ist die Bunkerinfrastruktur für LNG noch nicht so weit ausgebaut, dass eine weltweite Operation eines gasgetriebenen Kreuzfahrtschiffs derzeit problemlos möglich wäre.

### **Ro-Ro Passagierschiff**

Das Grundkonzept des Schiffsentwurfs wurde zunächst geprägt durch die Einhaltung der aktuellen Vorschriftenlage in Bezug auf die Leckrechnung (SOLAS und Stockholm Agreement) sowie den seit 1. Juli 2010 geltenden Vorschriften zu Safe Return to Port. Für die Auslegung der Tanks und Gasanlage wurden die „MSC 285(86) Interim Guidelines on safety for natural gas fuelled engine installations in ships“ herangezogen.

Im Vergleich zu den herkömmlichen fossilen Kraftstoffen benötigt LNG einen ca. 4-fachen Raumbedarf, um die notwendige Kraftstoffmenge bevorraten zu können. Als Kompromiss wurde eine Tankgröße gewählt, die einen Bunkerzyklus von einer Woche ermöglicht (statt üblicherweise 3-4 Wochen). Dabei ist aber noch der Verlust von 32 Spurmetern hinzunehmen.



*Abb. 10 : Seitenansicht der FSG eco.ferry*

Für den Antrieb wurde ein konventioneller Antrieb gewählt. Zwei Hauptmaschinen treiben über jeweils ein Getriebe die Verstellpropeller an. Die elektrische Versorgung für den Hotel und Schiffsbetrieb geschieht über zwei Hilfsdiesel und Wellengeneratoren.

Für alle Dieselmotoren wurden Dual-Fuel-Motoren gewählt. Somit wird das Schiff mit drei Brennstoffsystemen ausgerüstet: einem Gassystem, einem Pilotfuelsystem für die Zündung im Gasbetrieb und mit einem Dieselölssystem wie bei herkömmlichen Schiffen.

Für die Gasversorgung wird ein LNG-Tank vor dem Maschinenraum eingebaut mit ausreichendem Abstand zur Außenhaut entsprechend der anzuwendenden Interim Guidelines der IMO. Beim Tank handelt es sich um einen Bi-lobe-Tank. Diese Form zweier ineinander geschobener Zylinder kann den

Raum, den der untere Ladedeckbereich bietet, besser ausnutzen. Der Tank ist ein Typ-C Tank mit Isolierung. Der Tankraum ist im normalen Betrieb nicht zugänglich und ist mit trockener Luft beaufschlagt. Die Tankventile befinden sich im angrenzenden Gas Handling Room (GHR). Der Raum unter der Rampe zum unteren Laderaum wird für die Unterbringung von Komponenten zur Verdampfung und zum Erhitzen des Gases benutzt.

Nach dem Verdampfen und Erhitzen wird das Erdgas zu den Gasregelstrecken im Gas Valve Unit Raum (GVU-Raum) geführt. Hier befinden sich die Gasregelstrecken und Absperrventile der Verbraucher (Hauptmaschinen, Hilfsdiesel, Hilfskessel). Der GVU-Raum darf sich nicht zu weit von den Verbrauchern befinden und von den GVUs wird das Gas dann zu den Maschinen geführt.

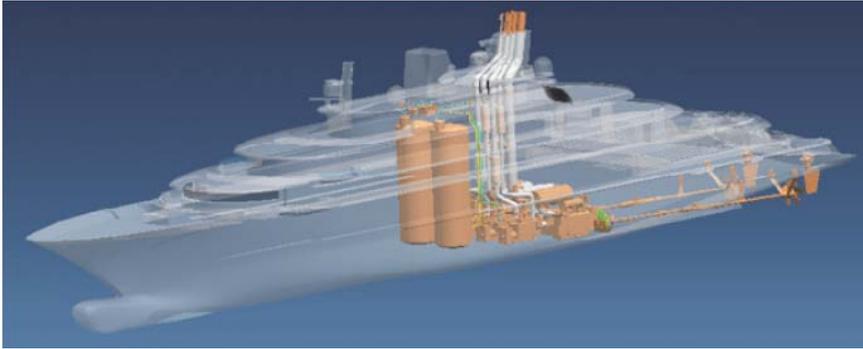
Um die Risiken eines eventuellen Gasaustritts zu minimieren, werden alle gasführenden Rohrleitungen in doppelwandigen Rohren oder in Schächten geführt. Die Zwischenräume werden mit 30-fachem Luftwechsel belüftet. Der Zugang zum GHR und GVU-Raum geschieht über jeweils eine Luftschleuse und für beide Räume ist ebenfalls ein 30 fache Luftwechsel vorgesehen.

Weitere Sicherheitseinrichtungen sind Gasdetektoren und Feuerlöscheinrichtungen für die relevanten Räume. Beim Gasaustritt wird die Gaszufuhr automatisch gestoppt und die Dieselmotoren mit Dieselöl weiter betrieben.

### **Mega Yacht**

Ursprünglich wurde ein Konzept auf Basis des Brennstoffes LPG verfolgt, da hier Vorteile bezüglich der Handhabung und der weltweiten Verfügbarkeit unterstellt wurden. Dieser Ansatz musste jedoch nach kurzer Zeit fallengelassen werden, da keine geeigneten Motoren verfügbar waren und nicht zu erwarten ist, dass mittelfristig entsprechende Aggregate für maritime Anwendungen entwickelt werden.

Das entwickelte Yachtkonzept gemäß Abb. 11 basiert auf einem vorhandenen Yachtentwurf, der modifiziert wurde und mit einer zusätzlichen LNG-Gasanlage ausgestattet wurde. Die Yacht wurde um knapp 8 Meter verlängert, um Platz für Gaskomponenten zu schaffen und um 1 Meter verbreitert, um die Stabilitätskriterien zu erfüllen. In der neu geschaffenen Sektion wurden zwei senkrechtstehende Typ C-Tanks mit einer Kapazität von je 180 m<sup>3</sup> eingebracht sowie der Gasaufbereitungsraum, die Bunkerstation und ein belüfteter Kanal für sämtliche Rohrleitungen untergebracht. Die ursprünglichen Motorenräume wurden derart modifiziert, dass Dual-Fuel-Motoren integriert werden konnten. Entsprechend der Interim Guideline MSC 185(86) wurde das Belüftungssystem angepasst und Sicherheitssysteme wie Gasmelder, Feuermelder, Feuerlöschsystem, etc. integriert.



*Abb. 11: Konzeptentwurf einer Megayacht mit LNG-Antrieb*

Wesentliche Unterschiede zu den Entwürfen der beiden anderen Werften sind die Ausrichtung der Tanks sowie die Art der Förderung des LNG aus den Tanks. Die senkrechte Anordnung der Tanks wurde gewählt, da die Tankgröße die typischen Sektionsabmessungen überschreitet und eine waagerechte Installation signifikante Änderungen am Basisentwurf zur Folge gehabt hätte. Außerdem war zum Zeitpunkt der Entwurfsphase im damalig vorliegenden Entwurf des IGF-Codes die Anordnung von Tanks unterhalb von Passagierbereichen untersagt. Vorteilhaft ist ebenfalls, dass nur sehr kurze Belüftungskanäle für den Gasaufbereitungsraum benötigt werden und ebenfalls die Abblaseleitung sehr kurz ausgeführt werden kann. Bei dem Entwurf des Kreuzfahrers und des Ro-Pax-Schiffes sind Pumpen im Tank installiert, die das LNG zu einem Verdampfer fördern. Bei dem Yachtentwurf wird der Tank bei einem Betriebsdruck von 5-6 bar betrieben, so dass das LNG aus dem Tank herausgedrückt wird. Ein nachträglicher Kompressor und Pufferspeicher kann somit entfallen. Bei großen Tanks ist dieses Prinzip aufgrund der benötigten Wandstärken nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar.

Im Rahmen von CFD-Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass im Falle einer Gasleckage im Maschinenraum zündfähiges Gemisch nur sehr kurzfristig (wenige Sekunden) auftritt. Im simulierten Fall konnte zündfähiges Gemisch im Abluftschacht zu keinem Zeitpunkt registriert werden. Darüber hinaus wurde untersucht wie sich eine Gaswolke ausbreitet, wenn sich das Tanksicherheitsventil bei maximalem Tankdruck öffnet und Gas über den Abblasemast austritt. Aufgrund des kurzen Abblaserohres kann ein kleiner Rohrdurchmesser gewählt werden, ohne einen zu hohen Gegendruck zu erzeugen. Dadurch werden sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten erreicht, die das Gas weit nach oben treiben und eine schnelle Vermischung mit der Luft bewirken. In den untersuchten Fällen ist das Gas stets nach oben gestiegen und niemals nach unten gesunken. Der Germanische Lloyd hat ähnliche Berechnungen für den Entwurf der Meyer Werft mit anderen Randbedingungen durchgeführt, wobei hier Situationen entstanden sind, bei denen Gas

nach unten gesunken ist und sich dort kurzzeitig (einige Sekunden) gesammelt hat, bevor es sich mit der Luft vermischt hat. Wesentliche Unterschiede bestanden in den Annahmen der der Luft- und Gastemperaturen sowie der Strömungsgeschwindigkeit des Gases. Für einen konkreten Entwurf müssen daher die Randbedingungen im Einzelfall festgelegt werden und es muss die Ausbreitung des Gases berechnet werden.

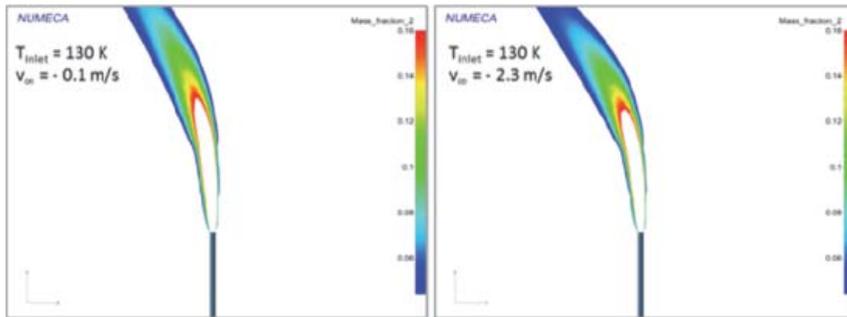


Abb. 12: CFD-Berechnung des Gasaustrittes am Abblasemast

## Sicherheitsuntersuchungen

Im Rahmen des GasPax Vorhabens sind für die verschiedenen, gasbetriebenen Schiffsentwürfe Sicherheitsanalysen durchgeführt worden, welche sich in zwei Schritte unterteilen lassen. Für den Schiffsentwurf ist bereits in einem frühen Designstadium jeweils eine Hazid und für das finale Design eine Failure Mode and Effects Analysis durchgeführt worden. Darüber hinaus wurden sicherheitstechnische Untersuchungen wie CFD-Simulationen des Abblasemastes für den Schiffsentwurf der Meyer Werft durchgeführt.

Gemäß der MSC.285(86) müssen für neuartige Antriebskonzepte mit Gas als Schiffsbrennstoff sicherheitstechnische Untersuchungen durchgeführt werden, wobei anerkannten Methoden für diese Analysen zur Anwendung kommen sollen. Die Risiken, die durch die Nutzung von Gas als Schiffsbrennstoff entstehen können, sollen dabei adressiert werden. Die Vermeidung von Risiken mittels entsprechender Sicherheitseinrichtungen kann anhand solcher Untersuchungen nachgewiesen werden.

Die Hazid stellte im Rahmen des GasPax Projektes den ersten Schritt zur sicherheitstechnischen Bewertung der Gasantriebsysteme dar. Ziel der Hazid war die Identifikation von Gefahren bezüglich dieses neuartigen Brennstoffes bzw. die vorgesehenen Sicherheitseinrichtungen auf ihre Eignung zu überprüfen. Während der entsprechenden Hazid-Sitzungen wurden darüber hinaus Verbesserungsvorschläge für die entsprechenden Designs erarbeitet, um eventuelle Gefahren ausschließen zu können. Des Weiteren wurden die Anforderungen der MSC.285(86) in den entsprechenden Besprechungen in-

terpretiert bzw. Alternativen mit einem vergleichbaren Sicherheitsniveau entwickelt. Diese Interpretationen der MSC.285(86) wurden in den sog. Rule Notes zusammengefasst und stehen unter <http://www.gl-group.com/en/gl-focus-regulatory-technical-update.php> zur Verfügung.

Die Grundlage für die detaillierte, sicherheitstechnische Bewertung des finalen Antriebskonzeptes stellt die Failure Mode and Effects Analysis dar. Die FMEA ist eine Systematik zur Durchführung halb quantitativer Risikoanalysen, welche verdeckte Fehler und deren mögliche Auswirkungen, sowie mögliche Maßnahmen zu deren Vermeidung aufzeigt.

Im Rahmen der FMEAs standen mögliche LNG Leckagen bzw. mögliche Gasaustritte von Komponenten des Gasantriebssystems im Fokus, wobei nur einzelne Fehlerfälle und keine Fehlerverkettungen untersucht wurden. Für die einzelnen Schiffsentwürfe wurde diese Analyse für den normalen Gasbetrieb bzw. für das Bunkern durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 130 mögliche Fehlerfälle für jeden Schiffsentwurf untersucht. Insgesamt haben die Sicherheitsanalysen gezeigt, dass einzelne Fehlerfälle zu keiner kritischen Situation an Bord der Schiffe führen können. Unter Berücksichtigung der im Rahmen der FMEAs erarbeiteten Verbesserungsvorschläge können die Gasantriebssysteme sicher an Bord der Schiffsentwürfe auf Basis der untersuchten Systeme betrieben werden.

Die von den Werften entwickelten Schiffsentwürfe weichen in einigen Gesichtspunkten von den Anforderungen der 2009 veröffentlichten MSC.285(86) ab, wobei durch die Hazids bzw. FMEAs ein entsprechendes Sicherheitsniveau nachgewiesen werden konnte. Die erarbeiteten Erkenntnisse des Gas-Pax Projektes sind in Rahmen der IGF-Code Entwicklung präsentiert sowie integriert worden. Dies hat dazu beigetragen, dass auf Basis der während der Projektlaufphase von BLG erarbeiteten Interpretation zur MSC.285(86) bzw. des aktuellen Entwurfes des IGF-Codes die Realisierung der erarbeiteten Schiffsentwürfe möglich ist.

### **Vorschriftenerfüllung bzgl. Klimawandel und Emissionen**

Die derzeitige Planung der IMO zielt darauf ab, ab 1. Januar 2015 den EEDI<sup>1</sup> auch für Ro-Ro Passagierfähren und Passagieschiffe einzuführen. Er gilt seit 1. Januar 2013 für einen relevanten Teil von Schiffstypen wie Containerschiffe, Bulker, Tanker etc. und soll zu einer Reduzierung der Treibhausgase durch die Schifffahrt beitragen. Die Schifffahrt trägt ca. 3% zu den weltweiten

---

<sup>1</sup> Resolution MEPC.212(63) 2012 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships

CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Die Verwendung von LNG führt hier zu einem erheblichen Vorteil gegenüber herkömmlichen fossilen Kraftstoffen, da die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Umwandlungsfaktor von Fuel to Carbon von 2,75 ermittelt werden statt mit 3,114 - 3,206. Darüberhinaus ist der spezifische Brennstoffverbrauch geringer bei LNG auf Grund der höheren Energiedichte. Zusammen ergibt sich ein Vorteil von ca. 26% für LNG gegenüber herkömmlichen fossilen Brennstoffen. Schiffe mit LNG-Antrieb erfüllen die kommenden Anforderungen in den Emission Controlled Areas und würden auch bei zukünftiger Einführung einer Obergrenze für Russ und/oder Feinstaub keinerlei Abgasnachbehandlung erfordern.

## **Zusammenfassung**

Das Ziel des Vorhabens wurde vollständig erreicht. Die notwendige Kompetenz zum schnellen und zielgerichteten Entwurf von Schiffen für Brennstoffe mit niedrigem Flammpunkt ist nunmehr vollständig vorhanden. Dabei hat sich gezeigt, dass LNG die aussichtsreichste Lösung darstellt und vermehrt von Kunden auch nachgefragt wird. Daher sind die deutschen Werften nunmehr in der Lage, Angebote kompetent und entsprechend der aktuellen Sicherheitsrichtlinien zu erstellen. Obwohl sich die Verabschiedung des IGF-Codes wohl noch ein wenig verzögern wird, haben insbesondere die durchgeführten FMEAs die Möglichkeiten aufgezeigt, alternative Lösungen zu entwickeln und über das Prinzip des Nachweises der sicherheitstechnischen Gleichwertigkeit eine prinzipielle Genehmigung zu erhalten. Dies ist ein entscheidender Wettbewerbsvorteil.

Das Konsortium hat wichtigen Input zur Entwicklung des IGF-Codes bei der IMO geleistet. Dabei ging es in erster Linie darum, deterministische Vorschriften an diejenigen Stellen durch alternative Lösungen zu ergänzen, wo aus der Sicht des Schiffsentwurfs erhebliche wirtschaftliche Nachteile für die Werft bzw. den Reeder entstehen. Dies ist insbesondere zu Fragen der Lagerung von LNG-Tanks unterhalb der Accomodation Area und der Berücksichtigung der B/5 Eindringtiefe aus der Leckrechnung gelungen, aber auch in Bereichen wie der Anordnung von Notausstiegen.

Aus umweltpolitischer Sicht ist LNG den bekannten fossilen Brennstoffen weit überlegen. Allerdings sind die Markteintrittsbarrieren sehr hoch wegen der fehlenden Infrastruktur, des kaum existierenden Marktpreises sowie mangelnden finanziellen Anreizen, die den erheblich geringeren externen Kosten<sup>2</sup> bei der Verwendung von LNG entsprechen würden.

---

<sup>2</sup> Externe Kosten sind diejenigen von der Allgemeinheit zu tragenden Kosten auf Grund der umwelt- und gesundheitsschädlichen Wirkung der Emissionen

Im Nachgang zum Vorhaben sind die entstandenen Entwürfe hervorragend geeignet, um die unterschiedlichen Lebenszykluskosten zu bewerten und so die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu identifizieren, unter denen eine LNG-Lösung den „end-of-the-pipe“ Lösungen überlegen ist. Eine zusätzliche Erweiterung in Richtung einer ganzheitlichen ökologischen Bilanzierung, auch unter Einbeziehung von externen Kosten, wäre dabei wünschenswert.

# **CView – Unterwasserinspektion von Schiffshüllen, Piers und Anlegestellen durch autonome Unterwasser-Fahrzeuge**

Jörg Kalwa (ATLAS ELEKTRONIK); Jan Christian Albiez (DFKI-RIC); Dieter Kraus (IWSS); Franz-Josef Becker (IBMT); Marco Jacobi (FhAST)

## **Abstrakt**

Das Fördervorhaben CView (Förderkennzeichen 30SX262) endete nach etwas mehr als dreijähriger Laufzeit am 30. September 2012. In dem Projekt entwickelten fünf Verbundpartner Methoden für ein System zur Inspektion von Unterwasserbauten und Hafenanlagen. Dieser Bericht ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens.

## **Einleitung**

Häfen und Wasserwege sind trotz zunehmenden Luftverkehrs weiterhin die Nervenzentren der internationalen Logistiknetzwerke. In der EU wird nahezu der gesamte Außenhandel der Gemeinschaft und fast die Hälfte des Binnenhandels über die mehr als 1200 Seehäfen in den Küstenmitgliedstaaten der EU abgewickelt. So stellt die Europäische Organisation der Seehäfen (ESPO) fest, dass „die EU ohne ihre Seehäfen schlichtweg nicht funktionieren kann“ ([www.espo.be](http://www.espo.be)). In den nächsten Jahren werden noch erhebliche Steigerungen der Mengen erwartet. Ein reibungsloser Verlauf dieser Güterumschläge und Personentransporte – gesichert durch hohe technische Sicherheit und Funktionalität – ist somit von wachsender wirtschaftlicher Bedeutung.

Die Sicherheit von Häfen und ihrer Infrastruktur wird gleich zweifach bedroht: durch Verschleiß oder technische Mängel der Anlagen (Bedrohung der Port Safety) oder durch kriminelle Aktivitäten, die von Schmuggel bis zu Terrorismus reichen (Port Security). Zur Minimierung dieser Risiken werden heutige Kontrollen und Inspektionen überwiegend von Tauchern durchgeführt, die aufgrund der extrem schlechten visuellen Verhältnisse unter Wasser häufig nur tastend arbeiten können. Die daraus resultierenden Inspektionszeiten und Probleme müssen hier sicherlich nicht näher beleuchtet werden.

Das Hauptziel des Vorhabens CView war daher, eine sichere, autonome Inspektion von Schiffen und Unterwasserbauwerken in hoher Qualität und Sicherheit zu ermöglichen. Durch einen hohen Automatisierungsgrad sollten

Tauchergruppen entlastet werden, indem ihnen ein Werkzeug zur Optimierung ihrer Arbeiten an die Hand gegeben wird. Typische CView Anwendungsgebiete wären z. B.:

- Überwachung von Spundwänden hinsichtlich möglicher Schäden, sowohl nach der Einrichtung als auch kontinuierlich.
- Inspektion von Schleusentoren und deren Mechanik bezüglich Verschleißerscheinungen, Verschmutzungen und Störungen.
- Inspektion von Wallanlagen und Uferböschungen, auch im Bereich von Wasserstraßen.
- Inspektion von Fundamenten von Wasserbauwerken, u. a. auch Offshore-Windkraftanlagen.

Gerade im letzten Punkt ergibt sich derzeit ein besonderes Anwendungspotential, da bis heute ein schlüssiges Konzept zur Überwachung der Gründungsstrukturen von Windparksanlagen fehlt.

### **Konzept des Inspektionssystems**

Für die Inspektion von Offshore-Strukturen in der Öl- und Gasindustrie haben sich in den letzten Jahrzehnten ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (ROVs) etabliert. Größere Wege, wie sie in Hafengebieten erforderlich wären, können aber wegen der begrenzten Kabellänge und dessen hydrodynamischen Verhalten nicht zurückgelegt werden. Darüber hinaus ist der Einsatz bei Strömung fast unmöglich.

Anders stellt sich die Sachlage bei den autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) dar, die ohne hinderliche Kabel und externen Führung operieren können. Diese Fahrzeuge werden heute eingesetzt, um mittels Sidescan Sonar große Flächen zu untersuchen. Dabei ergibt sich durch das Sidescan-Sensorprinzip eine Einschränkung auf horizontale Ebenen. Teilweise werden auch Multibeam Echosounder eingesetzt, die es erlauben, die Entfernung zwischen Boden und Fahrzeug in einem gewissen Winkelbereich zu vermessen. Daraus lässt sich ein Höhenprofil des Bodens gewinnen. Es liegt nahe, für die hier angestrebte Inspektion vertikal ausgedehnter Flächen auf diesem Stand der Technologie aufzubauen.

Die Aufgabe des Vorhabens CView ist daher die Lösung der beschriebenen Problemfelder durch eine Inspektion von Unterwasserstrukturen mit Hilfe unbemannter autonome Unterwasserfahrzeuge. Dies kann durch die Entwicklung einer multifunktionalen Sensoreinheit erreicht werden, welche an AUVs

angebracht werden und der Erkennung von Anomalien dienen kann. Als Anomalien gelten hierbei Verformungen von Strukturen und unbekannte Gegenstände jeglicher Art.

Um den geforderten Detailgrad trotz gewisser Trübung des Wassers zu erreichen, sollen optische Erkennungsverfahren auf Basis von Online-Bildverarbeitung und Laserprojektionsverfahren in Kombination mit einem akustischen Multibeam-Sonar zum Einsatz kommen. Erkannte Anomalien sollen on-board auf dem System gespeichert werden und können so nach dem Ende der Inspektion durch einen Operator eingesehen und überprüft werden. Um das Mess-System der Neigung der zu inspizierenden Flächen anpassen zu können, wird es auf einer Schwenk-Neige-Einheit platziert. Dies ermöglicht in gewisser Weise auch einen Ausgleich der Bewegungen des Trägerfahrzeugs und erlaubt so eine feinere Inspektion von Details.

### **CView**

Das Projekt CView wurde aufgrund der komplexen technischen Herausforderungen vom BMWI als Verbundprojekt von fünf Partnern unter der Koordination der Atlas Elektronik GmbH gefördert. Die Partner und ihre wesentlichen Teilaufgaben waren:

#### **Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik, St. Ingbert, Teilprojekt: „CSonic“**

- Entwicklung eines hochauflösenden Multibeam-Echosounders (MBES) zur 3d-Sonarbilderstellung

#### **Institut für Wasserschall, Sonartechnik und Signaltheorie (IWSS), Bermen, Teilprojekt: „CImaging“**

- Auswertung der MBES-Daten und automatische Erkennung von Objekten.

#### **DFKI Bremen, Robotics Innovation Center, Bremen, Teilprojekt: „CSurvey“**

- Entwicklung des Multifunktions-Sensorkopfes,
- Entwicklung der Videoanlage u. Laserprojektor,
- Integration des IBMT-Multibeam-Sonars,
- Automatische Auswertung der Daten.

## **ATLAS ELEKTRONIK GmbH, Bremen, Teilprojekt: „CCarrier“**

- Erarbeitung eines hoverfähigen Unterwasserfahrzeuges als Erprobungsträger mit notwendigen Navigations-, Regelungs- und Kommunikationssystemen
- Integration aller Komponenten in den Sensorträger.

## **Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau (FhAST), Ilmenau, Teilprojekt: „CGuide“**

- Methoden der automatischen Bahnführung und Regelungsstrategien

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Teilprojekte dargestellt.

### **Teilprojekt: „CSonic“**

Die Wasserqualität in Häfen ist in der Regel deutlich schlechter als im offenen Wasser. Sind in der Ostsee noch Sichtweiten bis zu 2 m möglich, ist die Sichtweite in Nordseehäfen gleich Null. Soll hier eine berührungslose Inspektion erfolgen, kann diese Aufgabe nur mit einem hochfrequenten Sonar geringer Beambreite, d.h. hoher azimuthaler, vertikaler und radialer Auflösung, begegnet werden. Außerdem muss das Sonar-System zum Erreichen einer zufriedenstellenden Suchleistung einen hinreichend großen Sendesektor aufspannen, der empfangsseitig durch paralleles Beamforming schnell abgetastet werden kann.

Ziel des Teilvorhabens ist es deshalb ein den oben skizzierten Anforderungen genügendes Sonar-System zur 3dimensionalen akustischen Vermessung komplexer Geometrien zu entwickeln. Hierzu wurden in einem ersten Schritt die für die Inspektionsaufgabe optimalen Sonar-Parameter mit Hilfe eines Sonar-Performance-Modells herausgearbeitet. Auf Grundlage dieser Daten wurden die Sende- und Empfangsantennen, den Sendeleistungsverstärker, die Empfangsvorverstärker, die Analog/Digitalwandlung sowie die Beamforming-Hard- und -Software entwickelt.

Die besonderen Anforderungen des Vorhabens mussten in einer iterativen Entwicklung schrittweise erreicht werden. Es wurden nach den Simulationen auch in Hardware mehrere Wandlerdesigns getestet, bis das optimale Ergebnis erreicht war. Die entstandene Sonaranlage arbeitet im 1 MHz Bereich und besitzt 128 getrennte Kanäle für das Beamforming. Die notwendige Echtzeit-Datenverarbeitung erforderte eine vollständige Neuentwicklung der Elektronik mit hochintegrierten Chipsätzen. Diese hatten zum Teil noch keine

Serienreife (Beta-Teststand), was immer wieder zu großen Verzögerungen im Projekt führte. Letztendlich konnte das Sonar im Multifunktionskopf integriert und die gute Qualität im mehreren Versuchsfahrten nachgewiesen werden.

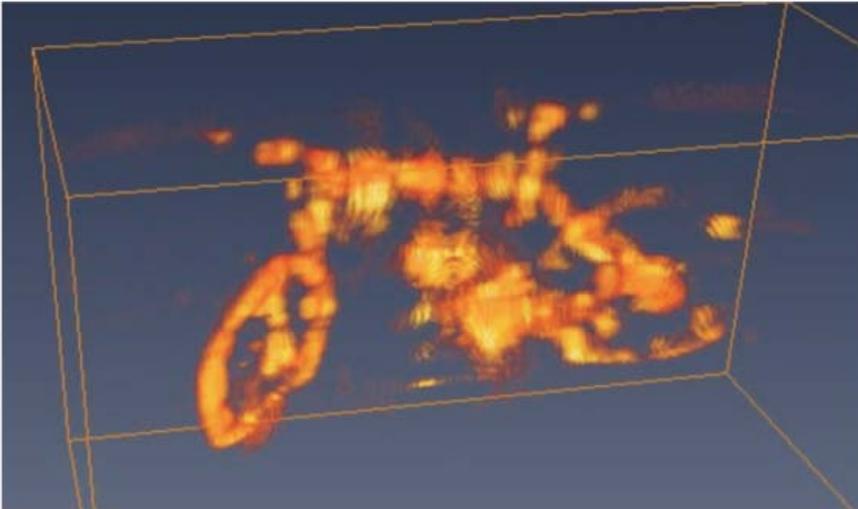


Abb.1: 3D-Rekonstruktion eines Fahrrades in ca. 3 m Entfernung

### Teilprojekt : „CImaging“

Für die entstehenden Sonar-Bilder war ein geeigneter Detektionsalgorithmus zu entwickeln. Ein automatisiertes Verfahren zur Anomalie-Detektion und Klassifikation besteht im Wesentlichen aus den Verarbeitungsschritten Entrauschen und Segmentieren der Sonar-Bilder sowie der Merkmalsextraktion und Klassifikation. Die Anwendung dieser Schritte auf das vollständige Sonar-Bild ist im Allgemeinen nicht realtime-fähig. Den aufwendigen Algorithmen ist deshalb ein zuverlässiger und schneller Screening-Prozess zur Vor-selektion relevanter Sonar-Bildbereiche voranzustellen, siehe nachfolgendes Blockschaftbild.

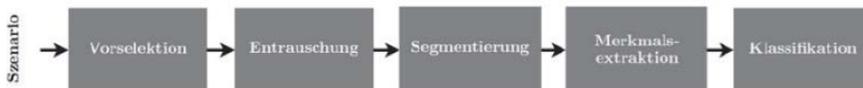


Abb.2: Ablauf des Klassifikationsprozesses von Sonardaten

Für die **Vorselektion** wurden Screening-Methoden basierend auf einem Template-Matching-Ansatz entwickelt die unter Ausnutzung von Integral-Image-Techniken rechenzeiteffizient implementiert werden konnten.

**Rauschen** in Sonardaten unterteilt man in additives und multiplikatives (Speckle-) Rauschen. Für beide Varianten wurden eine Vielzahl von Verfahren in simulierten und realen Daten verglichen und optimiert. Dazu gehören u. a. Bilateral-, Nonlocal Means- und BM3D-Filter sowie Varianten des Perona-Malik Filters, weiterhin die zu den Optimal-Filter-Ansätzen zählenden Kuan-, Enhanced Lee-, Enhanced Frost- und Gamma MAP-Filter und deren auf anisotroper Diffusion basierenden Erweiterungen, dem SRAD- und DPAD-Filter. In zahlreichen experimentellen Untersuchungen konnte herausgearbeitet werden, dass mit dem BM3D-Filter bzw. SRAD-/DPAD-Filter die effektivste Rauschunterdrückung für additiv bzw. multiplikativ gestörte Sonar-Bildern erzielt werden kann.



(a)



(b)



(c)

*Abb. 3: Beispiel für die Nutzung von Entropie zur Extraktion von Glanzlichtern: a) Input-Bild, b) extrahierte Kontur ohne Berücksichtigung von Entropie, c) Ergebnis unter Nutzung von Entropie*

Zur **Segmentierung**, d. h. zur Erkennung und Bestimmung von Strukturmerkmalen, eignen sich sogenannte Snake-Verfahren. Als Snake wird eine geschlossene Kurve bezeichnet, die sich der Kontur eines Objektes im Bild aufgrund eines Optimierungsprozesses anpasst. Snake-Algorithmen die auf statistischen gebietsorientierten Methoden basieren sind zu bevorzugen, wenn die Kontur eines Objekts nur schwer exakt beschrieben werden kann. Überdies können auch modelbasierte Ansätze zur Gewinnung der Kontur eines Objekts herangezogen werden. Hierzu wurden Lamé Kurven in Betracht gezogen und mit ihnen zwei Modelle entworfen, mit denen man in der Lage ist, über eine geeignete Wahl der Parameter die zu erwartenden Objekte abzubilden. Das Auffinden einer optimalen Kontur wurde durch Maximierung der zugrundeliegenden Log-Likelihood Funktion bzw. alternativ durch Minimierung eines geeigneten Energie-Funktionalis realisiert.

Eine direkte **Klassifikation** von Sonarbildern eines Objektes (Musters) ist wegen der großen Zahl von Abtastwerten (Bildpunkten), die einem Klassifikator zur Entscheidungsfindung zugeführt werden müssen, nahezu unmöglich. Der Klassifikation wird deshalb eine Merkmalsextraktion und -selektion vorangestellt. Für die Sonar-Bildanalyse haben sich geometrische, densitometrische, statistische und Textur-Merkmale als relevant erwiesen. Auf Basis dieser Merkmalstypen ist in einem ersten Schritt ein Pool von ca. 360 Merkmalen aufgebaut worden. In einem zweiten Schritt wurde dann ein Verfahren entwickelt und angewendet, das aus dem Merkmals-Pool einen Merkmalsvektor möglichst kleiner Dimension so auswählt, dass ein nachgeschalteter Klassifikator optimale Klassifikations-Ergebnisse erzielt. Als Klassifikatortypen kamen dabei alternativ der K-Nearest Neighbour (K-NN), der Dempster-Shafer K-NN, das Probabilistic Neural Network (PNN) und die Support Vector Machine (SVM) mit Gaußscher Kernfunktion zum Einsatz.

### **Teilprojekt : „CSurvey“**

Ziel des Teilprojektes CSurvey war die Entwicklung und Integration des Multifunktionskopfes (Pan-Tilt-Unit – PTU) und die Entwicklung und Verifikation des optischen Inspektionssystems. Die Anforderungen an die PTU waren die Unterbringung des optischen Systems und des CSonic Sonares in einer „Nase“ für das AUV, wobei das System so ausgelegt werden sollte, dass die Sensoren in zwei Freiheitsgraden geschwenkt werden können und so optimal in Richtung des Zieles während einer Inspektionsfahrt ausgerichtet werden können. In der PTU sollten außerdem alle Rechnersysteme untergebracht werden, die für die Verarbeitung der optischen und akustischen Daten notwendig sind. Die CSurvey PTU sollte sich so nahtlos in das modulare Payload System des Experimentalfahrzeugs einfügen.

Die Schwenkachsen der PTU wurden so angeordnet, dass die erste Achse mit der Längsachse des Trägerfahrzeugs zusammenfällt und die zweite Ach-

se senkrecht auf dieser steht. Damit können die Sensoren zur Seite des Fahrzeuges gedreht und der Neigungswinkel angepasst werden. Der Kopf wird durch DC-Motoren bewegt und die Positionen durch Absolutwertgeber gemessen. Alle Sensoren sind in einem kugelförmigen Teil untergebracht, damit die Strömungseigenschaften des AUVs nicht zu sehr beeinträchtigt werden. Die Rechner befinden sich im „röhrenförmigen“ Anschlussteil und werden nicht bewegt. Die PTU wurde im ersten Drittel des Projektes aufgebaut, integriert und getestet (siehe Abb. 4 links).

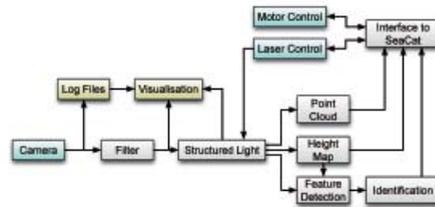


Abb. 4 (links) Die PTU am Portalkran des DFKI während der ersten Systemtests; (rechts) Die Steuerungsarchitektur der PTU

Das Steuersystem der PTU (siehe Abb. 4 rechts) wurde modular im DFKI eigenen Framework ROCK (<http://www.rock-robotics.org>) aufgebaut und über eine Netzwerkschnittstelle an das AUV System angeschlossen. In einem ersten Integrationstest mit dem Fahrzeug wurde die Eigenfrequenz des Gesamtsystems um die Rollachse bestimmt (0,5Hz) und die Motorsteuerung der PTU so angepasst, dass diese Frequenz vermieden wird. Die Steuerung der Motoren und das optische System sind auf dem ersten Rechner untergebracht, der zweite Rechner steht für die Sonarverarbeitung zur Verfügung. Die Kommunikation zum Trägerfahrzeug erfolgt über Ethernet.

Das optische System basiert auf ein Lasertriangulationsverfahren. Dabei wird mit einem grünen Laser (532nm Wellenlänge, 150mW optische Leistung) eine Linie auf das Inspektionsziel projiziert und von der Kamera (Prosilica GE1900C) aufgenommen. Durch ein online Triangulationsverfahren wird für alle Punkte auf der Linie der Abstand zum Fahrzeug bestimmt. Durch die Fahrzeugbewegung oder das Schwenken der PTU wird diese Linie zu einer 3D-Punktwolke erweitert. Die Position des Lasers und die Verarbeitungsalgorithmen wurden soweit optimiert, dass eine Erfassung der Umgebung mit einer Genauigkeit von 0,2mm bis zu einer Wassertrübung von 7FTU bei 1,5m Abstand möglich ist. Diese Werte sind deutlich besser als bei einem reinen Kamerasystem. Die Auflösung in Fahrtrichtung ist dabei von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges abhängig. In Abb. 5 ist die Punktwolke einer Spundwand im Sportboothafens Kiel-Schilksee dargestellt. Die Daten wurden während einer Versuchsreihe mit dem vollständigen System aufgenommen.

Die 3D-Punktwolke wird online in der PTU aufgebaut und durch einen Identifikationsalgorithmus untersucht. In diesem Algorithmus können zuvor die Daten von Objekten gespeichert werden. Während der Inspektion vergleicht das System die erfassten Daten mit den gespeicherten Daten, erkennt wenn die bekannten Objekte im Datenstrom auftauchen und signalisiert dies der Steuerung des Trägersystems.

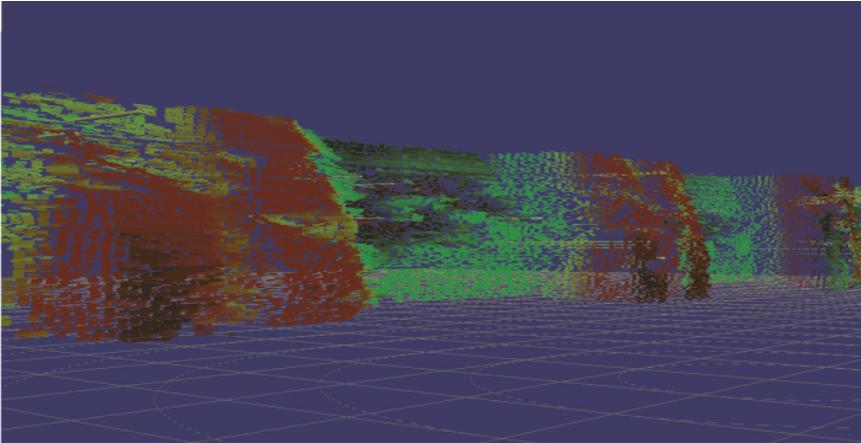


Abb. 5: 3D Punktwolke der Spundwand im Sportboothafen Kiel, aufgenommen durch die CSurvey Einheit

### Teilprojekt: „CCarrier“

Das Trägerfahrzeug für den Multifunktionskopf muss große Manövrierbarkeit aufweisen und die Missionen automatisiert durchführen können. Die Basis für ein solches Fahrzeug stellte der bei Atlas Elektronik vorhandene SeaWolf dar. Allerdings sollten die bekannten Einschränkungen dieses Fahrzeugs,

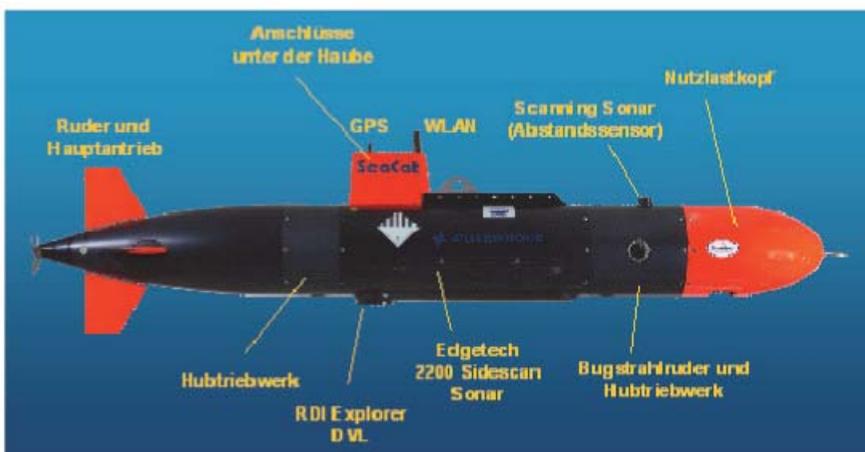
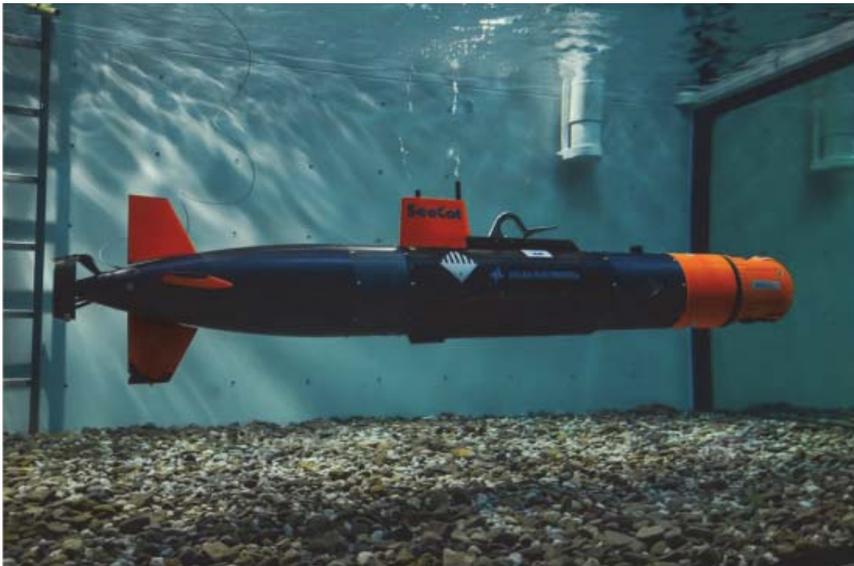


Abb. 6: Experimentalsystem „SeaCat“ Overview

wie z. B. geringe Ausdauer, großer hydrodynamischer Widerstand und hoher Stromverbrauch, durch entsprechende Modernisierungen beseitigt werden. Eine besonders auffällige Änderung des Designs betraf die Antriebseinheit. Die ehemals 4 Motoren des SeaWolfs wurden durch einen Einzelantrieb mit Ruderflächen ersetzt. Durch die gleichzeitige Einführung eines frontalen Bugstrahlruders und zweier Vertikaltriebe konnte die Manövrierfähigkeit beibehalten werden, während die Energieeffizienz um ca. 30% verbessert werden konnte. Weitere Effektivitätssteigerung ermöglichte der Umbau der Elektronik auf energiesparende und doch effiziente Computertechnik. Durch den bei der Miniaturisierung gewonnen Platz konnte eine weitere Batterie eingebaut werden. Insgesamt wurde die Ausdauer so von ca. 2 h auf 10 h gesteigert.

Auch die Software wurde den neuen Erfordernissen und den Anforderungen des Vorhabens angepasst. Das System ermöglicht ein sehr präzises Hovering, das sogar in einem Glastank am DFKI ein gesteuertes Tauchen ermöglichte. Abb. 7 zeigt das Fahrzeug mit integriertem Multifunktionskopf während der Trimmarbeiten im Tank.



*Abb. 7: Trägerfahrzeug mit Multifunktionskopf im DFKI Testtank II*

Zur Überwachung des Fahrzeugverhaltens bei Tauchgängen sowie zur Bedienung der verschiedenen Softwareanteile des Projektes und der Datenübertragung wurde eine zuverlässige Ethernet-Netzwerkverbindung mittels Lichtwellenleiter gefunden. Als nicht unerwünschten Nebeneffekt kann das AUV dadurch wie ein ROV ferngesteuert werden. Die Kabellänge beträgt bis zu 1000 m. Durch diesen Aufbau wurde erstmals ein echtes Hybrid-AUV realisiert.

Die Zuverlässigkeit des Trägerfahrzeuges konnte Anfang 2012 mit einer Rekordfahrt eindrucksvoll belegt werden. Es gelang den 1970 in Betrieb genommenen, 24 km langen Albstollen in einer autonomen Mission – ohne äußere Kontrolle des Fahrzeuges – zu durchtauchen. Der Stollen hat einen Durchmesser von 2,3 m und stellt die Hauptleitung der Trinkwasserversorgung von Stuttgart dar. In der 7 Stunden dauernden Fahrt konnte die Unversehrtheit des Tunnels mittels Videoaufnahmen festgestellt werden. Die Einfahrt in den Albstollen erfolgte per Handsteuerung, da einige bauliche Hindernisse zu überwinden waren. Anschließend erfolgte eine Umschaltung auf automatischen Betrieb. Das Kabel wurde bei etwa 300 m Wegstrecke gekappt.

Zur Führung des Fahrzeuges entlang einer beliebigen Geometrie wurde ein sich drehendes Sonar (Tritech Micron) integriert, das wie ein Radar in der Lage ist, begrenzende Strukturen in der Wassersäule abzubilden. Durch geeignete Bildverarbeitungsmethoden ist es möglich, punktförmige Objekte und Geradenstücke, z. B. von Mauerwerk zu identifizieren. Deren absolute Position und Ausrichtung bildet die Haupteingangsgröße für das Teilprojekt CGuide.

#### **Teilprojekt: „CGuide“**

Dem Teilprojekt des FhAST lagen folgende Aufgaben zugrunde:

- Entwicklung von Methoden der Geometrierkennung aus vorhandenen Sensordaten (z.B. Fahrzeugsonar, Abstandssensoren) unter Anwendung von Verfahren der Datenfusion,
- Entwurf von Suchverfahren für Sicherstellung der objektdeckenden Inspektion,
- Entwurf von nichtlinearen, robusten Regelungsalgorithmen für die Fahrzeugsteuerung während der Inspektions- und Identifikationsaufgaben unter wechselnden Umgebungsbedingungen,
- Implementierung der neu entwickelten Verfahren in das Führungssystem des Fahrzeuges.

Der Einsatz der durch IBMT und DFKI neu entwickelten Sensoreinheiten ist nur möglich, wenn durch die Fahrzeugsteuerung die notwendigen Rahmenbedingungen erfüllt werden. Umgekehrt sind für die Führung des Fahrzeuges Sensorinformationen der neuen Einheit notwendig, um beispielsweise einen konstanten Abstand zum zu inspizierenden Objekt unter den schwierigen Umgebungsbedingungen einzuhalten. Darüber hinaus muss auf durch die Sensoreinheit detektierte Anomalien innerhalb des Führungssystems des Fahrzeuges angemessen reagiert werden, so dass eine enge Kopplung zwi-

schen Führungssystem und Sensoreinheit zwingend notwendig ist. Atlas Elektronik entwickelte mit der Fahrzeughardware, der Abstandssensorik, sowie Modulen zur Navigation und Missionsplanung diejenigen Anteile im Projekt, die die Grundlagen für die Umsetzung der Steuerungsalgorithmen darstellen.

Für die Ziele des Vorhabens wurde als Beispielszenario die Inspektion von Spundwänden und Windparkfundamenten priorisiert. Dabei zeigte sich in der Praxis, dass schon bei diesen vergleichsweise einfachen Geometrien erhebliche Anstrengungen erforderlich sind, die Verfahren robust genug gegen kurzzeitige Ausfälle der Bildsensorik auszulegen. Während der Versuche wurde festgestellt, dass inmitten einer Drehung des Fahrzeuges die Erkennung der Objekte mittels Hindernismeidensonars aussetzt. Dies begründet sich in der Funktionsweise eines Scanning-Sonars.

In Abb. 8 werden die Sonardatenverarbeitungsschritte aufgezeigt. Im ersten Schritt wird das Sonarbild mittels der einzelnen sequenziellen und zeitlich versetzten Pings des Scanning-Sonars und der aktuellen Navigationsdaten aufgebaut. Dies funktioniert für geradlinige Bewegungen sehr gut; wenn sich jedoch das Fahrzeug dreht, werden die Daten so sehr verfälscht, dass das aufgebaute Sonarbild verworfen wird. Somit entstehen Lücken in der Objekt-datenverarbeitung, denen mittels geeigneter Algorithmen entgegengewirkt werden muss.

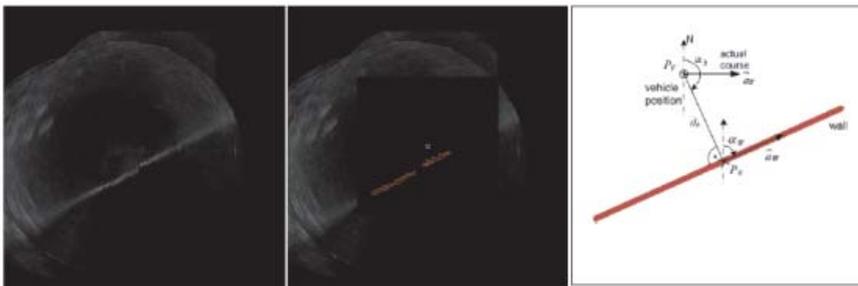


Abb. 8: Wandererkennung mittels Scanning Sonar

Die entstandene Führungssoftware ist in der Lage, das AUV an einer geraden Wand entlangzuführen, bis es das vordefinierte Inspektionsgebiet verlässt. Danach kann es wenden und die nächst tiefere Schicht inspizieren. Dies geht so lange, bis der Seeboden erreicht ist. Im Falle eines runden Fundamentes (z. B. Monopile-Gründung) wird das AUV mehrfach tangential die Struktur passieren bis der vollständige Umfang sensorisch erfasst ist. Bei den abschließenden Versuchen im Hafen von Olpenitz konnten diese Manöver demonstriert werden. Während das Inspektionsmanöver entlang einer Betonwand am realen Objekt durchgeführt wurde, konnte die Umrundung einer

Windturbinengründung nur an einem simulierten Objekt erfolgen. Der Hauptgrund dafür ist darin zu sehen, dass die Umgebungsbedingungen in einem realen Windpark zu rau für experimentelle Arbeiten sind. Bei Versuchen in einem Windpark (Horns Rev) wurde festgestellt, dass in der Nähe von Turbinen kabelgeführte Fahrzeuge schnell in Schwierigkeiten kommen. Abb. 9 zeigt die Navigationsdaten des Trägerfahrzeuges bei einer solchen Mission mit simulierter Umgebung.

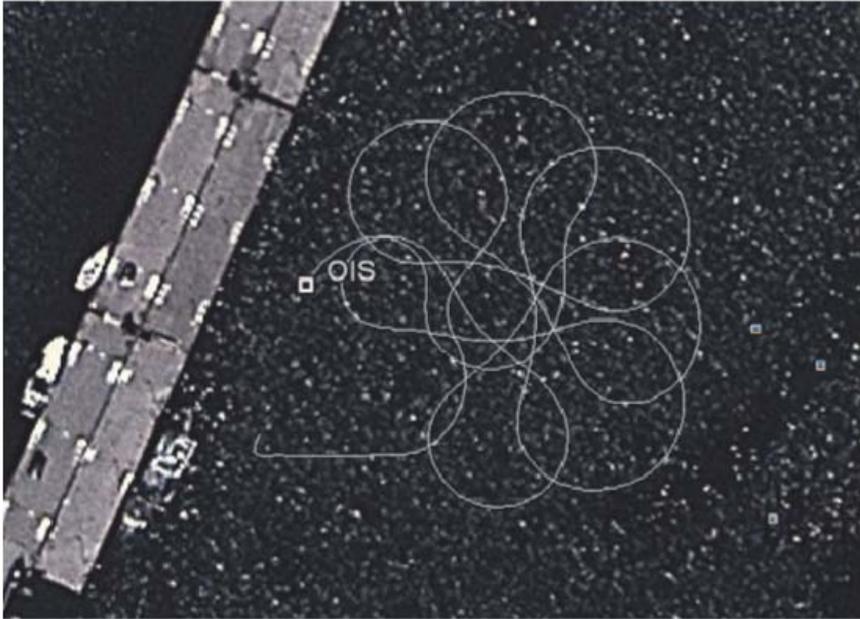


Abb. 9: Daten der AUV Trajektorie in einem Google-Earth Bild. Im Zentrum der „Blume“ befindet sich das gedachte Monopile-Fundament.



Abb. 10: Das CView Inspektionssystem in der Ostsee

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Fördervorhaben CView hatte das ambitionierte Ziel, innerhalb von drei Jahren ein neuartiges Inspektionssystem für Hafenanlagen, Schiffshüllen und andere Unterwasserbauwerke zu schaffen. In gemeinsamer Anstrengung der fünf Projektpartner Atlas Elektronik, DFKI-RIC, FhAST, IBMT und IWSS ist es gelungen die Grundlagen für ein derartiges System zu schaffen. Es wurde ein hochmodulares, flexibles Trägerfahrzeug aus teilweise vorhandenen Komponenten aufgebaut, welches einen in dem Vorhaben entstandenen Multifunktions-Sensorkopf tragen und steuern kann. Der Sensorkopf vereint ein hochauflösendes Multibeam Echosounder mit einem Laserprojektor und HD-Kamera. Beide Systeme sind in der Lage bei relativ schlechter Sicht ein 3D-Bild ihrer Umgebung zu erfassen. Das System ist in der Lage in einem grob vorgegebenen Inspektionsgebiet die notwendige Bahnführung unter Nutzung von Sonardaten selbstständig durchzuführen. Alle Daten werden zunächst aufgezeichnet und stehen einer weiteren Auswertung zur Verfügung.

Der erreichte Stand lässt aber auch bereits Grenzen des Systems erkennen. So ist zum Beispiel die Aufzeichnung des Lasers durch die Einwirkung von Streulicht bei starkem Sonnenschein gestört. Auch die erwartete Reichweiterehöhung gegenüber der visuellen Sichtweite war eher moderat. Das entwickelte Sonar wurde bisher durch die entstehende Datenflut im Einsatz limitiert. Die bisher ausgewerteten Daten lassen jedoch eine sehr gute Qualität und einen Vorsprung gegenüber mittlerweile auf dem Markt erhältlichen Systemen erkennen. Allerdings besteht noch Optimierungspotential, besonders in der online Datenprozessierung.

Das Trägerfahrzeug hat sich in den Versuchen bewährt und wird nun in der Folgezeit zum Produkt „SeaCat“ weiterentwickelt. Hier besteht vor allem Bedarf an größerer Tauchtiefe (bis 600 m), zusätzlichen Kommunikationsverbindungen (Iridium, Akustikmodem) und weiterer Robustifizierung der Rudermechanismen.

Wenn auch im Detail nicht alle Einzelziele des Vorhabens erreicht werden konnten, so ist die entstandene Technologie und dabei gewonnenen Erfahrungen dennoch ein wertvoller Schritt in Richtung marktfähiger Offshore-Technologie. In diesem Sinne kann das Vorhaben als guter Erfolg gewertet werden.

# CUSLAM – Lokalisierung und Kartenerstellung in beengten Unterwasserumgebungen

Marc Hildebrandt, Christopher Gaudig, Patrick Merz-Paranhos, Sankaranarayanan Natarajan, Javier Hidalgo Carrio, Leif Christensen, Phillip Kloss, Frank Kirchner (DFKI GmbH – Robotics Innovation Center)

## Kurzbeschreibung

Im Projekt CUSLAM (FKZ 03SX290) wurde ein robuster Algorithmus zur Selbstlokalisierung und Kartenerstellung entwickelt, der in der Lage ist, in komplexen, räumlich eingeschränkten Unterwasserumgebungen zuverlässig zu operieren. Eingabedaten für den Algorithmus sind Bilder von einem Stereokamerasystem sowie interne Fahrzeugsensoren. Einsatzgebiet sind autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs). Der Algorithmus erlaubt es auch kleinen, schwach instrumentierten Fahrzeugen, autonom in schwierigen Umgebungen, wie zum Beispiel Unterwasserproduktionsstätten, zu agieren und verlässlich Aufgaben zu erfüllen. Anhand von ausgiebigen Versuchsreihen mit Referenzmessungen auf dem AUV „Dagon“ wurde die korrekte Funktion des Algorithmus objektiv verifiziert.

## Einleitung

Ein großes Problem für autonome Unterwasserfahrzeuge und deren Operatoren ist die Bereitstellung einer verlässlichen Lokalisierung für das Fahrzeug. Nur wenn sich das Fahrzeug während der Mission verlässlich lokalisieren kann, können komplexe autonome Aufgaben auch mit aussagekräftigen Ergebnissen erfüllt werden. Wissenschaftlich kann das Problem als 3D-Lokalisationsproblem mit sechs Freiheitsgraden in schwach strukturierter Umgebung mit eingeschränkter Sensorik betrachtet werden.

Die bei heute eingesetzten AUVs vorhandene Notwendigkeit zur Verwendung externer Navigationsmarken (z.B. durch Sonar-Transpondermarken) zur robusten Selbstlokalisierung schränkt das Einsatzspektrum autonomer Unterwasserfahrzeuge stark ein. Ein Ziel des Projektes war das Erreichen einer hohen Lokalisationsgüte bei gleichzeitigem Verzicht auf solche Infrastruktur-Sensorik. Erst durch die Unabhängigkeit von sonarbasierten Lokalisationsverfahren wie z.B. long-baseline-Verfahren (LBL) und doppler velocity logs (DVL) werden Szenarien wie die autonome Überwachung von komplexen Unterwasserproduktionsstätten überhaupt erst durchführbar.

Der entwickelte Algorithmus basiert auf der Auswertung der Daten eines Stereokamerasystems, welches auf den Meeresboden gerichtet ist. Durch das Wiedererkennen von Merkmalen zwischen zwei Kamerabildpaaren kann die Eigenbewegung des Fahrzeuges ermittelt werden (visual odometry, visuelle Odometrie). Diese Messung kann in ihrer Genauigkeit durch die Hinzunahme von internen Fahrzeugsensoren (INS, internal navigation system) noch verbessert werden: Ein AHRS (Attitude-heading reference system, Lagemesssystem) in Verbindung mit einem FOG (Fiber optic gyroscope, faseroptischer Kreisel) verbessert die Rotationsschätzung, ein Drucksensor liefert eine verlässliche Tiefenmessung.

Um die Eignung des Algorithmus für reale Anwendungen zu gewährleisten, war ein wesentlicher Bestandteil des Projektes die Funktionsverifikation. Diese gliedert sich in zwei Bereiche:

1. Implementierung und Untersuchung des Algorithmus auf einem realen AUV unter realistischen Einsatzbedingungen
2. Vergleich der Lokalisationsmessung mit einer Referenzmessung

Der erste Teil der Funktionsverifikation begründet sich in praktischen Überlegungen: Während es eine Reihe von Arbeiten gibt, die das Problem theoretisch betrachten, finden sich wenige Arbeiten, in denen dazu auch Realversuche durchgeführt wurden. Hier sind die Arbeiten von Eustice [1] hervorzuheben, in denen er Versuche zur Unterstützung klassischer Navigationssensorik durch Kameras beschreibt (VAN – Vision Aided Navigation, visuell unterstützte Navigation). Der Grund für die geringe Anzahl an Arbeiten zu dem Thema begründet sich in dem großen Aufwand, der notwendig ist, um Algorithmen in realen Unterwasserumgebungen zu testen. Die Autoren vertreten jedoch die Ansicht, dass es unbedingt notwendig ist, Algorithmen aus den Laboren in reale Anwendungen zu übertragen, um belastbare Aussagen über deren Eignung machen zu können. Nur wenn dieser Schritt Teil des Entwicklungsprozesses ist, wird der Transfer aus der Forschung in die Anwendung realistisch möglich. Daher wurde diesem Bereich im CUSLAM-Projekt viel Raum gegeben.

Der zweite Punkt spiegelt ein weiteres Problem bisheriger Ansätze wider. Bedingt durch die hohe Komplexität bei der Durchführung von Realversuchen war zu Projektbeginn keine Veröffentlichung bekannt, in der in einem Unterwasserszenario konsequent eine Referenzmessung der Lokalisationsgüte bei der Entwicklung eines Unterwasserlokalisationsansatzes durchgeführt wurde. Aus fahrzeugzentrierter Sicht ist es natürlich auch sinnvoll, alle verfügbaren Sensoren für die Hauptlokalisierung zu nutzen. Am ehesten wurden die Arbeiten von Corke [2] und Dunbabin [3] diesem Ansatz gerecht, die ein LBL zur Referenzmessung einsetzen. In anderen Arbeiten wurde ein Ver-

gleich meist nur an Start-/Endpunkten (z.B. durch GPS-Systeme) durchgeführt, was keine Rückschlüsse auf das wirkliche Verhalten unter Wasser zulässt. Dies jedoch ist für die Robustheit ein sehr wichtiger Messwert. Daher wurde im CUSLAM-Projekt eine Referenzmessung mit bewährten Methoden (siehe Abschnitt „Referenzmessung“) implementiert, die vollständig unabhängig von der Hauptmessung abläuft, und eine hochauflösende Zweitmessung zur Verfügung stellt.

### Das AUV „Dagon“

Die erste Herausforderung im Projekt CUSLAM war die Bereitstellung eines Fahrzeuges, welches alle notwendigen Komponenten besitzt, um die Verifikationsaufgaben zu absolvieren. Dafür wurde das AUV „AVALON“ (Autonomous Vehicle for Aquatic Learning, Operation and Navigation, autonomes Wasserfahrzeug für Lehre, Operationen und Navigation) als Basis genommen und um eine Reihe von Sensorsystemen erweitert. Das neue Hüllenkonzept ist in Abb. 1 dargestellt. Um eine größere Beweglichkeit in beengten Umgebungen zu ermöglichen, wurden im Gegensatz zum ursprünglichen AVALON-Konzept die beiden Druckkörper nicht zigarrenförmig hintereinander, sondern nebeneinander angeordnet. Dies reduziert die Gesamtlänge und erhöht die Basislinie des Stereokamerasystems, welches in den beiden Köpfen untergebracht ist. Zwischen den beiden Druckhüllen findet sich Platz für die externe Sensorik (insbesondere LBL-Transponder, DVL) sowie die beiden Vertikalschubdüsen.



Abb. 1: Hüllenkonzept für das AUV Abb. 2: Das AUV „Dagon“

Um Gewicht zu sparen, den Strömungswiderstand zu reduzieren und gleichzeitig die Gesamtstabilität zu erhöhen, wurde der Druckhüllendurchmesser von 240mm auf 210mm reduziert. Zwei Kabeldurchführungen zwischen den Druckhüllen sparen Unterwasserstecker und -kabel außerhalb des Fahrzeuges ein. Basierend auf den vorhandenen Konstruktionszeichnungen aus dem Projekt CSurvey wurde eine Schwenk-Neige-Einheit konstruiert und auf

den geringeren Durchmesser angepasst. Die neuen, leistungsfähigeren PC-Systeme finden Platz, ebenso wie die hochauflösenden Kameras. Problemstellen wie die Deckel-Befestigungen konnten beseitigt werden, ein wichtiger Punkt für die Gesamtstabilität und Seetauglichkeit. Das fertig integrierte Fahrzeug ist in Abb. 2 dargestellt. Um den starken Modifikationen an der Hülle und Sensorik Rechnung zu tragen, wurde das modifizierte Fahrzeug in „Dagon“ umbenannt.

Das Fahrzeug verfügt über zwei eingebettete PCs, davon befindet sich jeweils einer in der linken und einer in der rechten Druckhülle. Der Rechner auf der rechten Seite wird zur Berechnung der Referenzmessung aus LBL, DVL, AHRS und FOG verwendet, diese Sensoren sind über serielle Verbindungen direkt an ihn angeschlossen. In der linken Hülle übernimmt der Rechner die Datenakquise und das Aufzeichnen der Kamerabilder sowie Steueraufgaben. Er ist dafür mit einem RAID-0-Festplattenverbund ausgestattet, welcher mit 1TB Kapazität mehr als zwei Stunden Aufzeichnung von Stereo-Full-HD-Video erlaubt. Außerdem führt der Rechner den CUSLAM-Algorithmus aus und verfügt über die Anschlussmöglichkeit für einen Zusatz-Rechenprozessor. Bei diesem Rechenprozessor handelt es sich um eine Grafikkarte (GPU), die über die CUDA-Schnittstelle zur Berechnung von speziellen, gut parallelisierbaren Algorithmen eingesetzt werden kann. Bei der eingebauten Grafikkarte handelt es sich um eine NVIDIA GeForce GT 430 mit 96 parallelen Recheneinheiten bei einer maximalen Leistungsaufnahme von 49 W. Über einen Flex-Raiser konnte die Karte problemlos in den bereits vorbereiteten PC eingesetzt werden; lediglich die Kühlung musste an den speziellen Bau-raum angepasst werden.

Das Energiesystem des Fahrzeuges wurde vollständig integriert. Alle Systeme können sowohl über den internen Akku versorgt werden als auch über ein externes Kabel. Dieses Kabel bietet außerdem die Möglichkeit, während des Betriebs den Akku nachzuladen, so dass durch einen Ladevorgang keine Totzeiten hinzukommen. Der Akku ist mit seiner Kapazität von 1,6 kWh großzügig dimensioniert, und erlaubt Betriebszeiten von 8-10 Stunden.

Die Schubdüsen, die das Fahrzeug in Bewegung setzen, wurden speziell für dieses Projekt entwickelt. Dies war notwendig, da für die hohe Positioniergenauigkeit, die hier gefordert ist, kein passendes Produkt auf dem Markt gefunden werden konnte. Zur Ansteuerung der Schubdüsen wurde eine bestehende Softwarebibliothek an das verwendete Framework angepasst. Es wurde ein Softwaremodul entwickelt, das Daten von einem Joystick über eine Netzwerkverbindung entgegennimmt, CAN-Nachrichten zur Motoransteuerung erzeugt und diese über den CAN-Bus verschickt.

Ein WLAN-Access-Point wurde in ein Unterwassergehäuse eingebaut, das am Fahrzeug befestigt wurde. So kann bei autonomen Missionen zu Beginn

und nach Wiederauftauchen eine Funkverbindung zum Fahrzeug hergestellt werden. Dies vereinfacht die Anpassung von Software während der Durchführung von Feldversuchen und erhöht die Robustheit der Kommunikation mit dem AUV, was wiederum die Gefahr von Fahrzeugschäden oder -verlust reduziert. Im selben Unterwassergehäuse ist die Integration eines GPS-Moduls für Ground-Truth-Referenzen an der Wasseroberfläche erfolgt. Die Funktion der Hardware wurde erfolgreich getestet. Mit Hilfe des GPS-Moduls ist eine globale Geo-Referenzierung der Fahrzeugposition möglich, die die Zuordnung und Auswertung der Experimentaldaten vereinfacht. Außerdem kann prinzipiell über die GPS-Daten eine Geo-Referenzierung der LBL-Basisstationen erfolgen.

### Aufbau des CUSLAM-Algorithmus

Die erste Komponente des Algorithmus ist eine visuelle Odometrie auf Basis von Daten einer Stereokamera und dem INS. Die zweite Hauptkomponente besteht aus einem Zustandsfilter, welches die Daten aus der visuellen Odometrie als Eingabe bekommt, und so den Gesamtalgorithmus zu einem SLAM erweitert. Dabei dienen die Daten, die von der visuellen Odometrie kommen als Front-End, und ein Graphenoptimierer (hier G2O [5]) dient als Back-End. Das so entstehende Graph-Based-SLAM ist die Grundlage für den CUSLAM-Algorithmus (siehe auch Abb. 3).

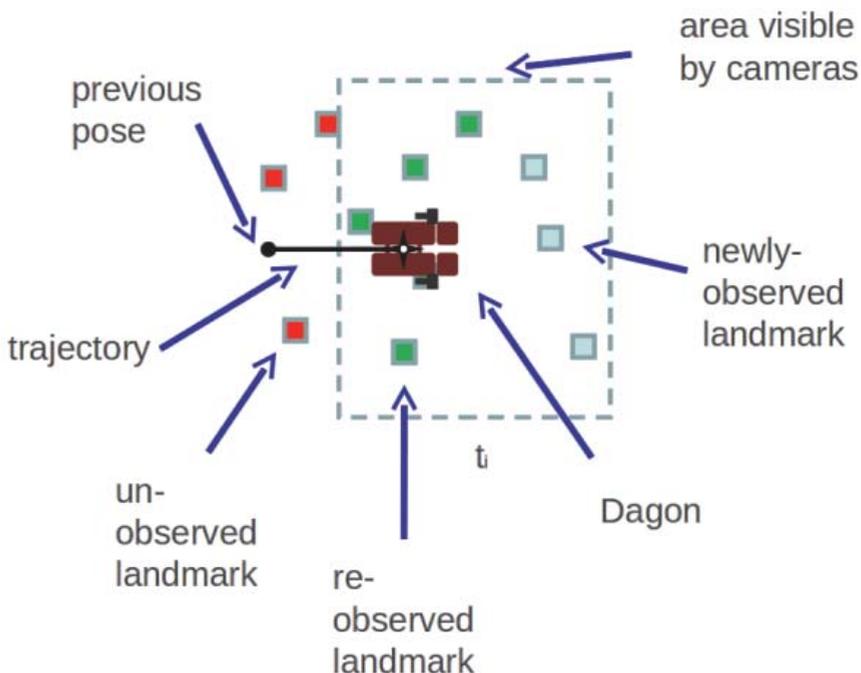


Abb. 3: Grundidee des CUSLAM-Algorithmus: Graph-Based SLAM

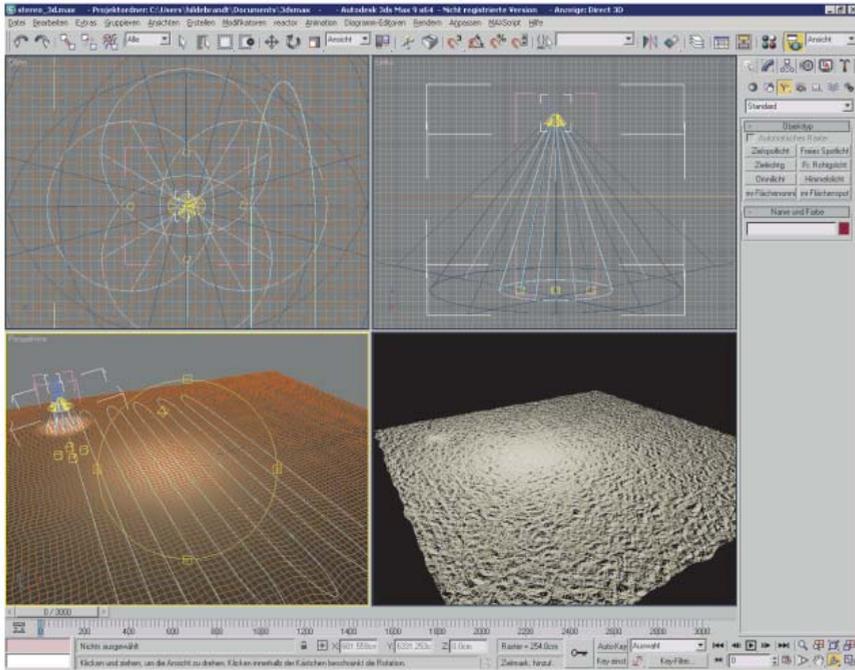


Abb. 4: 3D-Szene, die zur Erzeugung der synthetischen Daten verwendet wurde

Um bereits während der Entwicklung des Fahrzeugs Messdaten für die Algorithmenentwicklung zu haben, wurde mit dem 3D-Modellierungsprogramm 3DSMax eine Unterwasserszenarie erstellt, welche zur Erzeugung von synthetischen Datensätzen diente. Eine Ansicht der Szene ist in Abb. 4 dargestellt. Gut erkennbar ist in blau die Trajektorie, welche von dem simulierten Fahrzeug abgefahren wird. Es handelt sich um ein typisches mäanderförmiges Explorationsmuster. Neben den zwei Kameras des Stereokamerasystems wird auch die Beleuchtung simuliert, wobei photometrische Parameter verwendet werden. Dies diente auch zur Optimierung der Beleuchtung, wie sie für das Fahrzeug verwendet wird. Die so entstehende Sequenz aus Einzelbildern umfasst 3000 Bilder für jede Kamera während das Fahrzeug eine virtuelle Strecke von 4,5 km zurücklegt. Durch realistische Schatten und Lichtberechnungen sind die resultierenden Daten sehr realitätsnah.

Die visuelle Odometrie arbeitet nach folgendem Schema: Nach der Bildmerkmalsextraktion auf den beiden Stereobildern kann mit Hilfe dieser Erstschätzung der Suchraum für die Korrespondenzbildung zu den Merkmalen des letzten Bildpaares deutlich eingeschränkt werden, was sowohl die Robustheit erhöht als auch die Berechnungskomplexität erheblich verringert. Zusätzlich werden mit Hilfe der Epipolargeometrie aus den Stereokalibrierungs-

daten die Bildmerkmale innerhalb des Stereopaars räumlich in Korrelation gebracht. Als nächstes werden die Bildmerkmale der Stereopaare in den 3D-Raum rückprojiziert, so dass pro Bildpaar eine 3D-Punktwolke entsteht. Diese Punktwolken können unter Verwendung einer Bewegungsschätzung in eine allgemeine globale Position verschoben werden, so dass sie sich überlappen. Mit Hilfe eines ICP-Ansatzes kann dann in einem letzten Schritt die endgültige Bewegungsschätzung für die visuelle Odometrie berechnet werden.

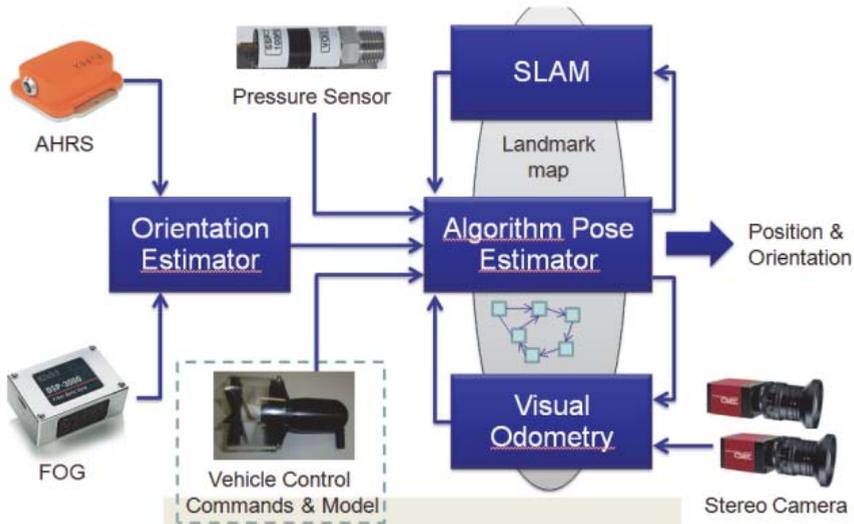


Abb. 5: Sensordatenfluss und Hauptkomponenten des CUSLAM-Algorithmus

Durch die Verwendung von stabilen Bildmerkmalen (SURF-Deskriptor) innerhalb der visuellen Odometrie kann der Algorithmus in einen SLAM-Algorithmus überführt werden. Die wichtigste Eigenschaft der Bildmerkmale für das SLAM ist die Fähigkeit, diese auch nach längerer Zeit wiederzuerkennen. Für eine einfache visuelle Odometrie, in der die Bildmerkmale nur von Bild zu Bild (oder über eine relativ kleine Anzahl von Bildern) verfolgt werden, gibt es rechenzeiteffizientere Merkmalsextraktoren. Durch das Wiedererkennen von Merkmalen auch nach längerer Zeit kann festgestellt werden, ob ein Ort bereits besucht wurde. Diese Zusatzinformation wird dann als sogenanntes Loop-Closing benutzt, um die Langzeitstabilität zu gewährleisten. So übernimmt diese Komponente eine ähnliche Aufgabe wie das LBL bei der Referenzmessung, kommt jedoch ohne externe Sensorik aus. Der Sensordatenfluss ist in Abb. 5 dargestellt.

Um den Algorithmus echtzeitfähig zu implementieren, war eine Reihe von Schritten notwendig: Der erste Schritt bestand darin, die aktuelle Verarbeitungsgeschwindigkeit zu analysieren, um dann Teile zu identifizieren, die

eine hohe Rechenleistung benötigen. Diese sollten dann in weiteren Schritten parallelisiert werden, um eine insgesamt höhere Geschwindigkeit zuzulassen. Die Analyse ergab, dass es zwei Stellen gibt, an denen eine Optimierung den größten Effekt haben würde: Die Extraktion der markanten Punkte sowie die Korrespondenzbildung zwischen zwei Bildpaaren. Für den ersten Punkt gibt es als Beschleunigungsmöglichkeit zwei Ansätze: Zum einen eine Pipeline-Architektur, in der zwei Prozesse immer auf den aktuell verfügbaren Bildern markante Punkte extrahieren (während andere Prozesse parallel dazu die weitere Verarbeitung übernehmen), zum anderen eine Auslagerung auf einen Co-Prozessor. Zur Optimierung des Algorithmus wurde die bereits erwähnte Pipeline-Architektur implementiert, dargestellt ist sie in Abb. 6. Sie entkoppelt die voneinander unabhängigen Anteile der Bildverarbeitung und ermöglicht die Verteilung der Einzelaufgaben auf mehrere Prozessoren eines Multi-Prozessor-Systems. So ließ sich eine deutliche Verbesserung der Geschwindigkeit erreichen.

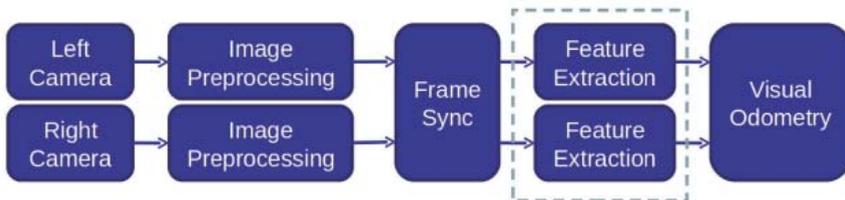


Abb. 6: Bildverarbeitungspipeline im CUSLAM-Algorithmus. Blau umrandet die Komponenten, die auf dem Co-Prozessor (GPU) ausgeführt werden.

Als zeitaufwändigste Komponente wurde bereits im Vorfeld der SURF-Algorithmus identifiziert, der zur Bestimmung von markanten Bildpunkten und zur Extraktion von Deskriptoren an diesen Bildpunkten innerhalb des CUSLAM-Algorithmus eingesetzt wird. Da es eine Reihe von frei verfügbaren GPU-Implementierungen von SURF gibt, lag der Fokus zunächst darauf, diese Komponente auf die GPU auszulagern. Um die Vorteile der GPU nutzen zu können, war eine Reihe von Modifikationen am gesamten Software-System notwendig. Nach einigen Versuchen mit unterschiedlichen verfügbaren Implementierungen wurde die Bibliothek 'SURFGPU' gewählt. Sie war einfach zu integrieren und ist frei verfügbar. Um nach wie vor den Algorithmus auf Systemen ohne GPU ausführen zu können, wurde ein Parameter in das Buildsystem eingeführt, mit dem zur Compile-Zeit der GPU-Support aktiviert werden kann. Während der Laufzeit kann dann bei aktiviertem GPU-Support wiederum gewählt werden, ob die Feature-Extraktion auf der CPU oder GPU stattfinden soll. So ist vollständige Flexibilität und Kompatibilität gewährleistet. Tests mit der GPU-beschleunigten Version ergaben eindeutige Messergebnisse: Durch die Berechnung auf der GPU lässt sich ohne weitere Modi-

fikationen am Algorithmus die Bildrate von etwa 0,5 FPS auf 3 bis 4 FPS erhöhen. Damit sind nun Realtests auf dem AUV mit Livedaten möglich.

Eine weitere Reduktion der Rechenzeit des Algorithmus konnte durch die Verlagerung der Zuordnung der Bildmerkmale zwischen den Stereobildern auf die GPU erfolgen. Da die Extraktion bereits auf der GPU stattfindet, liegen alle benötigten Daten vor, und es ist kein zusätzlicher Speichertransfer notwendig. Dies gibt weitere Ressourcen für die CPU frei. Durch zusätzliche Nutzung der Pipeline-Architektur können nun die Bild-Vorverarbeitung (CPU) und die Extraktion/Zuordnung von Bildmerkmalen (GPU) versetzt-parallel laufen, was die Gesamtlaufzeit weiter verbessert. So fallen auf der CPU bisher ca. 40 ms für die Bild-Vorverarbeitung und ca. 60 ms für die Optimierung der Zuordnung der Bildmerkmale an, während die GPU ca. 100 ms für die Extraktion/Zuordnung benötigt. So lassen sich auf Dagon unter realistischen Bedingungen ca. 8-10 Hz Verarbeitungsfrequenz erreichen.

### Referenzmessung

Die Referenzmessung nutzt alle verfügbaren Fahrzeugsensoren (bis auf die Kameras) um eine möglichst hohe Positionierungsgenauigkeit zu erreichen. Hierfür werden die Daten des AHRS mit dem FOG, dem DVL und dem LBL zu einer Positionsmessung zusammengeführt. Die beiden weiteren wesentlichen Komponenten der Referenzlokalisierung, der Orientation Estimator (OE) und der Reference Pose Estimator (RPE) werden in den nächsten beiden Abschnitten beschrieben. Der Sensordatenfluss ist in Abb. 7 dargestellt.

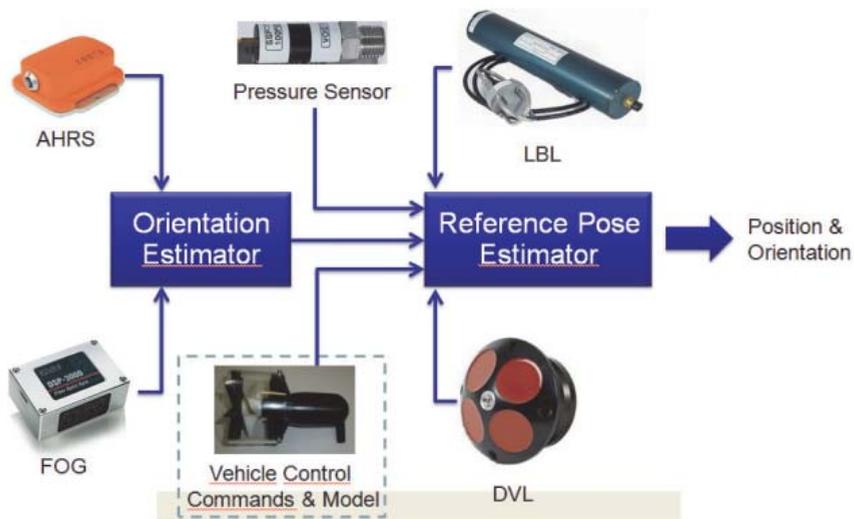


Abb. 7: Sensordatenfluss und Hauptkomponenten des RPE (Reference Pose Estimator)

Die Schätzung der Orientierung des Unterwasserfahrzeugs ist ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten im Projekt CUSLAM, da insbesondere bei autonomen Manövern präzise Daten zur Lage des AUVs erforderlich sind. Der entwickelte Orientierungsschätzer (OE) nutzt einen auf Quaternionen basierenden Indirekten Kalman-Filter (IKF) mit einer adaptiven Schätzung externer Beschleunigungen. Die Hauptaufgabe dieses Software-Moduls ist die korrekte Datenfusion der Messwerte von Beschleunigungssensoren, Gyroskopen und dem faseroptischen Kreisel (Gierachse) auf dem Fahrzeug. Als Option können je nach Subsystem-Anforderungen und Umgebungsbedingungen Magnetfeldsensoren genutzt werden, jedoch sind sie standardmäßig deaktiviert, da sie in vielen Fällen stark verrauschte Messwerte liefern und werden hier nur zur Initialisierung des Gierwinkels vor Missionsbeginn genutzt.

Um eine möglichst hohe Genauigkeit des OE zu gewährleisten, wurde eine Feinabstimmung des Filters unter Nutzung der ermittelten Rauschkoeffizienten aus der Allan-Varianz-Charakterisierung [4] durchgeführt. Die Nutzung der Allan-Varianz ist eine der einfachsten und besten Methoden, um Inertialsensoren zu charakterisieren. Es handelt sich dabei um einen Analyseansatz im Zeitbereich, der ursprünglich entwickelt wurde, um die Stabilität von Oszillatoren zu untersuchen. In den 80er Jahren wurde er erstmals zur Charakterisierung und Modellierung von Inertialsensoren genutzt und wird seit 1998 vom IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) als Standardansatz empfohlen. Das Allan-Varianz-Paket für die Programmiersprache R (`allanvar`) wurde im Mai 2011 entsprechend dem Standard des CRAN-Projekts für R-Pakete unter der GPL-2-Lizenz veröffentlicht.

Dagons interne Navigationssensoren (AHRS: Xsens Mti und FOG: KVH DSP-3000) wurden unter Nutzung des Allan-Varianz-Ansatzes charakterisiert. Dies umfasst eine Langzeit-Datenaufzeichnung, während der Roboter sich nicht bewegt. Dieser Schritt ist für die Feinabstimmung der Sensorfusion erforderlich. Insbesondere gute Positions- und Orientierungsschätzer sind im Unterwasserbereich essentiell. Das stochastische Rauschen und die thermale Drift der Sensoren wurden so ermittelt.

Sobald die Transformation zwischen den Koordinatensystemen von LBL und Roboter berechnet wurde, können Position und Orientierung ("Pose") des AUVs mit einem linearisierten Kalman-Filter bestimmt werden. Dieser schätzt die Geschwindigkeit, Position und Orientierung des Fahrzeugs und wird "Reference Pose Estimator" (RPE) genannt. Die Eingaben in den Kalman-Filter sind im Einzelnen:

- Geschwindigkeitsmessung (DVL)
- Absolute Tiefenmessung (Drucksensor)

- Absolute Orientierungsmessung (OE)
- Absolute Positionsmessung (LBL)

Das LBL liefert eine Positionsmessung relativ zu einem zuvor ausgebrachten Netzwerk aus Transpondern. Das Koordinatensystem, in dem die Messung stattfindet, wird durch die Anordnung der Transponder festgelegt und bei deren Vermessung bestimmt. Um diese Positionsdaten im RPE nutzen zu können, muss die Transformation zwischen den beiden Koordinatensystemen bestimmt werden. Dies lässt sich einfach mit Hilfe des RPE berechnen, wenn ein Datensatz von ausreichender Länge mit Fahrzeugbewegung und Messdaten von allen Sensoren vorliegt.

### **Versuche zur Funktionsverifikation**

Wichtigste Testumgebung für Dagon in geschlossenen Beckenanlagen sind die beiden Becken im Unterwasser-Testbed des DFKI (siehe Abb. 8). Diese sind zwar relativ klein (20 m<sup>3</sup> bzw. 40m<sup>3</sup>), aber jederzeit verfügbar. Das neue, größere Becken konnte seit seiner Inbetriebnahme in der zweiten Februarwoche 2011 verwendet werden, und ist auf Grund seiner Rundum-Verglasung für Einstellungen an der Steuerungssoftware (Tiefenregler, Positionsregler) sehr gut geeignet.

Eine weitere wichtige Testumgebung war der „Unisee“, ein Baggersee in der Nähe der Uni Bremen, in dem viele Versuche durchgeführt wurden. Mit seinen 20m Tiefe und 500m Durchmesser stellte er für Experimente, die auf viel Raum angewiesen sind (LBL, Trajektorienverfolgung) sowie für realitätsnahe Umweltbedingungen die ideale Testumgebung dar.

Im Juli 2012 wurden Außenversuche am künstlichen Riff bei Rostock durchgeführt. Verteilt über einen Zeitraum von zwei Wochen wurden Experimente durchgeführt, wobei der Forschungskutter „Gadus“ als Basis diente. Abb. 9 zeigt den Forschungskutter und das Schlauchboot „Polarsternchen“ im Hafen von Rostock. An fünf Tagen konnten Experimente am Riff durchgeführt werden. Nach einer jeweils zweistündigen Anfahrt zum Riff standen zwischen vier und sechs Stunden Experimentalzeit zur Verfügung, bis die zweistündige Rückfahrt angetreten werden musste. Während die Steuerung und Vorbereitung aller Experimente von der Gadus aus durchgeführt wurde, diente das Schlauchboot zum Ausbringen der LBL-Transponder und zur Unterstützung von Arbeiten an Dagon während das AUV im Wasser war (die Bordkante der Gadus ist für solche Arbeiten zu hoch).

Das künstliche Riff vor Nienhagen ist ein Areal von vier Hektar Größe, auf dem verschiedene Objekte künstlich platziert wurden. Es dient primär zur Erforschung von biologischen sowie ozeanographischen Abläufen in Küsten



*Abb. 8: Unterwasser-Testbed des DFKI-RIC mit zwei Tauchbecken*

gewässern. Da es aufgrund der Vielzahl an Hindernissen und unterschiedlichen Strukturen die ideale Testumgebung für den CUSLAM-Algorithmus darstellt, wurde uns von der Universität Rostock erlaubt, dort unsere Abschlussversuche durchzuführen.



*Abb. 9: Das Forschungsschiff „Gadus“ der Uni Rostock sowie das Forschungsschlauchboot „Polarsternchen“ des DFKI-RIC bei den Außenversuchen am künstlichen Riff Nienhagen*

Im Zeitraum der fünf Tage wurde eine Reihe von unterschiedlichen Versuchen durchgeführt, die im Folgenden zusammengefasst werden. Nach Ankunft mit der Gadus folgten die Experimente einem festen Schema: Zuerst wurde mit Hilfe des Schlauchbootes das LBL-System ausgebracht. Währenddessen wurde an Deck der Gadus Dagon startklar gemacht. Mit Hilfe des Kranes der Gadus wurde dann Dagon zu Wasser gelassen, und die Versuche konnten beginnen. Ca. eine halbe Stunde vor Abfahrt wurde mit dem Abbau des LBL-Systems begonnen, und kurz vor der Abfahrt Dagon wieder eingefangen. Dies erfolgte mit Hilfe des Kranes sowie eines Bootshakens (zum Einfädeln des Hakens in die Hebevorrichtung).

Zunächst wurde das autonome Verfolgen von Trajektorien unter Nutzung des Glasfaserkabels getestet. So konnten während der Versuche am künstlichen Riff Änderungen an den Software-Modulen durchgeführt werden. Um die Trajektorien zurückzulegen, wurden zwei Betriebsmodi genutzt:

- Trajektorienverfolgung mittels akustischer Sensorik, parallel laufende Vergleichsmessung der visuellen Odometrie
- Trajektorienverfolgung mittels visueller Odometrie, parallel laufende Vergleichsmessung über akustische Sensorik



*Abb. 10: Das Team bei den Außenversuchen am künstlichen Riff Nienhagen vor Rostock im Sommer 2012*

Es hat sich gezeigt, dass visuelle Odometrie und akustische Referenzmessung sowohl qualitativ als auch quantitativ vergleichbare Ergebnisse liefern.

Die Sichtbedingungen im Wasser waren exzellent, auf Entfernungen von bis zu vier Metern konnte der Grund problemlos gesehen und vom Algorithmus erkannt werden. Die Versuche wurden in einem Bodenabstand von zwei bis vier Metern durchgeführt.

Da Dagon über ein WLAN-Modul verfügt, wurde auf dem Forschungskutter ein WLAN-Access-Point befestigt und so konfiguriert, dass beim Auftauchen des AUVs in der Nähe des Mutterschiffs eine Funkverbindung hergestellt wird. Über diese Verbindung konnten so verschiedene Betriebsmodi und Trajektorien ausgewählt und Änderungen an den Software-Modulen durchgeführt werden, während sich das AUV an der Wasseroberfläche befand. Bei Beginn einer autonomen Mission wurde jeweils die Dauer der Tauchfahrt festgelegt (20 Minuten), dann wurde das Fahrzeug in den autonomen Modus gebracht. Kurz nach Beginn des Tauchvorgangs riss die Funkverbindung wie erwartet ab, das AUV war nun im vollautonomen Betrieb. Gegen Ende der Missionsdauer erfolgte dann der aktive Auftauchvorgang. Es traten während der Außenversuche keinerlei Probleme auf, das Fahrzeug tauchte nach jeder Mission wie erwartet in der Nähe des Mutterschiffs auf.

Aus Sicherheitsgründen wurde zwar ein USBL-Transducer am AUV befestigt, mit dem eine Unterwasser-Peilung möglich ist, jedoch war dessen Einsatz aufgrund der erfolgreichen autonomen Missionen nicht erforderlich. Im nicht eingetretenen Notfall wäre eine Verfolgung des AUVs mit Hilfe des Schlauchboots möglich gewesen. spätestens bei vollständiger Entladung der AUV-Akkumulatoren wären dann ein passives Auftauchen und eine anschließende manuelle Bergung des Fahrzeugs erfolgt.

Die Außenversuche waren sehr erfolgreich. Es konnte gezeigt werden, dass das Projektziel sicher erreicht wurde. Sowohl das AUV Dagon als auch die Algorithmik funktionierten unter den Bedingungen im offenen Meer zuverlässig und ohne größere Probleme. Bedingt durch das wechselhafte Wetter wurden die Versuche in einer Reihe von unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt, von Sonnenschein bei Windstille bis zu vier bis fünf Windstärken, Regen und Strömung. Zu erwähnen ist der erhebliche Aufwand, der für das LBL-System betrieben werden musste. Das Ein- und Ausbringen belief sich zeitlich auf ca. eine Stunde pro Tag, was bei einem Zeitfenster von 4-6 Stunden signifikant ist. Dazu kam noch das Vermessen des LBL-Systems, was noch einmal ca. eine halbe Stunde erforderte. Hinzu kam, dass an den letzten beiden Tagen das Vermessen nicht funktionierte, was wohl auf einen Defekt an einem der Transponder zurückzuführen ist. Diese Erfahrung verdeutlicht noch einmal, weshalb es sehr erstrebenswert ist, ohne dieses System auszukommen.

Ein wichtiger Aspekt der Validierung ist die Feststellung von Fällen, in denen der Algorithmus nicht funktioniert (failure cases, Fehlerfälle). Als wichtigster

Fehlerfall ist eine zu starke Wassertrübung anzunehmen, in der Dagon den Meeresgrund nicht ausreichend gut erkennen kann. Daher wurden kontrollierte Trübungstests mit Dagon im Unterwasser-Testbed durchgeführt. Dagon wurde an der Wasseroberfläche des 'schwarzen Beckens' mit Leinen fixiert und die Kameras auf den 2 Meter entfernten Boden gerichtet. Nun wurde iterativ die Trübung mit einem FTU-Meter gemessen (Einheit für Trübung sind FTU, Formazin Turbidity Units), und durch Zugabe von Tonmehl die Trübung erhöht. Dieses Verfahren war bereits aus dem Projekt C-Manipulator bekannt und bewährt. Für diesen Versuch lag die Trübung im Bereich von 0.2 - 9.5 FTU, wobei eine FTU 200g Tonmehl auf 20.000 Litern Wasser entspricht. Auf jeder Trübungsstufe wurden dann Messungen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten der Kameras sowie unterschiedlichen Beleuchtungsintensitäten der Lampen durchgeführt.



*Abb. 11: Versuche mit unterschiedlichen Trübungsgraden. Links Frischwasser (0.2 FTU), rechts nach Zugabe von 200 g Tonmehl auf 20 m<sup>3</sup> Wasser. Obere Reihe mit Farbkorrektur.*

In Abb. 11 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe dargestellt. Bei einem Trübungsgrad von 0.2 FTU (Frischwasser) ist der Bodenbelag (Kies) gut und deutlich zu erkennen. Als Metrik der Auswertung der Testreihe wurde der SURF-Detektor, der im CUSLAM-Algorithmus verwendet wird, als Benchmark eingesetzt. Hierbei spielten die Anzahl der erkannten Merkmale sowie ihre Stabilität über die Zeit eine Rolle. Bei 0.2 FTU konnten ohne Probleme genug (>200) stabile Merkmale extrahiert werden. Die Anzahl der stabilen Merkmale nahm bei Erhöhung des Trübungswertes stetig ab, bis bei 5.2 FTU keine stabilen Merkmale mehr erkannt werden konnten. Um dennoch den geplanten Trübungsbereich weiter abdecken zu können wurde die Distanz zum Boden auf einen Meter reduziert. Bei dieser reduzierten Distanz konnten auch noch bei 9.5 FTU stabile Merkmale erkannt werden. Die Variation der Belichtungszeit der Kameras sowie der Beleuchtung hatte keinen signifikanten Effekt auf die Merkmalsanzahl oder Stabilität.

Als Ergebnis dieser Messreihe wurde festgehalten, dass der CUSLAM-Algorithmus für Trübung bis 4 FTU bei 2 Metern Abstand und bis 9 FTU bei einem Arbeitsabstand von einem Meter einsetzbar ist.

## Ergebnisse

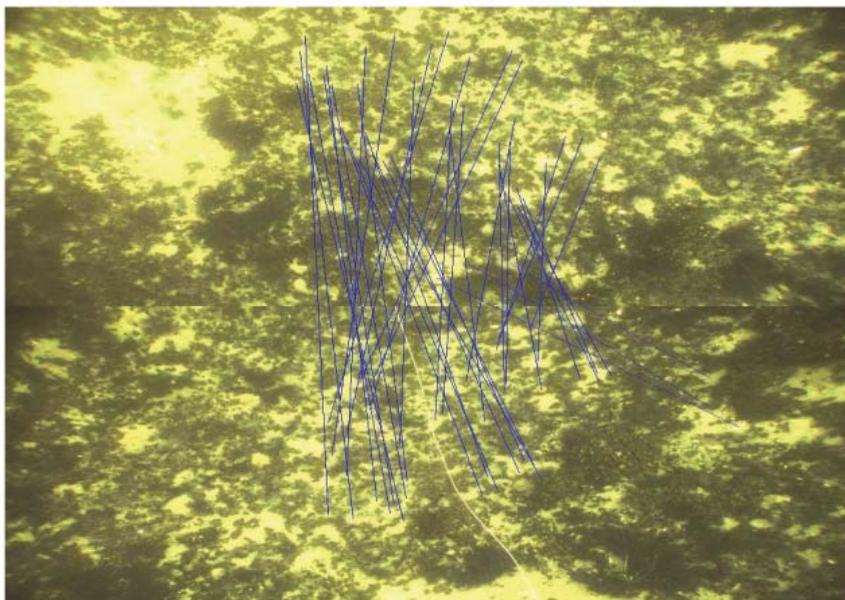
Die ersten Versuche auf Realdaten erfolgten im Testbecken am DFKI-RIC. Dabei fuhr Dagon eine Strecke von ca. 28 m (zwei Rechtecke mit Kantenlänge von 4x3 m), während das AUV zu Beginn und zum Ende manuell an eine fixe Position gebracht wurde. Der Abstand zum Boden betrug 1.2 m, Fahrtgeschwindigkeit waren 0.3 m/s. Der APE erzeugte bei ausgeschaltetem SLAM-Teil (da für den RPE auch kein LBL im Testbecken zur Verfügung stand) einen Wegfehler von 0.25 m, also eine Abweichung von 0.9 % im Bezug auf die gefahrene Strecke. Gleichzeitig wurde vom RPE ein Wegfehler von 0.28 m, also eine Abweichung von 1.02 % gemessen. Bei den gegebenen Messgenauigkeiten können diese Werte als gleichwertig angesehen werden. Damit können sowohl eine Funktion des APE als auch die Validität unter Echtzeitbedingungen als nachgewiesen angesehen werden.



Abb. 12: Trajektorie zur Überprüfung des Loop-Closing. Der Algorithmus muss an den Kreuzungspunkten Bildmerkmale wiedererkennen.

Die Ergebnisse aus Rostock zeigen, dass der Algorithmus auch im Außeneinsatz hervorragend funktioniert. Abb. 12 zeigt eine typische Trajektorie, die für die Versuche benutzt wurde. Es handelt sich um die Aneinanderreihung von Rechtecken, die jeweils um die halbe Seitenlänge nach rechts unten (bzw. hinten) versetzt ausgeführt werden. Dies führt zu einer Reihe von Kreuzungspunkten, was für die Evaluation des CUSLAM-Algorithmus ein wichti-

ges Kriterium darstellte. Die Abb. 13 zeigt ein Loop-Closing an einem der Kreuzungspunkte. Hier sind die Bilder mit einem Zeitabstand von ca. 10 Minuten aufgenommen und 90 Grad zueinander gedreht. Der CUSLAM-Algorithmus hat trotz der langen Zeitdifferenz eine Reihe von Bildmerkmalen wiedererkannt und konnte eine korrekte geometrische Transformation zwischen den beiden Aufnahmepositionen berechnen. Diese Information kann nun zur Langzeitstabilisierung der visuellen Lokalisation verwendet werden. So konnte nach dem Abfahren einer 165m langen Strecke ein Positionsfehler von 0.72 m, also eine Abweichung von 0.43% gemessen werden, was ein sehr gutes Ergebnis darstellt.



*Abb. 13: Erfolgreiches Loop-Closing: die blauen Linien verbinden die Bildmerkmale der beiden Aufnahmen des Meeresbodens, die in einem zeitlichen Abstand von ca. einer halben Stunde aufgenommen wurden.*

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Der im CUSLAM-Projekt entwickelte Algorithmus ist so ausgelegt, dass er auf einer großen Bandbreite von Fahrzeugen einsatzfähig ist. Die Befähigung zur robusten Selbstlokalisierung auch kostengünstiger Fahrzeuge eröffnet Industrieunternehmen die Möglichkeit, Unterwasserproduktionsstätten autonom zu überwachen oder mögliche Ressourcenabbaufelder zu erschließen.

Dagon hat in den drei Jahren Projektlaufzeit über 400 Stunden im Einsatz verbracht, davon jeweils ungefähr die Hälfte in den Testbecken am DFKI-RIC

und die andere Hälfte in Seen und im Meer. Dabei konnte die Funktion des Algorithmus in realen Testumgebungen nachgewiesen werden. Das im CUS-LAM-Projekt verwendete Versuchskonzept, möglichst nahe an der Zielumgebung Messdaten aufzuzeichnen, hat sich demnach bewährt, und wird auch für Folgeprojekte Anwendung finden.

## Literatur

- [1] R. M. Eustice, "Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles," PhD, MIT, April 2008.
- [2] P. Corke, J. Lobo, and J. Dias, "An Introduction to Inertial and Visual Sensing," the International Journal of Robotics Research, vol. 26, no. 6, pp. 519–535, June 2007.
- [3] M. Dunbabin, P. Corke, and G. Buskey, "Low-cost vision-based AUV guidance system for reef navigation," in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, no. April.
- [4] D. W. Allan. Statistics of atomic frequency standards. Proceedings of the IEEE, 54(2):221-230, 2005.
- [5] Kuemmerle R., Grisetti G., Strasdat H., Konolige K., and Burgard W.: g2o: A General Framework for Graph Optimization, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2011.

# QulnLas – Qualitätsgerechte 3D Laser-Schweißbearbeitung innovativer Schiffskonstruktionen“

C. Emmelmann, M. Kirchhoff (Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS – TUHH)); W. Fricke, C. Robert (Institut für Konstruktion und Festigkeit (SKF – TUHH)); A. Drenker (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)); F. Niese (Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)); R. Wagener (Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF)); M. Kogel-Hollacher (Precitec Optronik GmbH); C. Paul (Carl Cloos Schweißtechnik GmbH); J. Thieme, T. Westphäling (IPG Laser GmbH)

## 1. Einleitung

Der Schiffbau stellt mit seinen Produkten und Qualitätsanforderungen seitens der Klassifikationsgesellschaft verbunden mit den großen Abmaßen dreidimensionaler Bauteile höchste Anforderungen an die Fügechnik im Stahlbau. Verbunden mit der intensiven Konkurrenz durch ostasiatische Werften besteht hier der Bedarf und die Notwendigkeit, die Produktivität und Qualität des Stahlbaus stetig zu steigern. Dabei besitzen die Fügeverfahren und die an diese Verfahren angepassten Konstruktionen einen erheblichen Anteil an der Produktivität und der Qualität des Ergebnisses.

Mittels des Einsatzes der Laserstrahlschweißtechnologie, die seit vielen Jahren im Schiffbau bereits in der Paneelfertigung Anwendung findet, sind dabei neuartige Konstruktionen der Schiffskörper möglich. Der feine und dennoch hochenergetische Laserstrahl erlaubt das nahezu verzugsfreie Verschweißen von dünnen Blechen, wie sie mit konventionellen Schweißverfahren nicht in einer vergleichbaren Qualität gefügt werden können. Darüber hinaus können durch den Einsatz der Laser-Remote-Technologie, dem Schweißen mit großen Abständen zwischen Werkstück und Werkzeug von über 1,5 m, auch bisher nur schwer zugängliche Positionen im Schiffbau mit höchster Qualität gefügt werden.

## 2. Motivation und Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Forschungsprojektes QulnLas werden neue Konstruktionsansätze erarbeitet und erforscht, die Schiffe leichter zu gestalten und schneller zu fertigen. Zu den wesentlichen Fertigungsaufgaben im Schiffbau gehört insbesondere die Fügebearbeitung von Schiffsstrukturbauteilen. Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt, dass hierbei neben den konventionellen Verfahren, wie z. B. dem MIG- oder MAG- Schweißen, auch neuartige Schweißverfahren, wie das Laserstrahlschweißen, verstärkt eingesetzt wer-

den. Die Vielzahl der derzeit verfügbaren Verfahren führt dazu, dass bei der Neukonstruktion von Bauteilen und der Fertigungsplanung ein kritischer Vergleich aller Verfahren für eine bauteilspezifische Auswahl notwendig ist. Hierzu gehört neben einer Bewertung der fertigungstechnologischen, werkstoffspezifischen, qualitätsspezifischen und wirtschaftlichen Potentiale der einzelnen Techniken ebenso die Kenntnis der verfahrensspezifischen und konstruktiven Gestaltungspotentiale, um einen Leichtbau realisieren zu können.

Das Ziel des Projektes QulnLas ist es, für die neuen lasergestützten Fügeverfahren wie das Laser-Remote-Heften und Laser-Hybrid-Schweißen Prozess- und Systemtechnik sowie Bewertungsmethoden zu entwickeln, mit denen sich zukünftige Anforderungen an dreidimensionale Schweißkonstruktionen im Schiffbau erfüllen lassen. Zur umfangreichen und produktiven Nutzung geringer Blechdicken und verfahrensbedingter geringer thermischer Verzüge des Laserfügens für innovative Schiffskonstruktionen wird ein Fertigungsdemonstrator für das dreidimensionale (3D) flexible Laser-Remote- und -Hybrid-Schweißen mit hohem Automatisierungspotential entwickelt. Weiterhin soll zur Reduzierung des Qualitätssicherungsaufwandes eine integrierte Qualitätsdiagnose und -bewertung über hinterlegte Berechnungsmodelle zur Festigkeit eine direkte Aussage der Füge- und Prozessqualität liefern.

### **3. Zusammensetzung und Struktur des Verbundvorhabens**

Der Forschungsverbund, unter der Projektleitung des Institutes für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH), umfasst insgesamt 11 Partner. Dazu zählen auf der wissenschaftlichen Seite insgesamt 5 Institute aus den Bereichen Lasertechnik (iLAS, Hamburg; ILT, Aachen), Qualitätsdiagnose (IZFP, Saarbrücken) sowie Betriebsfestigkeit (SKF, Hamburg; LBF, Darmstadt), sowie 6 Industrievertreter (Meyer Werft, Papenburg; Blohm und Voss, Hamburg; Cloos, Haiger; Germanischer Lloyd, Hamburg; IPG Laser, Burbach; Precitec, Gaggenau).

Um die oben skizzierten Themengebiete strukturiert bearbeiten zu können, wurde das Vorhaben in insgesamt drei Cluster und damit drei Arbeitsgruppen aufgeteilt. Die Gruppe „Innovative Schiffskonstruktion“, der die Institute LBF und SKF sowie die Meyer Werft und Blohm und Voss angehören, beschäftigt sich mit der Bewertung neuartiger Konstruktionen, die durch die Laserstrahltechnologie möglich werden sowie der Berechnung und Untersuchung der Lebensdauern der lasergeschweißten Konstruktionen. Die zweite Gruppe „3D-Laser Fertigungsdemonstrator“ erforscht den Prozess des Laser-Hybrid- sowie des Laser-Remote-Schweißens mit Laserstrahlleistungen bis zu 30 kW. Darüber hinaus sind wesentliche Bestandteile der Arbeiten dieser Grup-

pe, die Entwicklung, die Konstruktion und der Aufbau des Laser-Fertigungs-demonstrators, an dem die Demonstratorbauteile ausgeschweißt werden sollen. Mitglieder dieser Gruppe sind auf Institutsseite das iLAS sowie auf der Industrieseite die Firmen Cloos und IPG. Die dritte Gruppe „Integrierte Qualitätssicherung“, bestehend aus den Instituten ILT und IZFP sowie dem Unternehmen Precitec, erforscht im Rahmen des Verbundvorhabens die Möglichkeiten der In-Prozess-Diagnostik sowie der Post-Prozess-Diagnostik mittels Ultraschall und Oberflächenmesstechnik.

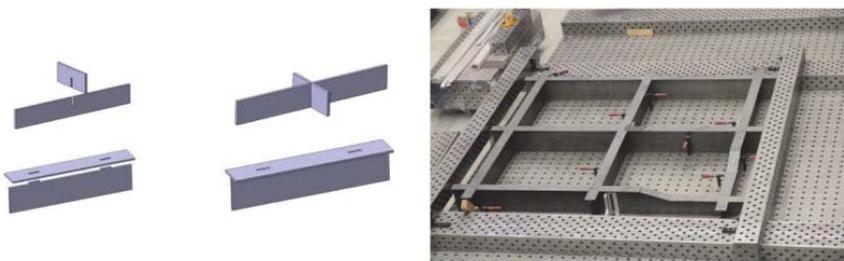
Die bisherigen Ergebnisse sowie Inhalte sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

#### **4. Darstellung der Teilvorhaben**

##### **4.1 Innovative Schiffskonstruktion (LBF, SKF, Meyer-Werft, Blohm&Voss)**

###### **4.1.1 Neuartige Konstruktionen**

Ausgangspunkt der innovativen Fertigung und der damit verbundenen Bauteilkonstruktion bildet eine in Zusammenarbeit mit der Werftindustrie entwickelte Demonstratorsektion, die die typischen werftspezifischen konstruktiven und schweißprozess-technischen Herausforderungen beinhaltet. Es wurden relevante Bauteile wie Kniebleche, Dichtbleche, Wände etc. integriert und dabei so angeordnet, dass im Schiffbau auftretende minimale Bauteilabstände abgebildet werden. Durch die Worst-Case Gestaltung kann sichergestellt werden, dass die Forschungsergebnisse auf reale Schiffssektionen übertragen werden können.



*Abb. 1: links: Übersicht der untersuchten Verbindungen - gekämmter Kreuzstoß (oben) und Gurt-Steg-Verbindung (unten)-, rechts: realer Aufbau der Konzepte*

Abb. 1 zeigt zwei Beispiele für innovative Bauteilkonstruktionen im Schiffbau. Oben dargestellt ist eine gekämmte Verbindung, bei der beide Bauteile beim Zuschneiden mit einem Schlitz versehen und so beim Aufstellen ineinander

gesteckt werden können. Sie sind somit eindeutig zueinander fixiert und können sich während des Schweißens nicht verziehen. Sinnvoll eingesetzt werden kann dieses Konstruktionsprinzip für Längs- und Quersteifen einer Sektion. Das gleiche Ziel verfolgt die in Abb. 1 unten am Beispiel der Gurt- / Stegverbindung dargestellte Steckverbindung. Der Steg wird beim Laserschnitt mit einer Fahne versehen, die beim Zusammenstecken der Bauteile in eine entsprechende Aussparung des Gurtes greift und die Bauteile so zueinander fixiert. Die beiden dargestellten Lösungen werden sowohl hinsichtlich der schweißprozess-technischen Realisierbarkeit als auch hinsichtlich der Dauerschwingfestigkeit auf ihre Eignung hin untersucht.

#### 4.1.2 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Mit Hilfe von Wöhler- und Gassnerversuchen an über 50 verschiedenen Versuchsserien wird vom Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen der TU Hamburg-Harburg (SKF) und dem Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) innerhalb des QuInLas-Projektes die Schwingfestigkeit laser- und laserhybridgeschweißter Konstruktionen untersucht. Das aufgestellte Versuchsprogramm umfasst neben konventionellen Verbindungsarten, wie Stumpf-, Kreuz- und T-Stößen, die im Schiffbau häufig vorkommen, auch innovative, auf die Fertigung mit dem Laser optimierte, Verbindungsformen. In Abb. 2 ist eine Übersicht der untersuchten Verbindungen dargestellt. Da eine manuelle Zugänglichkeit zum Werkstück während des automatisierten Schweißvorganges nicht möglich ist, sind innovative Steckverbindungen von Nöten.

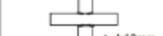
Konventionelle Verbindungen			Innovative Verbindungen		
Probenform und Belastungsart	Schweißverfahren	Versuchsart	Probenform und Belastungsart	Schweißverfahren	Versuchsart
 Stumpfstoß t=4,10mm	Laserhybrid (einseitig)	Wöhler	 Stichnaht durch Gurt t=10mm	Laser only	Wöhler
 Quersteife u. T-Stoß t=4,10mm	Laser only u. -hybrid (einseitig, beidseitig, teildurchgeschweißt)	Wöhler u. Gassner	 Steckverbindung t=10mm	Laser only u. -hybrid	Wöhler
 Kreuzstoß t=4,10mm	Laser only u. -hybrid (einseitig, beidseitig, teildurchgeschweißt)	Wöhler u. Gassner	 Gekämmter Kreuzstoß t=10mm	Laser only u. -hybrid	Wöhler
 Längssteife t=4,10mm	Laser only u. -hybrid (einseitig, beidseitig, teildurchgeschweißt)	Wöhler u. Gassner	 3D-Bauteil	Laser only u. -hybrid	Wöhler

Abb. 2: Übersicht der untersuchten Verbindungen

Zu den innovativen Probenformen zählen Kreuzstöße aus gekämmten Platten oder Gurte mit Steckverbindungen. Zum anderen wird auch die Stichnaht

durch den Gurt an 10 mm dicken Blechen untersucht. Auf Grund dieser neuen Geometrien und damit evtl. einhergehender Störungen im Schweißnahtbereich kann es zu erhöhten Kerbwirkungen und anderen Fehlstellen kommen, welche die Schwingfestigkeit entscheidend beeinflussen können. Dem gegenüber verspricht das Laserstrahlschweißen Vorteile, welche die Schwingfestigkeit steigern können. Zum Beispiel ergibt sich ein geringerer Verzug durch die gezieltere Wärmeeinbringung und die kleinere Größe der Schweißnaht. Nicht zuletzt kann auch die gleichbleibende Qualität der automatisiert hergestellten Nähte von Vorteil sein. Die Schwingfestigkeitsversuche werden zeigen, welche Vor- und Nachteile überwiegen.

Im QuInLas-Projekt wird zudem versucht, einen Zusammenhang zwischen der Qualitätsdiagnose und der Schwingfestigkeit herzustellen. Hierzu werden gezielt Schweißnähte mit Fehlstellen hergestellt und mit Hilfe von Laserscannern aufgemessen. So kann anhand der gewonnenen Geometriedaten und den einhergehenden Parameterstudien mit Finite-Elemente-Berechnungen auf den Einfluss der einzelnen Parameter geschlossen werden. Das Kerbspannungskonzept findet hier seine Anwendung. Abb. 3 zeigt das Schliffbild und das parametergesteuerte Kerbspannungsmodell einer einseitig teildurchgeschweißten Quersteife, welche mit dem Laserhybrid-Prozess geschweißt wurde und eine nicht unerhebliche Einbrandkerbe aufweist. Dargestellt ist die Verteilung der ersten Hauptspannung nach Aufbringen der Randbedingungen in zwei Lastschritten. Der erste Lastschritt simuliert das Einspannen der Probe (grüne Randbedingungen in Abb. 3 unten) und damit die Auswirkungen des Winkelverzuges. Im zweiten Lastschritt wird die Probe am linken Ende fest eingespannt und am rechten Ende wird die Maximallast aufgebracht (rote Randbedingungen in Abb. 3 unten).

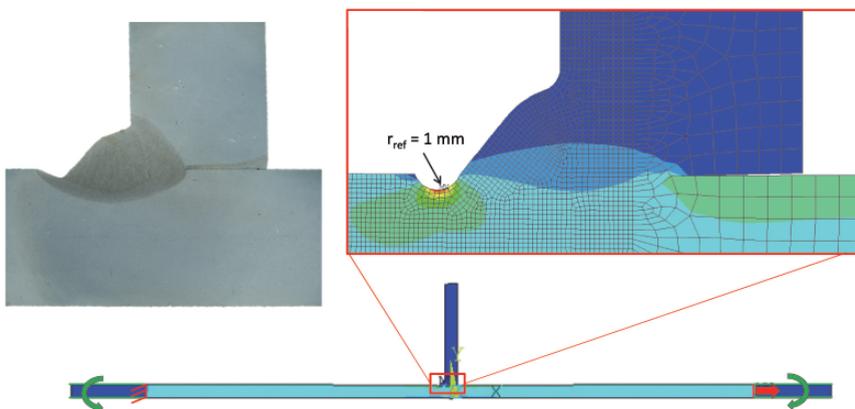


Abb. 3: Schliffbild und FE-Modell einer einseitig teildurchgeschweißten Laserhybrid-Probe mit Einbrandkerbe

Das parametrische Kerbspannungsmodell ermöglicht so die quantitative Untersuchung einzelner Qualitätsmerkmale wie zum Beispiel dem Winkelverzug oder Schweißnahtungängen wie der dargestellten Einbrandkerbe.

Bei der Erstellung der Schwingfestigkeitsproben kann zudem auf die an den Probenblechen vorgenommenen Ultraschalluntersuchungen des IZFP zurückgegriffen werden, sodass gefundene Schweiß- und Materialfehlstellen explizit auf ihren Schwingfestigkeitseinfluss untersucht werden können.

Der zu fertigende Bauteildemonstrator bietet ergänzend die Möglichkeit unter realen Bedingungen gefertigte Bauteile auf ihre Schwingfestigkeit zu untersuchen. Hierzu werden einzelne an den Bauteildemonstrator angelehnte Sektionen hergestellt und getestet. Begleitende FE-Berechnungen können auch hierbei für Parameterstudien genutzt werden.

## **4.2 3D-Laser Fertigungsdemonstrators (iLAS, Cloos, IPG)**

### **4.2.1 Entwicklung des Laser-Remote-Schweißens für Schiffskonstruktionen**

Die Technologie des Laser-Remote-Schweißens wird seit mehreren Jahren erfolgreich insbesondere in der Automobil- und -zulieferindustrie eingesetzt. Die Idee hierbei ist die Kombination der Strahlbewegung über einen hochdynamischen Spiegel verbunden mit einer Brennweite von über 500 mm. Dies erlaubt Spotgeschwindigkeiten über 60 m/min. Insbesondere für das Setzen einer großen Anzahl an Heftnähten erlaubt diese Technologie mit Sprunggeschwindigkeiten über 300 m/min die Reduktion der Nebenzeiten zwischen den Nähten auf ein Minimum.

Im Bereich des Schiffbaus hat diese Technologie aus zwei Gründen bisher keinen Einzug gefunden. Zum einen waren bisher Strahlleistungen größer 10 kW, wie sie für die hier eingesetzten Materialdicken (> 10 mm) benötigt werden, nicht verfügbar. Zum anderen ist die bisherige Praxis der manuell gesetzten Heftnähte für das anschließende Ausschweißen mittels MSG-Verfahren ausreichend. Für das Ausschweißen mittels der Laser-only oder der Laser-MSG-Hybrid-Technologie sind diese Heftstellen allerdings nicht einsetzbar, da das  $a$ -Maß zu groß ist und die Nähte in ihrer Ausprägung vom Schweißer abhängen.

Weiterentwicklungen im Bereich der Laserstrahltechnologie haben Strahlquellen ermöglicht, die deutlich über 10 kW Laserstrahlleistung liegen.

Die oben genannten gekämmten Wände werden dazu zunächst zusammengesteckt und anschließend mittels der Laser-Remote-Technologie vollstän-

dig ausgeheftet. So wird das Bauteil ausreichend steif, um es anschließend mittels der Laser-Hybrid-Technologie auszuschweißen.

Die für die Remote-Technologie erforderlichen Laserstrahlleistungen sowie -qualitäten führten zu einer Neuentwicklung einer Laserstrahlquelle durch die Firma IPG. Die hier eingesetzte Laserstrahlquelle mit 30 kW Laserstrahlleistung verfügt zudem über eine Strahlweiche mit zwei Ausgängen, so dass der Laser-Remote-Kopf wie auch der Laser-MSG-Hybrid-Kopf parallel angeschlossen sein können. Die Prozessfasern besitzen einen Durchmesser von 300  $\mu\text{m}$ . Erste Testreihen zeigen dabei das große Potential dieser Strahlquelle, die systematischen Untersuchungen folgen.

#### 4.2.2 Prozessentwicklungen für das Laser-MSG-Hybrid-Schweißen mit hoher Laserstrahlleistung

Neben den klassischen Verbindungen, wie dem Stumpf- und dem T-Stoß, wurden auch Versuche zu neuen Verbindungsgeometrien wie dem gekämmten T-Stoß durchgeführt. Die grundsätzliche Machbarkeit der Schweißaufgabe konnte in allen Versuchsreihen nachgewiesen werden. Der Prozess hat, verglichen mit bisherigen Projektuntersuchungen mit Leistungen unter 12 kW zu dieser Technologie, eine Reihe von Anpassungen erfahren, die sich im Wesentlichen auf die Parameter Fokusslage und MSG-Parameter beziehen.



Abb. 4: Schliffbild eines T-Stoßes, Materialdicke  $t = 10\text{ mm}$

Mit den verfügbaren Laserstrahlleistungen wird es möglich, auch schiffbaupische Materialdicken einseitig mit voller Durchschweißung zu fügen. In Abb. 4 ist ein Schliff dargestellt, der mit 18 kW Laserstrahlleistung geschweißt wurde. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass nicht die Einschweißtiefe der

begrenzende Faktor ist, sondern die Winkelstellung der Bearbeitungsoptik zum Werkstück. In diesem Falle war die Optik mit einem Winkel über  $15^\circ$  zum Werkstück angeordnet, so dass keine Durchschweißung stattgefunden hat. Daraus folgt, dass ein Einstrahlwinkel von unter  $10^\circ$  erforderlich ist, sowohl für den Laser-only wie auch den Laser-MSG-Hybrid-Prozess. Diese Forderung fand Einzug in die Konstruktion des Laser-MSG-Hybrid-Kopfes, s. Abb. 5.



*Abb. 5: Laser-MSG-Hybrid-Kopf mit zusätzlicher Drehachse für den Brenner*

Mit dieser Konstruktion ist es möglich, mit dem Laserstrahl flach einzukoppeln und somit eine große Einschweißtiefe zu erzielen. Die koaxial um den Laserstrahl drehbare Zusatzachse für den MSG-Brenner ermöglicht es dabei, den Brenner in die für den Prozess optimale Winkelhalbierende zu stellen.

Bis jetzt sind Versuche mit bis zu 18 kW gefahren worden, die zwei Aspekte beleuchtet haben.

Zunächst wurde sowohl simulativ als auch in der Praxis die Zugänglichkeit mit dem neuen Kopf untersucht. Insbesondere beim Verschweißen der Wände auf dem Paneel ergeben sich schwer zugängliche Schweißpositionen und erforderten mehrfache konstruktive Überarbeitungen des Bearbeitungskopfes, insbesondere um diesen kompakter zu gestalten.

Als zweiter Aspekt standen hier die Spaltüberbrückbarkeit sowie die Nahtfolge im Vordergrund. Die ersten Versuche zeigen hier das Potential, bis zu einem Millimeter Spalt zu überbrücken, ein Spaltmaß, das mit den neuen kon-

struktiven Lösungen auch im Schiffbau realisierbar ist. Für die Nahtfolge wird innerhalb des Projektes aufbauend auf die durchgeführten Zugänglichkeitsuntersuchungen eine technische Lösung erforscht, die eine koaxiale Nahtfolge ermöglicht.

### 4.2.3 Aufbau des Roboterportals

Die in vorhergehenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse haben Einzug gefunden in die Konstruktion des Fertigungsdemonstrators. Dieses Roboterportal wurde im Laser Zentrum Nord in Hamburg aufgebaut, so dass hier die Versuche an schiffbautypischen Großstrukturen durchgeführt werden können. Dazu besitzt der in Abb. 6 dargestellte Demonstrator eine Länge von 30 m und ist in der Lage, Bauteile bis zu einer Breite von 3 m sowie einer Höhe von 3 m zu bearbeiten.



*Abb. 6: Blick auf den Fertigungsdemonstrator mit Portal 1 (vorne), Portal 2 (mitte) und Portal 3 (hinten)*

Das Portal 1 führt den Laser-Remote-Demonstrator, mit dem das zuvor aufgestellte Bauteil geheftet wird. Mit dem Portal 2 wird mittels der Laser-MSG-Hybrid-Technologie das Bauteil ausgeschweißt. Die abschließende zerstörungsfreie Prüfung wird mittels des Ultraschallkopfes am Portal 3 durchgeführt.

Diese Reihenfolge entspricht darüber hinaus auch der Fertigungsreihenfolge. Zunächst werden die Einzelteile unter dem Portal zusammengesetzt. Die Positionierung erfolgt dabei über die Bauteilkonstruktion, wie z. B. durch gekämmte Verbindungen oder durch angepasste Spannvorrichtungen.

Nach der Montage der Einzelteile erfolgt durch ein in den Laser-Remote-Demonstrator integriertes Kamerasystem eine Vermessung der Baueil- und Nahtlagen, die zu einer Korrektur der Bearbeitungsbahn für das Verschweißen genutzt wird. In einem ersten Schritt wird dabei die Konstruktion durch den Laser-Remote-Prozess ausgeheftet, so dass diese eine für das anschließende Verschweißen ausreichende Stabilität besitzt. Das Ausschweißen findet mittels der Laser-MSG-Hybrid-Technologie statt. Prozessbegleitend und in den Bearbeitungskopf integriert erfolgt dabei die Online-Prozessdiagnostik. Hier detektierte Fehlstellen werden in einem dritten Prozessschritt durch den Ultraschallkopf angefahren und ausgewertet.

### **4.3 Integrierte Qualitätssicherung (ILT, IZFP, Precitec)**

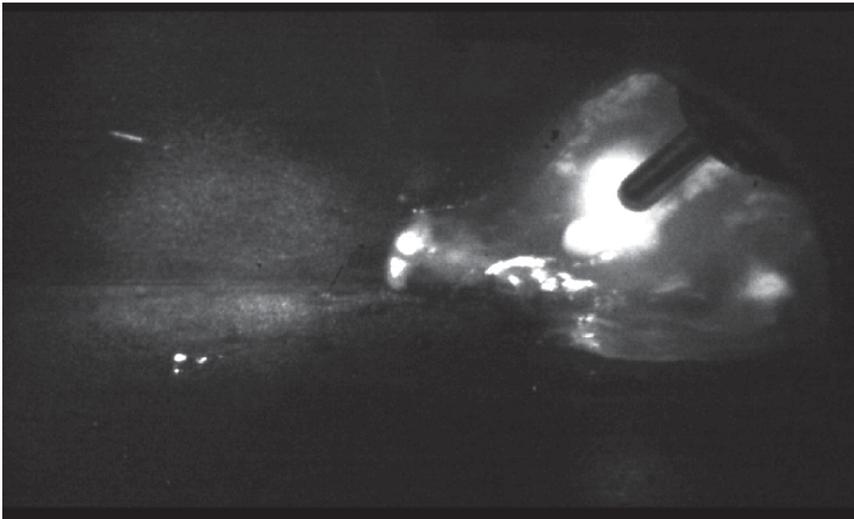
#### **4.3.1 Online-Qualitätsdiagnose für das Festkörperlaser-Lichtbogen-Hybridschweißen im Schiffbau**

Die lasergestützten Fügeverfahren Laser-Remote-Heften und Laser-Hybrid-Schweißen erfordern Prozess-, System- und Bewertungsmethoden, um künftige Anforderungen an dreidimensionale Schweißkonstruktionen im Schiffbau zu erfüllen. Dies ist zunehmend erforderlich, da die lasergestützten Fügeverfahren aufgrund ihrer verfahrensbedingten geringen thermischen Verzüge vorteilhaft zur Herstellung dünnwandiger 3D-Strukturen ( $t = 4 \text{ mm}$  bis  $10 \text{ mm}$ ) eingesetzt werden. Die Ermittlung der Füge- und Prozessqualität erfolgt dabei unter realitätsnahen Bedingungen mit einem Fertigungs-demonstrator für das flexible Laser-Remote- und -Hybrid-Schweißen und integrierter Qualitätsdiagnose und -bewertung.

Beim Laser-MSG-Hybrid-Schweißen wird intensive Strahlung über das gesamte optische Spektrum (UV, VIS, NIR) aus der Prozesszone emittiert. Die Intensität der Strahlung schwankt mit der Pulsfrequenz des MSG-Lichtbogens. Zur berührungsfreien optischen Prozessüberwachung werden ortauflösende bildgebende Kamera- und ortsintegrierende Sensor-Systeme eingesetzt. Der Laser-MSG-Hybrid-Schweiß-Prozess wird mit dem CPC-System des ILT mit einer High-Speed-CMOS-Kamera durch einen schmalbandigen optischen Bandpassfilter koaxial durch die Fokussieroptik hindurch beobachtet und überwacht. Zur ‚Blitzlicht‘-Beleuchtung der Prozesszone wird ein Superpuls-Diodenlaser eingesetzt, der lateral neben der Fokussieroptik angeordnet ist und gleichzeitig mit Belichtung der Kamera synchron zu den Strompulsen der Schweißstromquelle angesteuert wird. Ziel ist die automatisierte Fugenfolge und die online Überwachung der Stabilität des Laser-MSG-Hybrid-Prozesses beim Fügen von 3D-Schiffbaustrukturen.

Durch die synchrone Belichtung zwischen den Strompulsen mittels der gepulsten Beleuchtungsstrahlquelle werden Bilddaten aufgezeichnet, aus de-

nen die Position der Kapillare (keyhole) relativ zum Fügespalt ermittelt wird. Abb. 7 zeigt ein Einzelbild aus einer CPC-Aufnahmesequenz, die beim Laserstrahl-Hybrid-Schweißen synchron mit den Strompulsen der Schweißstromquelle aufgezeichnet wurde. Rechts neben der vom Laserstrahl erzeugten Kapillare (Keyhole) in der Bildmitte ist zwischen Schweißdraht und Schmelze ein fliegender Tropfen zu erkennen, der mit dem Schweißstrompuls 2 ms vorher vom Zusatzdraht abgeschmolzen worden ist. Bei einem stabilen Prozess wiederholt sich der Vorgang periodisch mit jedem Strompuls der Schweißstromquelle, so dass bedingt durch den Stroboskopeffekt in der Bilderfolge der Tropfen immer an derselben Position zu schweben scheint.



*Abb. 7: CPC-Aufnahme beim Laserstrahl-Hybrid-Schweißen, die mit den Strompulsen der Schweißstromquelle synchronisiert aufgezeichnet wurde. (Erläuterung im Text)*

Gegenstand der laufenden Entwicklungsarbeit ist die Implementierung von echtzeitfähigen Algorithmen zur Bildverarbeitung. Um die Position des Laserstrahls relativ zur Fuge genau einzuhalten und Abweichungen automatisch auszugleichen, die z.B. durch Wärmeverzug der Bauteile entstehen, wird eine auf den Echtzeitbildverarbeitung aufbauende Fugenfolgeregelung entwickelt und in den Fertigungsdemonstrator integriert.

Mit dem realisierten System werden mittelfristig Aussagen zur Prozessqualität und -stabilität laserbasierter Fügeverfahren für Anwendungen im Schiffbau, Stahlbau, Fahrzeugbau und bei der Herstellung von Rohren erwartet.

### 4.3.2 Berührungslose Ultraschalluntersuchung schiffbautypischer Schweißverbindungen

Die Qualität einer Schweißnaht wird neben der Form, Geometrie und Ausführung auch von makroskopischen Fehlstellen, wie Poren, Rissen oder Bindefehlern, beeinflusst. Besonders in stark belasteten Bereichen kommt der Fehlerfreiheit der Schweißnähte eine hohe Bedeutung zu.

Durch eine Kontrolle der Naht im Anschluss an den Schweißprozess mit einem geeigneten Diagnosesystem hat man die Möglichkeit, fehlerhafte Bereiche zu erkennen, zu charakterisieren und ggf. nachzuarbeiten. Im Rahmen dieses Projektes wird dazu eine Prüfung mit Ultraschall vorgenommen, die hier näher vorgestellt werden soll.

Die an die Prüfaufgabe angepasste und optimierte Prüfeinrichtung dient sowohl zum Fehlernachweis als auch zur Charakterisierung möglicher Fehlstellen in der Schweißnaht. Dazu müssen sie in ihren Fehlerparametern (Fehlertyp, Position, Lage, Größe usw.) beschrieben werden. Durch die besondere Ausgestaltung des Ultraschallprüfkopfes, der gleichzeitig eine Inspektion der Schweißnaht in Beugungs- und Reflexionsanordnung erlaubt, ist eine Unterscheidung in porenartige (räumlich eng begrenzte) und rissartigen (räumlich in Nahrichtung ausgedehnte) Schweißnahtfehler möglich. Da der Prüfkopf während der Prüfung parallel zur Schweißnaht geführt wird, ist eine eng gestartete Inspektion der Naht möglich. Die Echoamplitude und auch die Breite der Anzeige parallel zur Schweißnaht sind weitere Merkmale zur Charakterisierung von Schweißnahtfehlern (Abb. 8).

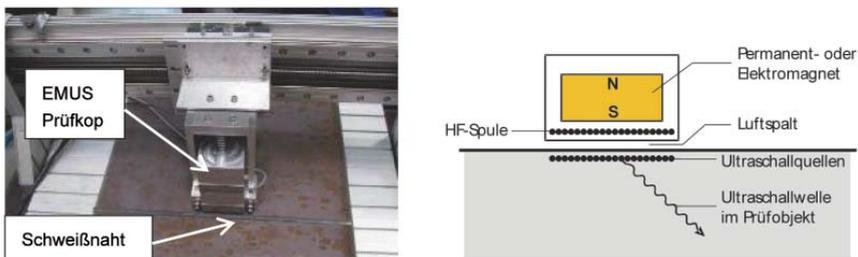


Abb. 8: Ultraschallprüfung eines I-Stoßes mit EMUS-Prüfkopf und Labormanipulator (links) und schematischer Aufbau eines EMUS-Prüfkopfes (rechts)

Um eine mechanisierte Ultraschallprüfung im Anschluss an den Schweißprozess zu erleichtern, kommen elektromagnetische Ultraschallwandler (EMUS) zum Einsatz. Diese Wandler zeichnen sich dadurch aus, dass die Ultraschallsignale über elektromagnetische Wechselwirkungen koppelmittelfrei direkt im metallischen Prüfobjekt angeregt und abgegriffen werden können.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass unter anderem einseitig unverschweißte Bereiche sowie inhomogene Bereiche der Nähte sicher detektiert werden können. Außerdem konnte anhand von Testfehlern unterschiedlicher Art (Sackbohrungen und Nuten), Größe und Tiefe die Sensitivität gegenüber relevanten Schweißnahtfehlern in T- und I-Stößen nachgewiesen werden (Abb. 9). Darüber hinaus konnten mit dieser Prüftechnik auch Schweißnahtfehler detektiert werden, die mit einer klassischen Röntgen-Durchstrahlungsprüfung nicht aufgefunden wurden, obwohl er in Schweißnahtrichtung eine Länge > 8 mm und eine max. Breite > 2 mm aufweist (Abb. 10). Mit einer anschließenden zerstörenden Untersuchung des entsprechenden Schweißnahtbereiches in Form von Querschliffen konnte eine Trennung nachgewiesen und die Ultraschallergebnisse bestätigt werden (Abb. 3).

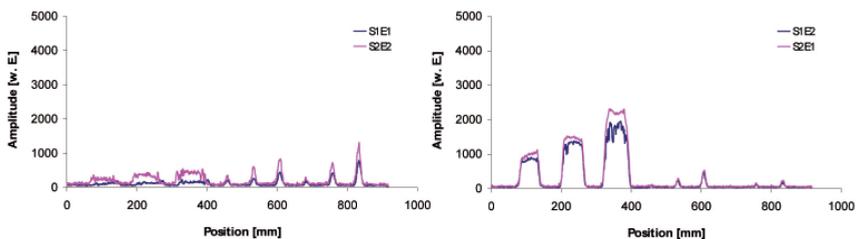


Abb. 9: Amplitudenortskurven der Beugungsanordnung (links) und der Reflexionsanordnung (rechts); Reihenfolge der Testfehler: Nuten: 50 mm lang (3x), Sackbohrungen:  $\varnothing$  2 mm und  $\varnothing$  1 mm, Tiefe jeweils 0.5 mm, 1 mm und 2 mm)

Gemäß der erarbeiteten Spezifikation und Anforderungen für eine Ultraschallprüfung als Post-Prozess-Diagnose wurde ein Gerät aufgebaut, das in den Fertigungsdemonstrator integriert wird. Es ist geeignet, den optimierten EMUS-Prüfkopf anzusteuern. Die Gerätesoftware erlaubt es, sämtliche Parametereinstellungen für die Ultraschallanregung, die Aufbereitung der Empfangssignale sowie die Automatisierung des Prüfablaufs einzustellen. Zusätzlich ist eine Darstellung der aktuellen Ultraschallsignale als A-Bild möglich. Darüber hinaus verfügt die Software über Module zur Darstellung von B-Bildern und von Amplitudenortskurven (Abb. 11).

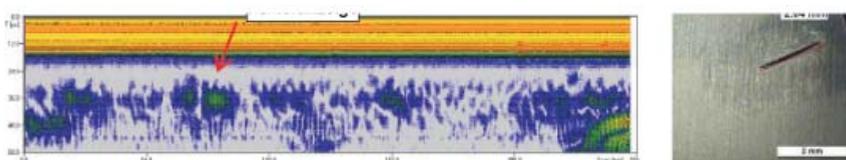


Abb. 10: Schweißnahtfehler in T-Stoß: Ultraschall-B-Bild entlang der Schweißnaht (links) und Querschliff an der Fehlerposition (rechts)

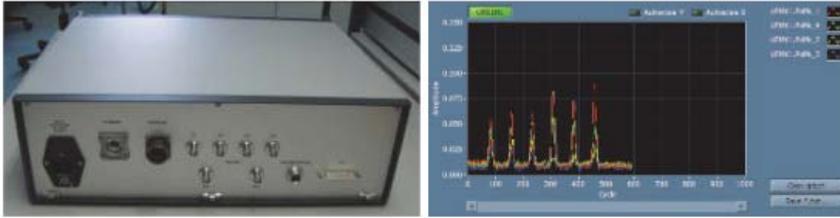


Abb. 11: Prüfgerät (links) und Programmfenster zur Online-Darstellung der Amplitudenortskurve (rechts), die gebeugten Ultraschallamplituden sind rot und grün dargestellt und die reflektierten Amplituden gelb und blau.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den im Forschungsvorhaben QulnLas untersuchten Technologien lassen sich die steigenden Anforderungen der Schiffbauindustrie hinsichtlich erreichbarer Fertigungsqualität und -zeit erfüllen.

Dazu wurde das aus dem Automobilbau bekannte Laser-Remote-Schweißen auf die Anforderungen der Schiffbauindustrie übertragen, so dass hier mit an die Materialdicken angepassten Laserstrahlleistungen geschweißt werden kann. Darüber hinaus lässt der Einsatz dieser Technologie in Kombination mit den entwickelten innovativen Schiffskonstruktionen nach den bisherigen Ergebnissen einen signifikanten Produktivitätssprung erwarten.

Die prozessparallele Online-Prozessüberwachung des Laser-MSG-Hybrid-Schweißens stellt darüber hinaus eine Neuentwicklung dar, die die Qualitätssicherung im Schiffbau deutlich erleichtern und beschleunigen kann. Ein Abgleich der In-Prozess-Qualitätsdiagnose mit der nachlaufenden Ultraschalluntersuchung lässt dabei eine Charakterisierung der Nahtfehler hinsichtlich der Fehlergröße zu. Der Einfluss auf die Nahtfestigkeit dieser Fehler ist dabei aus den durchgeführten Dauerfestigkeitsuntersuchungen bekannt. So wird der Rückschluss möglich, ob die vorliegenden Fehler zu einer Beeinträchtigung der Bauteilfestigkeit führen und eine Nacharbeit erforderlich ist. Darüber hinaus führt ein Abgleich der Analysen zu einer Reduktion von Fehldiagnosen, die eine Ausschleusung von i.O.-Bauteilen zur Folge haben können.

Die durch die Institute und Industriepartner entwickelten Lösungen werden in dem dargestellten Demonstrator zusammengeführt. Hier werden die Technologien an realen schiffbautypischen Bauteilen wie Sektionen validiert.

Durch die Vielzahl der Ziele und die zusätzlichen Aufgabestellungen, die sich innerhalb des Projektverlaufs herausgestellt haben, wird das Vorhaben nicht wie geplant zum 30.11.2012 abgeschlossen. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Artikels haben alle Projektpartner eine zwendungsneutrale Projektverlängerung um 12 Monate, d. h. bis zum 30.11.2013, beantragt.

# LeiSe – Leichtbaukomponenten für Schiffselemente

Elke Kampen, Wolfgang Sichermann (Blohm+Voss Naval GmbH (BVN)); Prof. Dr.-Ing. Dieter H. Müller, Christian König (Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK), Universität Bremen); Dr. Christof Nagel, Dr. Markus Brede, Arne Fiedler (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen); Hans-Joachim Rennecke, Alexander Fabritz, Karl Kreft, Thomas Heuermann, Kay Kayser (KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, Bremen)

## 1. Einleitung

Auf Schiffen werden als Folge der Schall- und Vibrationsanregung durch Antriebsanlagen wie Propeller und Hauptmaschine, aber auch durch Hilfsaggregate wie Pumpen und Klimaanlage, Schwingungen und Luftschall in Kabinen, Erholungsbereiche und Arbeitsbereiche übertragen. Als besonders kritisch gelten Bereiche, wo Wohn- bzw. Arbeitsräume direkt an Maschinenräume oder Schächte angrenzen (Abb. 1).

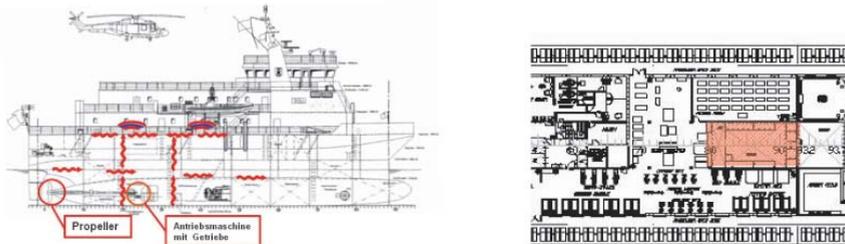


Abb. 1: Körperschallanregung, Transferpfade und kritische Bereiche

Problematisch sind insbesondere tieffrequente Geräuschanteile, zu deren Dämmung und Dämpfung auf dem Ausbreitungsweg und beim Empfänger hohe Massen bzw. große Absorberdicken erforderlich sind. Dieses steht im Widerspruch zu den steigenden Anforderungen an Energieeffizienz, Schnelligkeit, Komfort und Umweltfreundlichkeit des modernen Schiffbaus.

Gefragt sind Lösungen, die unter Berücksichtigung schiffbaulicher Sicherheitsanforderungen sowohl zur Gewichtsreduzierung bei Bauteilen und Strukturelementen als auch zum akustischen Wohlbefinden von Besatzung und Passagieren beitragen.

Ziel des Verbundprojektes „LeiSe“ war die Entwicklung leichter Wandsysteme. Unter Beibehaltung brandschutztechnischer, akustischer und thermi-

scher Eigenschaften sollte verglichen mit herkömmlichen Stahl- bzw. Aluminium-Wandsystemen eine Gewichtseinsparung von 20-25 % erzielt werden.

Erreicht werden sollte dieses durch Substitution nichttragender Schiffsinnenwände durch leicht montierbare Kassettensysteme, den Einsatz von Materialien mit Brandschutzeigenschaften und Körperschalldämpfenden Eigenschaften, hohen Abstrahlverlusten sowie Kleben als dämpfende Fügetechnik.

**Partner des Vorhabens waren:**

KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG mit dem Teilvorhaben „Entwicklung von akustisch und brandschutztechnisch wirksamen Leichtbaukomponenten“ und den Detailaufgaben

- brandschutztechnische und akustische Optimierung,
- Definition und Herstellung von Kleinprüflingen,
- Brandversuche, Materialdatenbank und Simulation thermischer Eigenschaften,
- Mock-up-Modifizierung und -Vermessung.

Blohm+Voss Naval GmbH, Werft mit dem Teilvorhaben „Systemfähigkeit“ und den Detailaufgaben

- Definition von Einsatzszenarien und schiffbaulichen Randbedingungen,
- Strukturuntersuchungen, auch in Verbindung mit der Fügetechnik,
- Portierung der Ergebnisse des Projektes auf reale Schiffbauverhältnisse.

BIK, Universität Bremen (Institut für integrierte Produktentwicklung) mit dem Teilvorhaben „Definition und Evaluation von Leichtbaumaterialien“ und den Detailaufgaben

- Erstellung einer Materialdatenbank zur Materialauswahl und Parametervariation,
- Strukturuntersuchungen,
- akustische Optimierung im Kleinprüfstand.

IFAM, Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung mit dem Teilvorhaben „Entwicklung von schwingungsdämpfenden und spannungsarmen Fügeverbindungen für Leichtbaukomponenten auf Grundlage der Klebtechnik“ und den Detailaufgaben

- Definition der Randbedingungen zur Klebverbindung,
- Klebstoffauswahl,
- Strukturuntersuchungen, Simulation, insbesondere zur Klebverbindungen,
- Portierung der Ergebnisse des Projektes auf reale Schiffbauverhältnisse.

## 2. Das Verfahren

Als Referenz-Wandsysteme wurden vier herkömmliche A60-qualifizierte Wandkonstruktionen, jeweils zwei für Stahl- bzw. Aluminiumstrukturen und deren Kenndaten ermittelt. Hinsichtlich des Brandschutzes wurde bei allen Konstruktionen die nicht-„restricted“ Variante gewählt, da die Konstruktionen „vollwertig“ von beiden Seiten das A60-Kriterium erfüllen sollten.

Weiterhin wurde sowohl für die Stahl- als auch für die Aluminiumstruktur die wohnliche Umgebung mit handelsüblichen Linings bzw. die industrielle Umgebung mit Stahl- oder Aluminiumverblechung berücksichtigt.

Folgende Referenzsysteme und Randbedingungen wurden definiert

- A60-Wandsystem aus Stahl mit industrieller Oberfläche  
Dicke 120 mm, Gewicht 63,3 kg/m<sup>2</sup>, Schalldämm-Maß  $R_w = 56$  dB
- A60-Wandsystem aus Stahl mit wohnlicher Oberfläche  
Dicke 150 mm, Gewicht 68,5 kg/m<sup>2</sup>, Schalldämm-Maß  $R_w = 61$  dB
- A60-Wandsystem aus Aluminium mit industrieller Oberfläche  
Dicke 200 mm, Gewicht 38,3 kg/m<sup>2</sup>, Schalldämm-Maß  $R_w = 50$  dB
- A60-Wandsystem aus Aluminium mit wohnlicher Oberfläche  
Dicke 230 mm, Gewicht 47,1 kg/m<sup>2</sup>, Schalldämm-Maß  $R_w = 57$  dB

Anhand von Einsatzszenarien an einem konventionellen und einem bereits gewichtsoptimierten Schiff wurden die Substitutionsmöglichkeiten konventioneller metallischer Schiffsinnenwände durch selbsttragende Schalenelemente untersucht. Die Schnittstellen Akustik, Festigkeit/Stahl und Einrichtung

wurden definiert und beschrieben sowie Kräfte und Verformungen in einem Finite-Element-Modell (FEM) für eine Beispielwand ermittelt.

Für beide Schiffsbeispiele ergaben sich aus 31 Lastfällen (unterschiedliche Massenverteilung durch unterschiedliche Füllstände von Tanks) und der Berechnung von jeweils einem Verformungskollektiv A (Geradlinien-Kollektiv mit einer Lastwechselzahl  $5,0 \times 10^7$  für eine Nutzungsdauer von 25 Jahren) Maximalverformungen und damit die maximalen Verformungsschwingbreiten.

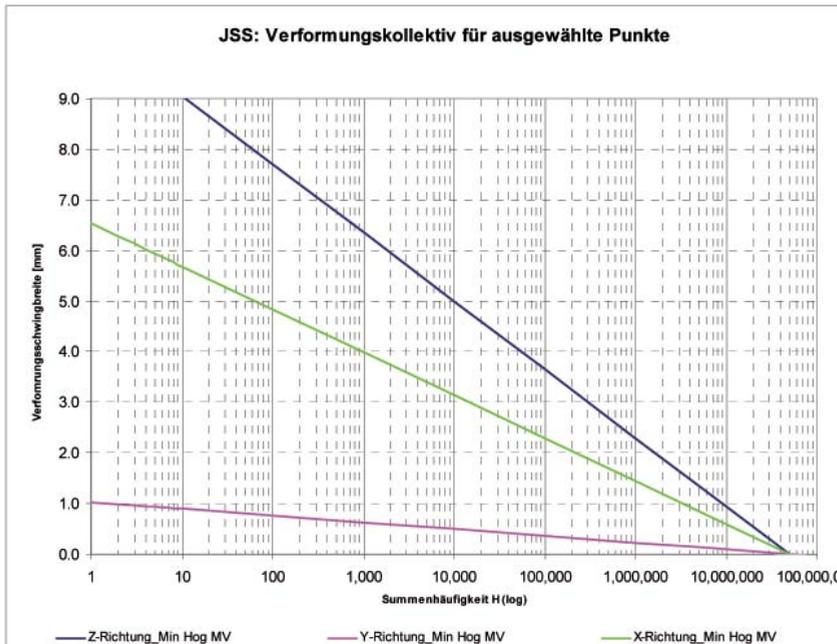


Abb. 2: Verformungskollektiv für eine Beispielwand eines nicht gewichtsoptimierten Schiffes

Die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten von Leichtbauwänden anstelle herkömmlicher Schiffsinnenwände ergab die größten Potentiale im Sonderschiffbau. Sind es bei gewichtsoptimierten Schiffen Funkräume und Operationszentralen in der Nähe von Maschinenräumen oder E-Räumen, die hohen akustischen Anforderungen sowie den A60-Kriterien unterliegen, so lassen sich bei Berücksichtigung im Schiffsentwurf zusätzliche Kostenvorteile durch Gewichtsreduzierung in der Schiffsstruktur erzielen.

Bei RoRo-Fähren wie auch bei Passagierschiffen ergibt sich geringerer Bedarf, da diese aufgrund großflächiger Decks bzw. durch den Einsatz von Fertigungskabinen bereits gewichts- und festigkeitsoptimiert sind.

Hinsichtlich der Klebtechnik galt es, Verformungen durch weiche, elastische Klebschichten aufzunehmen und gleichzeitig Schwingungsdämpfung bzw. -entkopplung zu erreichen. Neben den mechanischen Eigenschaften waren für die Klebstoffauswahl spezifische Randbedingungen des Schiffbaus wie Oberflächenzustände, Haftung, Umgebungseinflüsse und zyklische Dauerbeanspruchung entscheidend.

Mittels einer Materialmatrix (Abb. 3), einer „Funktionsstruktur Wand“ sowie durch ein „Design of Experiments“ wurden Materialien hinsichtlich ihrer Eignung in den Bereichen Brandschutz, Akustik, Festigkeit etc. bewertet und auf ihre Systemfähigkeit als Leichtbau-Schiffswände in Sandwich-Bauweise untersucht.

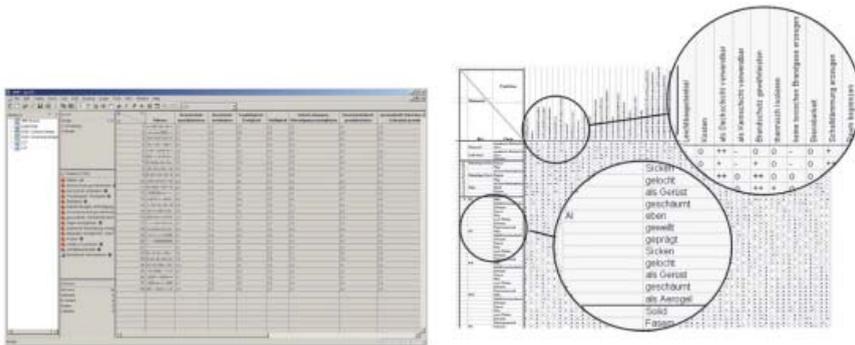


Abb. 3: Design of Experiments – Tabelle und Materialmatrix

Da das akustische und brandschutztechnische Verhalten vieler Materialien und insbesondere deren Schichtung (Kombination) teilweise unbekannt, eine vollständige Bewertung mittels Materialmatrix somit nicht möglich war, wurde parallel ein „Systemlösungsansatz“ verfolgt.

Theoretische Simulationen und der Systemlösungsansatz, basierend auf Erfahrungen der Projektpartner, führte zu einer ersten Auswahl von Wandsystemen. Um Resonanzeinbrüche mehrschaliger Systeme (Masse-Feder-Masse-Effekt) zu vermeiden, wurde dabei zunächst ein einschaliges System gewählt (Abb. 4).

Eine Kassetten-/Elementbauweise mit hohem Vorfertigungsanteil und reduzierten Montagezeiten und -fehlermöglichkeiten wurde als vorteilhaft bewertet, wobei es galt, systembedingte Stoßfugen konstruktiv und funktionell in Wandsystemen und Prüfkörpern zu berücksichtigen.



- Deckschicht, geschlossen (akustisch dämmend wirksam)
- Kernschicht (akustisch absorbierend)
- Lochblech, offen (akustisch transparent)

Abb. 4: Kassetten-Elementbauweise

Praktische Grundlagenversuche ausgewählter Materialien und deren Kombinationen dienen zur Ermittlung der projektrelevanten physikalischen Eigenschaften.

Um die Bandbreite traditioneller, schiffbaulicher Materialien zu erweitern, sollten bisher im Schiffbau nicht verwendete Materialien gemäß „International Code For Application Of Fire Test Procedures“ (FTP Code) hinsichtlich ihres Brandverhaltens orientierend qualifiziert werden.

Mit dem erforderlichen

- Nachweis der Nichtbrennbarkeit  
(Non-Combustibility IMO FTP Code Part 1)

konnten nachstehende extrem leichte, akustisch hoch wirksame Glaswollen Typ I und Typ II als nicht brennbar qualifiziert werden.

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| I. Typ 1 Rosa, 5,5 kg/m <sup>3</sup>      | Einstufung: nicht brennbar |
| II. Typ 2 Grün, 9,6 kg/m <sup>3</sup>     | Einstufung: nicht brennbar |
| III. Typ 3 Orange, 16,0 kg/m <sup>3</sup> | Einstufung: brennbar       |

Hinsichtlich des

- Nachweises der Schwerentflammbarkeit  
(Low Flame Spread, LFS- IMO FTP Code Part 5)

bewährten sich die Beschichtungen II. und III. nachstehend geprüfter Produkte nicht zuletzt aufgrund ihrer gleichmäßigen Schaumhöhe von min. 20 mm, des homogenen Schaumbildes im Schnitt sowie des gleichmäßigen Aufschäumverhaltens (Abb. 5).

- I. Beschichtung Kabelbrandschutz, ablativ wirkend, Einstufung: weitere Untersuchungen erforderlich
- II. Beschichtung Kabelbrandschutz, intumeszierend wirkend, Blähgraphit basierend, Einstufung: Anforderung LFS erfüllt

III. Beschichtung Stahlbrandschutz, intumeszierend wirkend, Einstufung: Anforderungen LFS erfüllt

IV. Kunstharzmatte, mineralisch gefüllt, Einstufung: weitere Untersuchungen erforderlich



Material II, Schnitt, aufgeschäumt



Material III, Schnitt, aufgeschäumt

Abb. 5: Schaumstruktur der Materialien II und III

Zur abschließenden Bewertung des Brandverhaltens von ausgewählten Materialkombinationen und Konstruktionen wurden insgesamt neunzehn A60-Systembrandversuche orientierend im Rahmen von Kleinbrandprüfungen erfolgreich durchgeführt. Davon werden im Folgenden 2 Brandversuche der Systeme „Stahl, industriell“ und „Aluminium, industriell“ als Fugen-Konstruktion exemplarisch dargestellt.

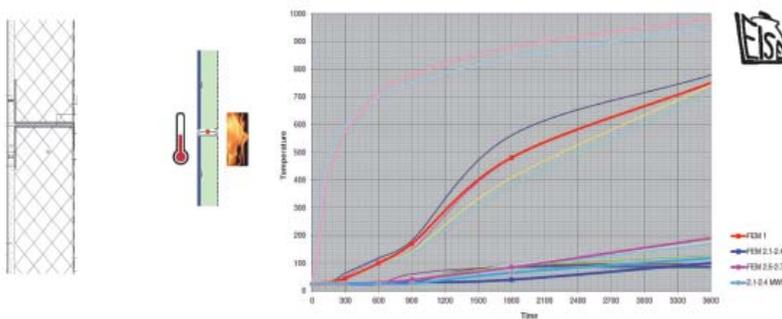


Abb. 6: Ergebnis des Brandversuchs System „Stahl, industriell“

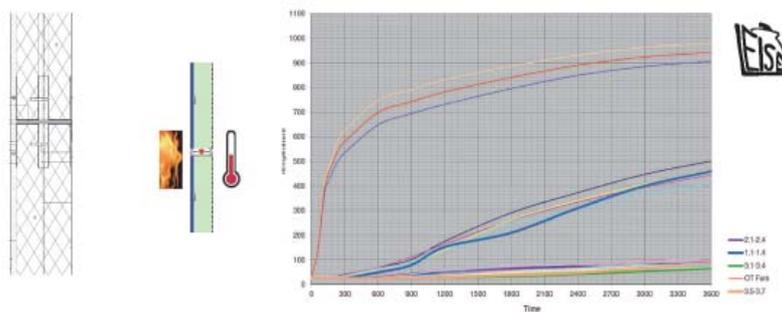


Abb. 7: Ergebnis des Brandversuchs System „Aluminium, industriell“



Abb. 8: Prüfkörper nach dem Brandtest

Zur akustischen Bewertung der Materialien wurden Basisparameter wie der Strömungswiderstand, die akustische Absorption im gerichteten und diffusen Schallfeld (Abb. 9a) und die Schalldämmung im gerichteten (Abb. 9b) und diffusen Schallfeld bestimmt.

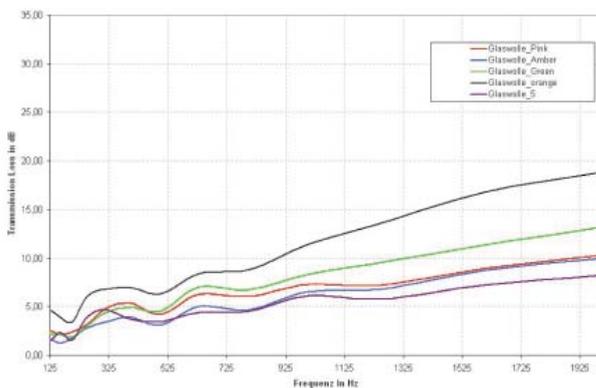
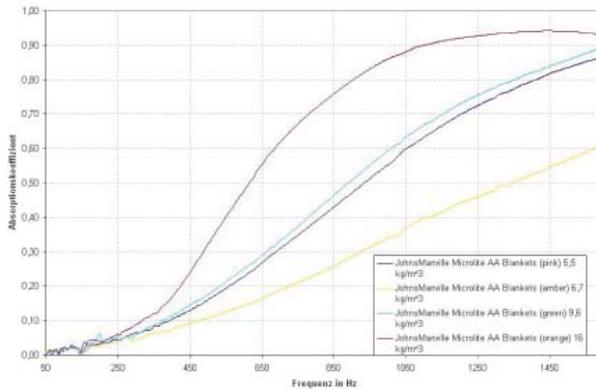


Abbildung 9a-b: Absorptionsgrad im diffusen und Schalldämmung im gerichteten Schallfeld

Weiterhin wurden Systemlösungen im Prüfstand des Instituts für Bauphysik IBP in Stuttgart vermessen. Abb. 10 zeigt den Einbau der Kassetten im Prüfstand.

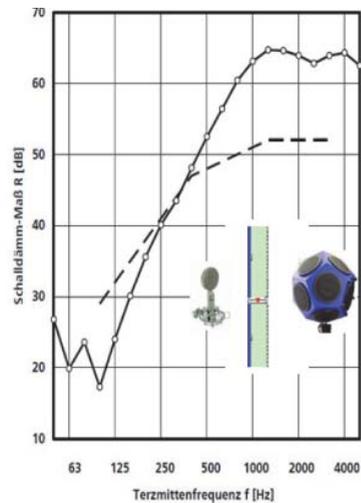


Abb. 10: Fensterprüfstand des IBP und gemessene Schalldämmung

Die Untersuchungen zeigten u. a. folgende qualitativen Ergebnisse:

- Das Schalldämm-Maß der Grundkonstruktion folgt dem Massegesetz.
- Eine zusätzliche Versteifung der Kassette, hier durch Vermiculite, bringt eine Erhöhung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen, hat aber auch tieffrequente Einbrüche der Dämmkurve aufgrund von Platteneigenfrequenzen zur Folge.
- Dämmmaterial erhöht die Schalldämmung stärker als die reine Masse vermuten lässt.
- Die Ausbreitungsrichtung Quelle zu Empfänger hat keinen Einfluss auf die Schalldämmung.
- Eingeschlossene Luftvolumina erhöhen die Komplexität der Kassettenbauweise, bringen aber keine signifikanten Verbesserungen des Schalldämm-Maßes.

Bezüglich der Steifigkeit und Festigkeit von Klebverbindungen wurden Zugversuche an definierten Proben verschiedener Klebstoffe durchgeführt.

Weiterhin wurde die Eignung des Einsatzes im Schiffbau mit Temperaturen zwischen 0 °C und 40 °C durch Zugversuche nach DIN 53504 unter quasistatischen Bedingungen sowie Schwingfestigkeiten und Dämpfung der Klebstoffe untersucht.

Die Abb. 11 zeigt Ergebnisse, welche die hinsichtlich Nachgiebigkeit und Dämpfung bessere Eignung flexibler Klebstoffsysteme gegenüber strukturellen Systemen dokumentieren.

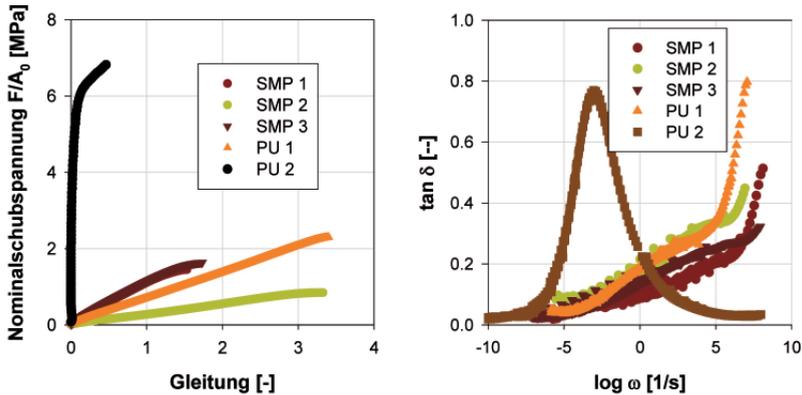


Abb. 11: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramme aus Zugscherversuchen unter quasistatischen Bedingungen bei Raumtemperatur (links) und Verlustfaktoren aus DMA-Untersuchungen (rechts)

Mit der weiteren Optimierung der Wandsysteme wurden Formteile zur Einbindung in die Schiffsstruktur konstruiert und deren Klebverbindung messtechnisch untersucht (Abb. 12). Mit Daten des Schwingbreitenkollektivs wurde die Betriebfestigkeit der Trennwandverklebung zur Struktur berechnet und deren Eigenschaften ermittelt (Abb. 13).

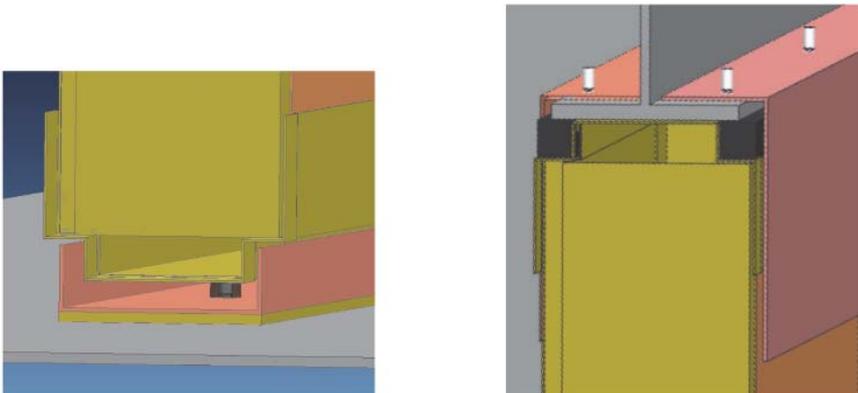
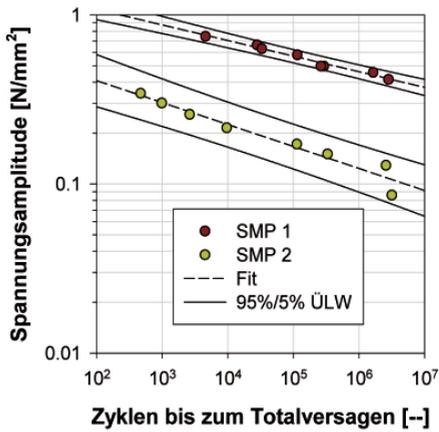


Abb. 12: Boden- und Deckenanschluss



Klebschichtdicke [mm]	Schädigung in %	
	SMP1	SMP2
6	879	97
8	42	12
10	4.0	2.4
12	0.6	0.6
14	0.1	0.2
16	0.0	0.1

Abb. 13: Wöhlerlinien aus lastgeregelten Einstufen-Dauerschwingversuchen bei  $< 7$  Hz und  $R = -1$  an gestuften Zugscherproben mit flexiblen Klebstoffen (links) sowie Ergebnisse der Schädigungsrechnung in Abhängigkeit von der Klebschichtdicke (rechts)

Durch Versteifungen des Panels selbst galt es, Platteneigenfrequenzen zu „verschieben“, um tieffrequente Resonanzeinbrüche in der Dämmkurve zu vermeiden und so das Schalldämm-Maß zu erhöhen (Abb. 15 und 16).

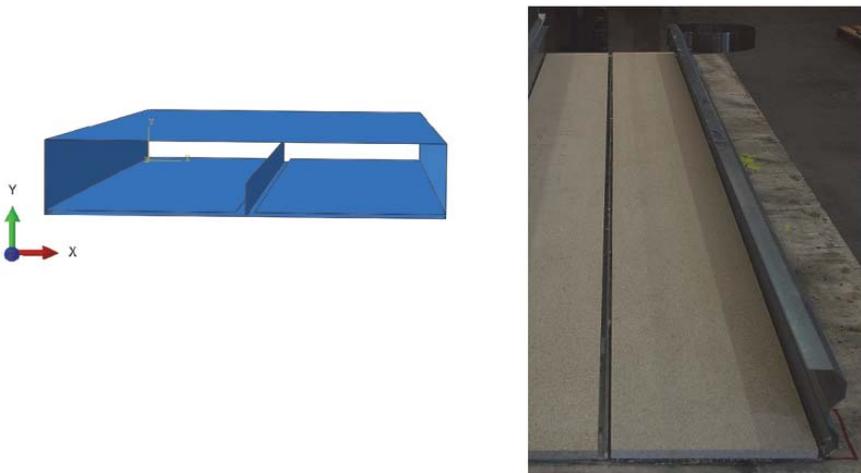


Abb. 14: Versteiftes Panel

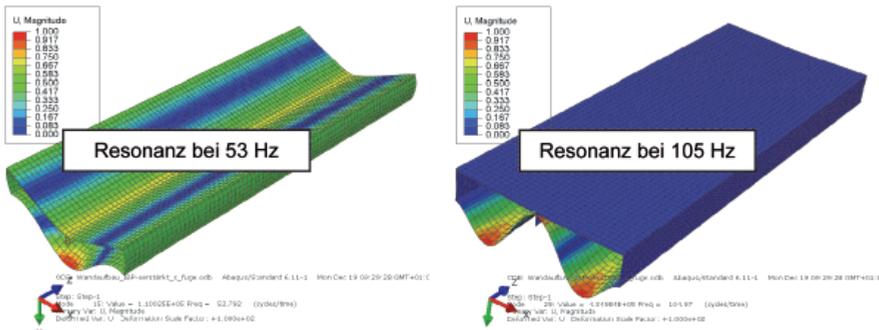


Abb. 15: Berechnung der Eigenfrequenzen des versteiften Paneels

Weiterhin wurden die Betrachtungen auf mehrschalige Systeme, also beidseitig geschlossene Panel-Oberflächen erweitert, so dass mit der Modifizierung des Mock-ups sechs Systemvarianten zur Vermessung im Wandprüfstand zur Verfügung standen.

Beispielhaft sind die Daten und Messergebnisse dreier Systeme nachstehend dargestellt.

System „ Stahl, industriell “ – einschalige, absorbierende Wand

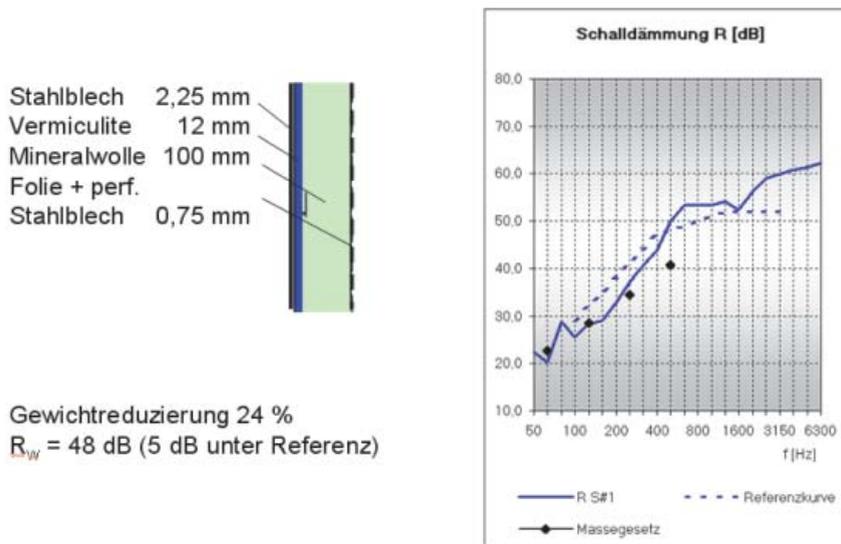
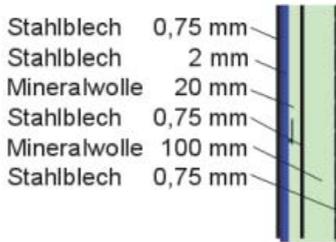


Abb. 16: Im Prüfstand ermittelte Schalldämmung

System „Stahl, industriell“ – mehrschalige Wand



Gewichtsreduzierung ca. 20 %  
 $R_{w} = 50$  dB (3 dB unter Referenz)

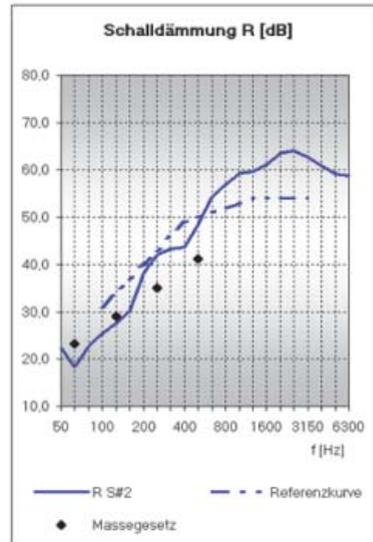


Abb. 17: Im Prüfstand ermittelte Schalldämmung

System „Aluminium, industriell“ – einschalige, absorbierende Wand



Gewichtsreduzierung ca. 20 %  
 $R_{w} = 47$  dB (= Referenz)

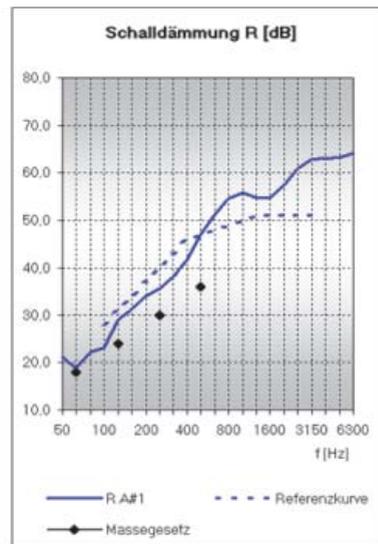


Abb. 18: Im Prüfstand ermittelte Schalldämmung

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Vorhaben konnten folgende Ergebnisse erzielt und Erkenntnisse gewonnen werden.

- Die im Vergleich zu herkömmlichen Systemen angestrebte Gewichtsersparnis von 20 - 25 % wurde erzielt.
- Alle Systeme erfüllen die Brandschutzanforderung A60.
- Bisher im Schiffbau nicht etablierte Materialien wie intumeszierende Brandschutzbeschichtungen oder extrem leichte Glasfaserdämmstoffe ( $10 \text{ kg/m}^3$ ) haben sich bewährt, müssen jedoch ggf. zugelassen werden.
- Durch diverse Material- und Systemuntersuchungen sowie die Erstellung einer Material-Datenbank konnte die Simulation von Brandtests optimiert und verifiziert werden. Zukünftig können damit Systemkombinationen entsprechend simuliert werden bevor aufwendige Brandtests anfallen.
- Hinsichtlich der Schalldämmung konnten durch Versteifung der Paneele (Biegesteife Materialien, Kassetierung etc.) tieffrequent Dämmungszuwächse auch über das Massengesetz hinaus erzielt werden. Extrem hohe Dämmungen (Überdämmung) im hochfrequenten Bereich konnten zugunsten des Gewichtes reduziert werden.

Die erwartete hohe Dämmung durch Mineralwolle wie auch die häufig propagierte Abhängigkeit der Beschallungsrichtung auf einschalige, einseitig absorbierende Systeme konnte nicht bestätigt werden.

- Mit der einschaligen, absorbierenden Aluminiumwand wurde das angestrebte Schalldämm-Maß erreicht.
- Im Falle der Stahlpaneele beeinflussten Dämmungseinbrüche durch Resonanzen und damit Platteneigenschwingungen das positive Gesamtergebnis und führten dazu, dass die angestrebten Schalldämm-Maße nicht ganz erreicht wurden. Hier besteht Optimierungsbedarf.
- Das Kassettensystem (Vorfertigung und schnelle Montage) hat sich bewährt, wenngleich die Abdichtung im Bodenbereich sowie der Kassetten untereinander zu verbessern ist.

- Es konnte gezeigt werden, dass zur Aufnahme der hohen Verschiebungen zwischen einer nichttragenden Leichtbau-Trennwand und dem Schiffsrumpf eine klebtechnische Lösung geeignet ist. Durch die Wahl flexibler Klebstoffe und relativ hoher Schichtdicken lassen sich die schiffbautypischen Schwingspielzahlen erreichen bei gleichzeitiger Verbesserung der Dämpfung und Entkopplung von Körperschall.
- Das Einsatzpotential des Systems verbunden mit Kostenvorteilen durch Gewichtersparnis und Flexibilität in der Raumaufteilung wird, insbesondere bezogen auf den Sonderschiffbau und der Berücksichtigung im Planungsstadium, positiv bewertet.
- Die Prognose der Schalldämmung von Wänden (halbempirisches Verfahren) unter Berücksichtigung der Steife der Wand von Dämpfung und Eigenfrequenzen konnte verbessert werden. Das Verfahren ist jedoch weiterzuentwickeln und wissenschaftlich abzusichern.
- Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben sind auf andere Bereiche wie die Dimensionierung von Schallhauben z. B. für Transformatoren zu übertragen. Hier besteht aufgrund des deutschen Ausstiegs aus der Kernenergie und des damit verbundenen Ausbaus der Nutzung von Windenergie großer Bedarf an „tieffrequent hoch schalldämmenden Wandsystemen“.

## **Danksagung**

Die vorgestellten Arbeiten wurden als Verbundprojekt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Förderprogramms „Schifffahrt und Meerestechnik des 21. Jahrhunderts“ gefördert. Den beteiligten Mitarbeitern des Projektträgers Jülich danken wir für die engagierte Betreuung und Unterstützung.

## **Literaturverzeichnis**

- [1] Hertzberg T. LASS: "Lightweight Construction Applications at Sea", Borås 2009; Report No.: SP Report 2009:13, 05.10.2012. [http://www.lass.nu/Reports/LASS-SP\\_Report\\_2009\\_13.pdf](http://www.lass.nu/Reports/LASS-SP_Report_2009_13.pdf)
- [2] Roland F., DE-LIGHT Transport Project, Rostock; 2007.
- [3] Brede, M.: "Bondship - Bonding of lightweight materials for cost effective production of high speed craft and passenger ships", Bremen: IFAM;
- [4] CERTIFICATE NO. MED-B-4188 03.09.2012, <http://exchange.dnv.com/taridocs/ECTE-CER/39/05138848.htm>

- [5] CERTIFICATE NO. MED-B-4190 03.09.2012, <http://exchange.dnv.com/taridocs/ECTE-CER/36/04692912.htm>
- [6] Ch. König, D. H. Müller: "Verfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen", DGM 2007, März 2007, Bremen, Deutschland
- [7] Ch. König, D. H. Müller: "Acoustical properties of reinforced composite materials basing on natural fibers", IMACC XXV, Feb. 2007, Orlando Fl., USA
- [8] Ch. König, I. Gebauer, D. H. Müller: "Faserverbundwerkstoffe aus Naturfasern - Anpassung der akustischen Eigenschaften durch Variation des Hybridwerkstoffaufbaus und der Bauteiloberflächen", DAGA 2005, März 2005, München, Deutschland
- [9] Cremer L, Heckl M.: "Körperschall: physikalische Grundlagen und technische Anwendungen" Berlin [u.a.]: Springer; 1996.
- [10] Donato RJ.: "Sound Transmission Through a Double-Leaf Wall", Research NRC of CD of B, editor. 1972.
- [11] Elmallawany A.: "Improvement of the method of statistical energy analysis for the calculation of sound insulation at low frequencies. Applied Acoustics", 1982 Sep;15(5):341–5.
- [12] Hongisto V.: "Airborne Sound Insulation of Wall Structures - Measurement and Prediction Methods" [Internet][Text.Thesis.Doctoral]. [Helsinki]: Helsinki University of Technology; 2000 [cited 2012 Sep 25]. Available from: <http://lib.tkk.fi/Diss/2000/isbn9512252163/>
- [13] Schmidt H.: "Schalltechnisches Taschenbuch: schwingungskompendium", Düsseldorf: VDI-Verlag; 1996.
- [14] Krakowsky HM.: "Schalldämmung von Stahltrapezblechen", München; 1980.
- [15] Schwanecke H.: "Betrachtung zur Frage der Einleitung und Ausbreitung von Körperschall im Schiffskörper", Institut für Schiffbau der Universität Hamburg; 1976 Nov p. 40. Report No.: 10.
- [16] Meier A.: "Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand", Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; 2000 [cited 2012 Aug 30]. [http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2000/23/00\\_23.pdf](http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2000/23/00_23.pdf)
- [17] Ljunggren S.: "Airborne sound insulation of thin walls", J. Acoust. Soc. Am. The Journal of the Acoustical Society of America. 1991;89(5).
- [18] International Maritime Organization IMO, International Code For Application Of Fire Test Procedures, London 1998, IMO-884E
- [19] International Maritime Organization IMO, International Code Of Safety For High-Speed Craft, 2000, 2008 Edition , IMO IA 185E
- [20] International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)

- [21] C. Nagel; M. Brede; M. Calomfirescu: „Entwicklung von langzeitbeständigen Kaltfügetechniken als Schlüsseltechnologie für eine kostengünstige Hybridbauweise im Schienenfahrzeugbau auf Grundlage der strukturellen Klebtechnik“, Abschlussbericht, Krefeld: Siemens, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2004
- [22] C. Nagel, M. Brede, M. Calomfirescu, T. Fertig, J. Sauer, E.A. Ullrich, and O.-D. Hennemann: „Adhesive joints for modular components in railway applications“ in: Adhesion – Current Research and Application. Wulff Possart [Hrsg.], Wiley VCH, Weinheim, 2005
- [23] O.-D. Hennemann, M. Brede, C. Nagel, O. Hahn, J. Jendry, D. Teutenberg, M. Schlimmer, K.-M. Mihm: „Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile im Fahrzeugbau bei schwingender Beanspruchung“, Abschlussbericht P653, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2007
- [24] A. Vaziri, H. Nayeb-Hashemi: “Dynamic response of tubular joints with an annular void subjected to a harmonic axial load”, International Journal of Adhesion and Adhesives Volume 22, Issue 5, 2002, Pages 367-373
- [25] M. D. Rao, H. Zhou: “Vibration and damping of a bonded tubular lap joint”, Journal of Sound and Vibration Vol. 178, Issue 5, 1994, Pages 577-590
- [26] B. Käferstein: „Reduzierung des Körperschalls in Stahlblech-Konstruktionen durch Nutzung von Fügestellen als Dämpfungselemente“ Dissertation, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 2004, ISBN 3-937567-19-4



# ULIVES – Ultraleichte Materialien für eisgängige Lastschiffe

Dr. Peter Kaufmann (SMK Ingenieure GmbH & Co KG); Dr. Thomas Hipke (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU)

## Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Programmes MARTEC ERA-NET Maritime Technologies wurde das Projekt ULIVES „Ultralight Vessels“ mit finnischen Partnern bearbeitet.

Ziel war die Entwicklung konstruktiver, materieller und technologischer Lösungen zur Reduzierung des Eigengewichtes von Lastschiffen für Binnengewässer.

Die Notwendigkeit dafür wird u.a.gestützt durch die Forderungen des EU-White-paper zur Verlagerung von 50% des Straßentransportes auf Schiene und Binnengewässer [1].

Im Ergebnis des Projektes wurde durch Anwendung von Al-Schaum-Sandwich-Bauelementen sowie GFK-PUR-Sandwichelementen mittels numerischer Simulation eine ca. 25%-ige Eigengewichtreduzierung für den Schiffskörper und damit eine erhebliche Verbesserung des Verhältnisses Last zu Eigengewicht im Vergleich zum Stand der Technik erreicht und ein maßstablicher Demonstrator einer Schiffssektion erstellt [2].

## 1. Gesamtzielstellung

Auf der Grundlage einer gemäß SOLAS 2002 17 F [3] projektierten und gebauten Schiffskonstruktion (siehe Abb. 1) war durch Anwendung von Al-Schaum-Sandwich- (s. Abb. 2) und GFK-PUR-Sandwich-Bauelementen (s. Abb. 3) ein Leichtbaukonzept mit der Zielstellung einer ca. 30%-igen Einsparung des Schiffseigengewichtes sowie die erforderliche Fügetechnik zu erarbeiten.

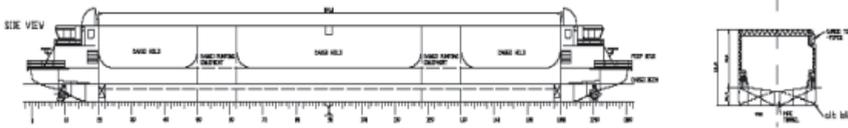


Abb. 1: Inland-Transportschiff als Entwicklungsgrundlage Länge 115 m; Breite 15 m; Höhe 8,5 m; minimaler Tiefgang 0,45 m; maximaler Tiefgang 2,4 m, Eigengewicht ca. 500 t, Bruttogewicht ca. 3.420 t, Ladegewicht ca. 2.920 t

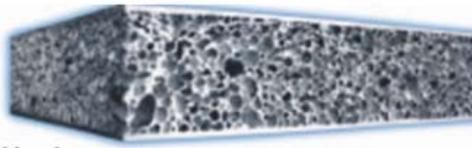


Abb. 2: Al-Schaum-Sandwich



Abb. 3: GFK- PUR-Sandwich

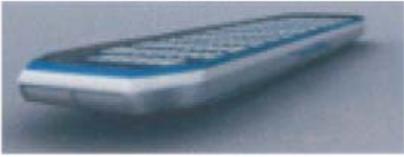
Dabei waren der unter der Wasserlinie befindliche äußere Schiffsrumpf aus Gründen der Impact-Gefährdung bei Eisgängigkeit zunächst traditionell aus Stahlblech und die anderen Segmente aus o.g. Leichtbauwerkstoffen zu entwickeln.

Ein Vorschlag für die Schiffsgestaltung wurde vom finnischen Projektpartner Laffcomp für den Transport von Holzhackschnitzeln für das in Jyväskylä erichtete Kraftwerk unter dem Titel Bioship erarbeitet (s. Abb. 4)



Abb. 4: Schiffsentwurf Bioship

und zwischenzeitlich für weitere Anwendungsfälle perspektivisch weiterentwickelt (s. Abb. 5, 6).



*Abb. 5: Entwurf Binnenschiff für Autotransport PKW*



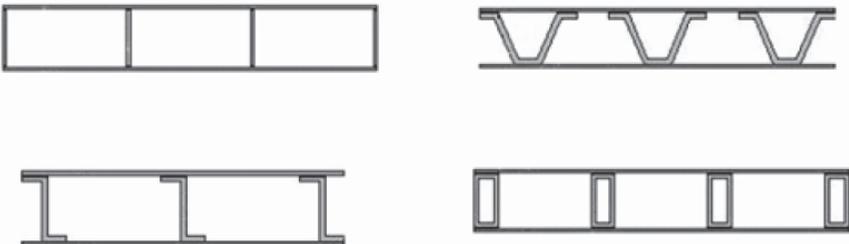
*Abb. 6: Entwurf Binnenschiff für Autotransport LKW*

## 2. Stand der Technik

Die in Deutschland mit einem Durchschnittsalter von 50 Jahren existierende Binnenschiffahrtsflotte entspricht nicht den erkennbaren [4] und für Europa „verordneten“ [1] Perspektiven zur anteiligen Übernahme von Transportaufgaben der Straße.

Bemühungen zur Beseitigung der Nachteile überalterter Schiffe, insbesondere durch Effizienzverbesserung mittels Leichtbau, sind bereits mit dem LASS-Projekt [5] zu verzeichnen.

Für den Einsatz lasergeschweißter Sandwichpaneele gemäß Abb. 7 wurden bereits 2003 Richtlinien des DNV [6] veröffentlicht.



*Abb. 7: Lasergeschweißte Sandwichpaneele*

Zur Eigenschaftsverbesserung, insbesondere Dämpfung, Schall, Korrosion dieser geschweißten Paneele wird in [7] bereits das zusätzliche Einbringen von Sandwichkernen aus Beton oder geschlossporigem Schaum vorgeschlagen (s. Abb. 8).

Unabhängig von dem Aufwand für das Laserschweißen dieser Stahlblechpaneele (s. Abb. 9) und den für das Laserschweißen einschränkenden Bedingungen des rauhen Werkstatt-, Werft- oder Baustellenbetriebes wurde im

Projekt ULIVES auf dem Stand der Technik der Al-Schaum-Sandwich-Herstellung und dessen Anwendung im Werkzeugmaschinenbau aufgebaut (s. Abb. 10).

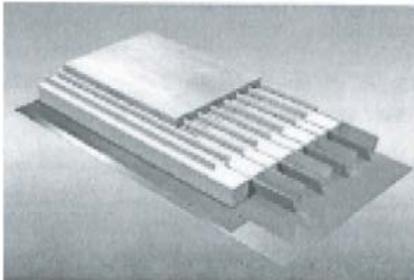


Abb. 8: Sandwich Element mit Schaumkern (aus [7])

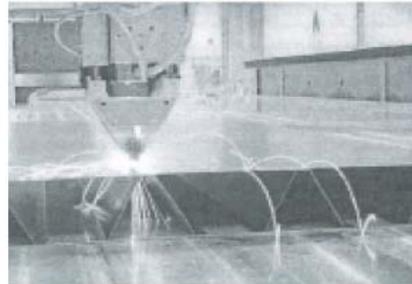


Abb. 9: Sandwich-Paneel-Laserschweißen aus [7]

Mit dieser Technologie sind tragfähige Sandwichstrukturen durch metallurgische Bindung der Deckbleche an den Schaumkern (s. Abb. 11) mit besten schwingungsdämpfenden Eigenschaften herstellbar und die Laserschweißtechnologie für die zur Sandwichwirkung herangezogenen Abstandshalterprofile sowie diese Profile selbst können entfallen.

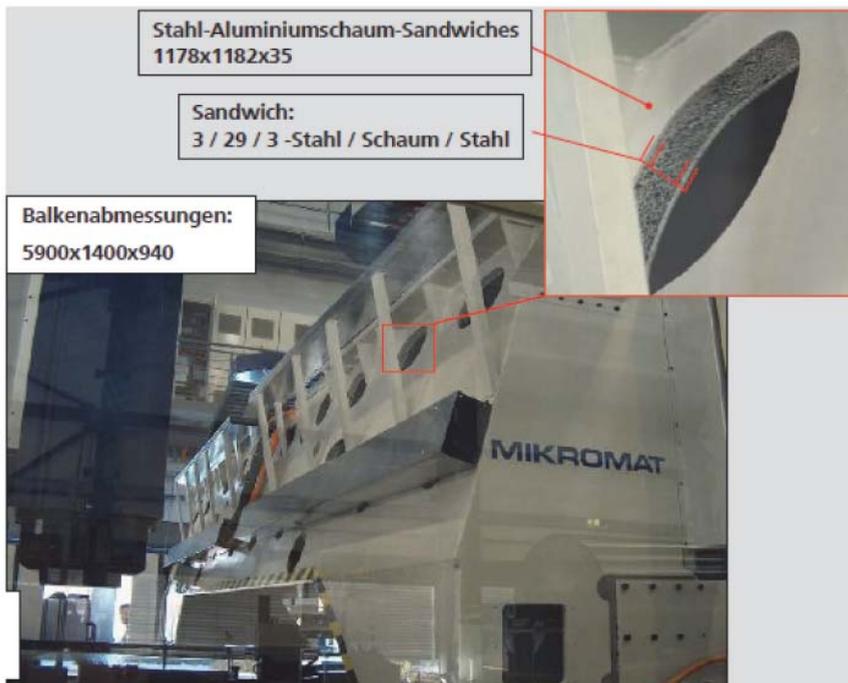


Abb. 10: Werkzeugmaschinen-Gestell aus Al-Schaum-Sandwich [8]



Abb. 11: Schälversuch Al-Schaum-Sandwich [9]

Der Stand der Technik für den zu leichteren Schiffskörper wird repräsentiert durch die zeichnerische Darstellung der zugrundezulegenden Schiffskonstruktion (s. Abb. 12).

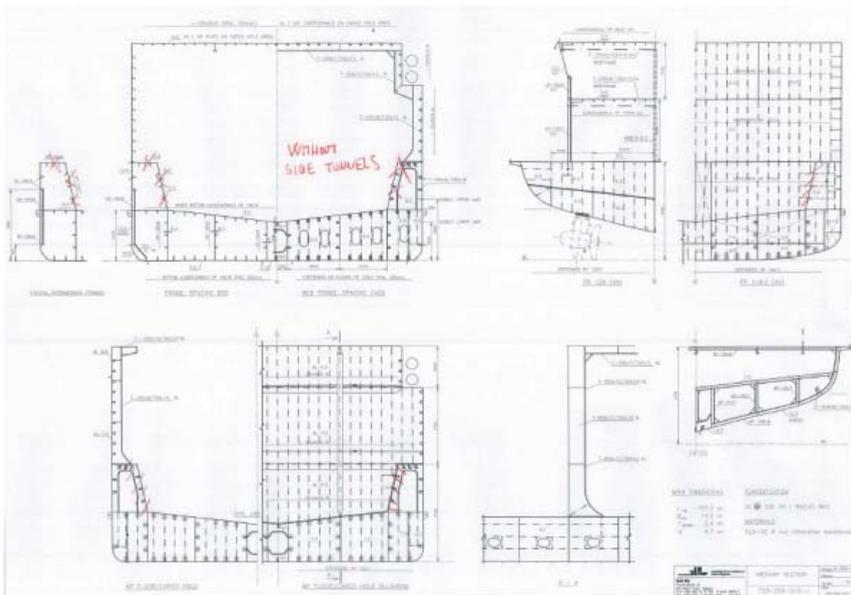


Abb. 12: Schiffssektion Stand der Technik



#### 4. Ergebnisse numerischer Simulation

Abb. 16 zeigt den Originalquerschnitt des Schiffkörpers. Um die vorhandenen Symmetrieeffekte nutzen zu können, wurde ein charakteristisches Schiffssegment mit einer Länge von 4.800 mm herausgetrennt.

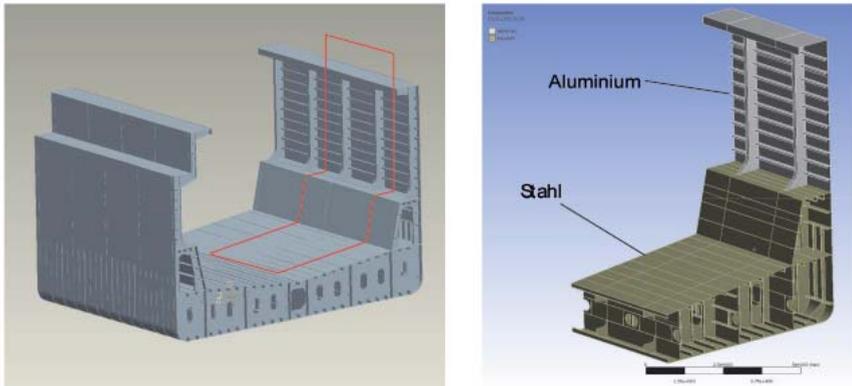


Abb. 16: Segment des Schiffes (CAD- und FE-Modell).

Anschließend erfolgte die Erstellung des FE-Modells einschließlich der Zuweisung der Materialdaten und der Modellvernetzung. Die Segmentgröße von 4.800 mm wurde so gewählt, dass drei aneinandergefügte Segmente den kleinen Laderaum und sechs Segmente den großen Laderaum in der Länge abbilden. Durch Verbinden der vernetzten Segmente zu größeren Einheiten besteht zudem die Möglichkeit, die Schottwände durch Festlegen von Einspannbedingungen mit simulieren zu können. Anschließend wurden die Lasten infolge des Wasserdrucks und des Schüttgutes (Bsp. Holzpellets) aufgebracht (Abb. 17)

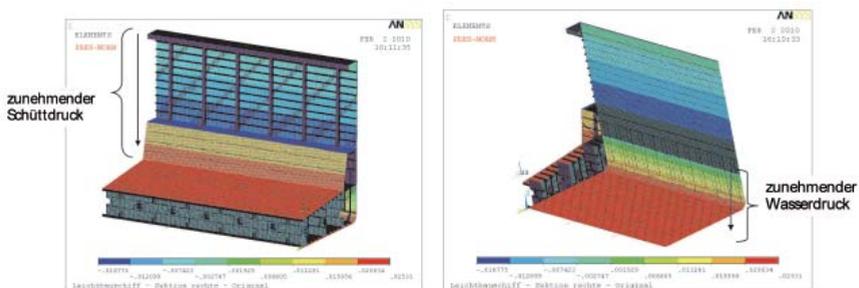


Abb. 17: Aufgebrachte Lasten

Die in der anschließend durchgeführten Simulation ermittelten Kennwerte – z. B. Gewicht, Durchbiegung / Verschiebung oder Spannungen – dienten als Ausgangsbasis für die Neugestaltung des Schiffskonzepts in Leichtbauweise.

Die Berechnungen haben ergeben, dass ein durchgängiger schmaler oder auch ein zweistufig abgesetzter Bordwandspant die entstehenden Belastungen nicht aufnehmen können. Die auftretenden Verformung und Spannungen wären zu groß und könnten zum Versagen der Struktur führen. Als Vorzugsvariante stellte sich die Verwendung eines dreistufigen Bordwandspantes heraus (Abb. 18). Auftretende Verformungen und Spannungen sind unkritisch.

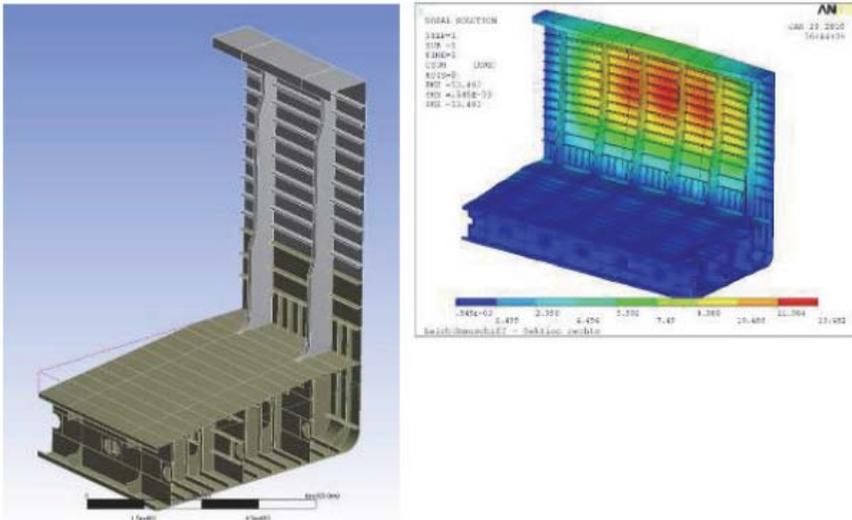


Abb. 18: Dreistufig abgesetzter Bordwandspant

Weiteres Masseinsparungspotential wurde bei den Schottwänden im Innenraum erarbeitet. An Stelle massiver Stahlplatten sind Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches zum Einsatz vorgesehen (Abb. 19).

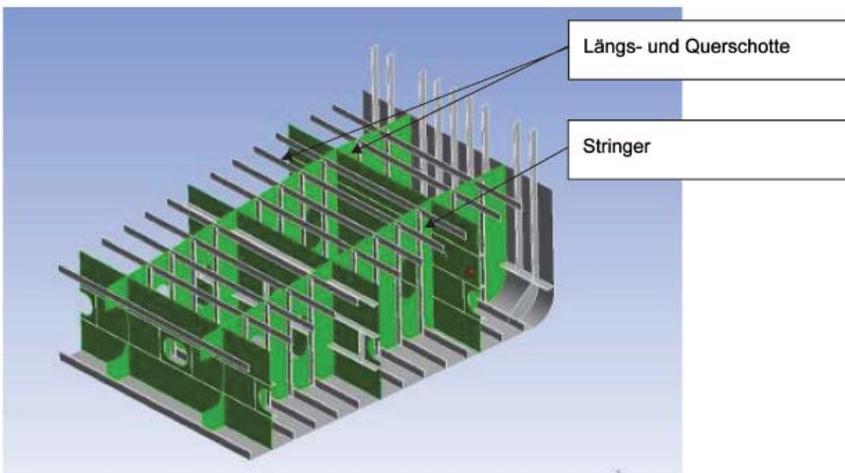


Abb. 19: Längs- und Querschottwände.

Die in der konventionellen Konstruktion vorgesehenen Stringer können durch Nutzung der Tragfunktion der Sandwichplatten vollständig entfallen.

Für die Längs- und Querschotten kommen Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches mit 2 mm bzw. 1,5 mm Decklagen und 30 mm Schaumkern zum Einsatz.

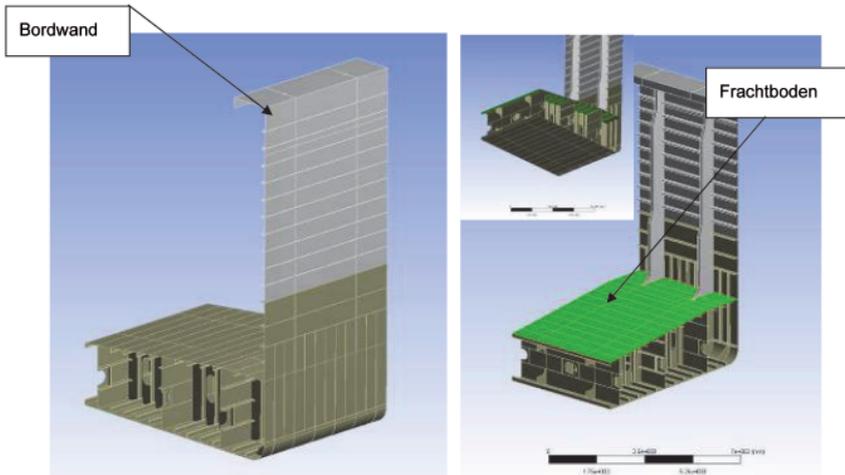


Abb. 20: Bordwand und Frachtboden.

Weiteres Masseinsparungspotential ergibt sich durch Einsatz von Aluminium-Aluminiumschaum-Sandwiches (1,5/17/1,5) im Bereich der Bordwände und der Verwendung von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches (4/29/2) für den Frachtboden. Für den Frachtboden sind entgegen der bisherigen Konstruktion ebenfalls keine Stringer mehr nötig und bei der Bordwand können acht von bisher zehn erforderlichen Stringern entfernt werden.

Nachfolgende Tabelle liefert eine Übersicht zum bisherigen Masseinsparungspotential infolge der Anwendung von Aluminiumschaum-Sandwiches im Bereich des Schiffkörpers.

Variante	Masse absolut [kg]	Masse relativ [%]
<b>Original</b>	15531	100
<b>Schottwände</b> Einsatz von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches → Längsschotte (2/30/2) → Querschotte (1,5/30/1,5)	12357	79,6
<b>Bordwände</b> Einsatz von Aluminium-Aluminiumschaum-Sandwiches (1,5/17,1,5) Entfernung von 8 der 10 Stringer	12214	78,6
<b>Frachtboden</b> Einsatz von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches (4/29/2), Entfernung aller Stringer	11531	74,2

Tab. 1: Masseeinsparungspotential für ein Segment.

Durch Substitution der in der konventionellen Schiffskonstruktion eingesetzten Walzbleche durch Al-Schaum-Sandwiches für die Baugruppen Schottwände, Bordwände, Frachtboden wird die Eigenmasse schrittweise um die in Tab. 1 aufgezeigten Anteile auf 74,2% reduziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die Sandwichbauweise vollkommen neue gewichtsreduzierende Tragkonstruktionen entstehen und die Substitutionsmaßnahmen im Verbund ihres Zusammenwirkens zu betrachten sind.

Weiterhin wurde eine Dachkonstruktion in einer GfK-PUR-Schaum-Leichtbauweise entwickelt und untersucht.

## 5. Fügetechnik

Der Nachweis der Fügbarkeit großflächiger Werkstoffverbunde anhand von Probekörpern unterschiedlicher Größe mit Stumpf- und Kehlnähten wurde gemeinsam mit SLV-Rostock durchgeführt.

Die Deckbleche der Aluminiumschaum-Sandwich-Platten liegen mit ca. 2 mm Dicke an der Obergrenze dünner Bleche. Aufgrund des dazwischen befindlichen Aluminiumschaums ist eine reduzierte lokale Wärmeeinbringung notwendig.

Es wurden für Zug- und Biegeprüfungen Teststücke aus Aluminiumschaum-Sandwich-Platten hergestellt. Die Teststücke für die Biegeprüfung sind ca. 700 mm lang und ca. 150 mm breit. Es wurden Schweißungen als Stumpfstoß sowie als T-Stoß ausgeführt.

Als Schweißzusatz fand die 1 mm - Drahtelektrode, Kurzzeichen G3Si1, zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen nach DIN EN ISO 14341:2008 Verwendung. Die Schweißbarkeit wurde nachgewiesen (siehe Abb. 25 und 26), erste Parametersätze, die sich auf 40 mm Aluminiumschaumdicke mit 2 mm Stahldeckblechen beziehen, konnten ermittelt werden (s. Tabellen 2, 3).

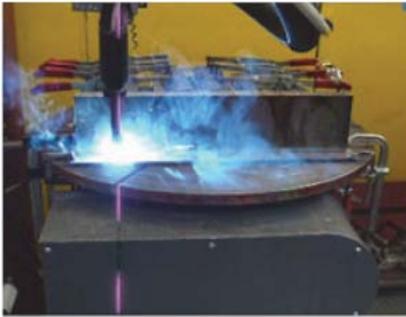


Abb. 25: Kehlnahtschweißen



Abb. 26: Stupfnahschweißen

material thickness	t	[mm]	2	welding speed	$v_s$	[m/min]	0,8
material thickness	t	[mm]	2	welding position			PA
weld seam type	-	-	1				
edge preparation	-	-	saw ed	torch tilt angle	$\gamma_B$	[°]	0
filler wire material	-	-	G3Si1	angle of inclination of torch	$\beta_B$	[°]	5
filler wire diameter		[mm]	1	contact tube-to-work distance	$l_k$	[mm]	12
welding power source FRONIUS TransPuls Synergetic 4000 CMT Remote							
process	-	-	CMT (1053)	gap width	s	[mm]	0
arc length correction	-	[%]	0,0	process gas composition	-	[X%/Y%]	82Ar/18CO <sub>2</sub>
dynamic correction	-	-	2	process gas flow	$V_p$	[l/min]	12
wirefeed speed	$v_D$	[m/min]	9,4	backing gas composition	-	[X%/Y%]	-
feeder creep speed		[m/min]	auto	backing gas flow	$V_W$	[l/min]	-
voltage (preselection)	U	[V]	16,4	<b>weld data recording</b>			
current (preselection)	I	[A]	204	current average/min/max	[A]		191,0
				voltage	[V]		19,0
				gross energy per unit length	E	[J/cm]	2722

Tab. 2: CMT-Parameter für I-Naht am Stumpfstoß

material thickness	t	[mm]	2	welding speed	$v_s$	[m/min]	0,6
material thickness	t	[mm]	10	welding position			PB
weld seam type	-	-	HV				
edge preparation	-	-	saw ed, grinded	torch tilt angle	$\gamma_B$	[°]	42
filler wire material	-	-	G3Si1	angle of inclination of torch	$\beta_B$	[°]	0
filler wire diameter		[mm]	1	contact tube-to-work distance	$l_k$	[mm]	12
welding power source FRONIUS TransPuls Synergetic 4000 CMT Remote							
process	-	-	CMT (1053)	gap width	s	[mm]	2
arc length correction	-	[%]	0,0	process gas composition	-	[X%/Y%]	82Ar/18CO <sub>2</sub>
dynamic correction	-	-	2	process gas flow	$V_p$	[l/min]	12
wirefeed speed	$v_D$	[m/min]	9,4	backing gas composition	-	[X%/Y%]	-
feeder creep speed		[m/min]	auto	backing gas flow	$V_W$	[l/min]	-
voltage (preselection)	U	[V]	16,4	<b>weld data recording</b>			
current (preselection)	I	[A]	204	current average/min/max	[A]		179,0
				voltage	[V]		19,7
				gross energy per unit length	E	[J/cm]	3526,3

Tab. 3: CMT-Parameter für Kehlnaht am T-Stoß

Die Schweißergebnisse zeigen die Schliffbilder für den T-Stoß und den Stumpfstoß (siehe Abb. 27 und 28)

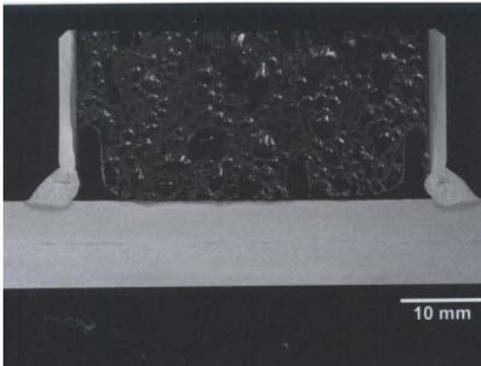


Abb. 27: Querschnitt T-Stoß im Makroschliff

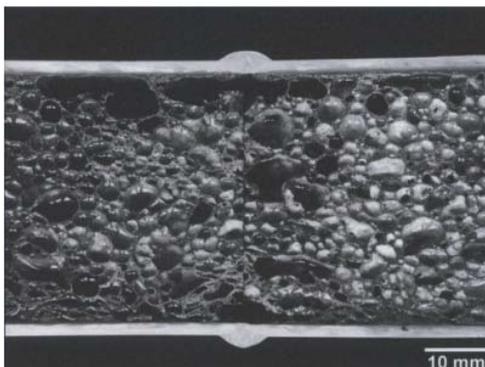


Abb. 28: Querschnitt Stumpfstoß im Makroschliff

Belastungsuntersuchungen an Biegeproben (s. Bilder 29-32) lassen Versagensmechanismen und Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit ausgeprägtem Hookeschen Anteil erkennen (s. Bild 33).



Abb. 29: T-Stoß Sandwich-Blech-Biegeversuch



Abb. 30: T-Stoß Sandwich-Blech-Stabilitätsversagen der Deckbleche



Abb. 31: Längs-Stumpfstoß Biegeversuch Stabilitätsversagen am Deckblech (punktueller Lasteintrag)



Abb. 32: Biegeprobe mit beginnendem Kernversagen

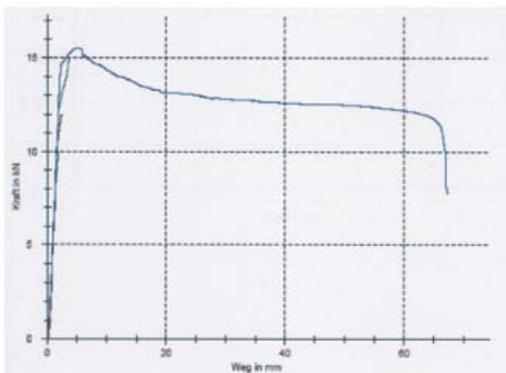


Abb. 33: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägtem Hookeschem Anteil

## Demonstrator

Als Demonstrator wurde ein Schiffsegment bestehend aus Schiffsrumpf mit integrierten Längs- und Querschotten, Frachtboden, Seitenwand und Dach ausgewählt. Im Bereich der Längs- und Querschotte sowie für den Frachtboden kommen Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches zum Einsatz. Für die Seitenwände werden ebenfalls Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches aber auch Aluminium-Aluminiumschaum-Sandwiches verwendet. Für den Dach-/ Lukenbereich kommen Polyurethan-Sandwiches mit einem Unterbau aus Aluminiumschaum-Profilen zum Einsatz. Der Demonstrator wurde im Maßstab 1:3 aufgebaut. Die Gesamtabmessungen betragen ca. 2.400 mm x 1.600 mm x 3.500 mm (s. Abb. 34-35).

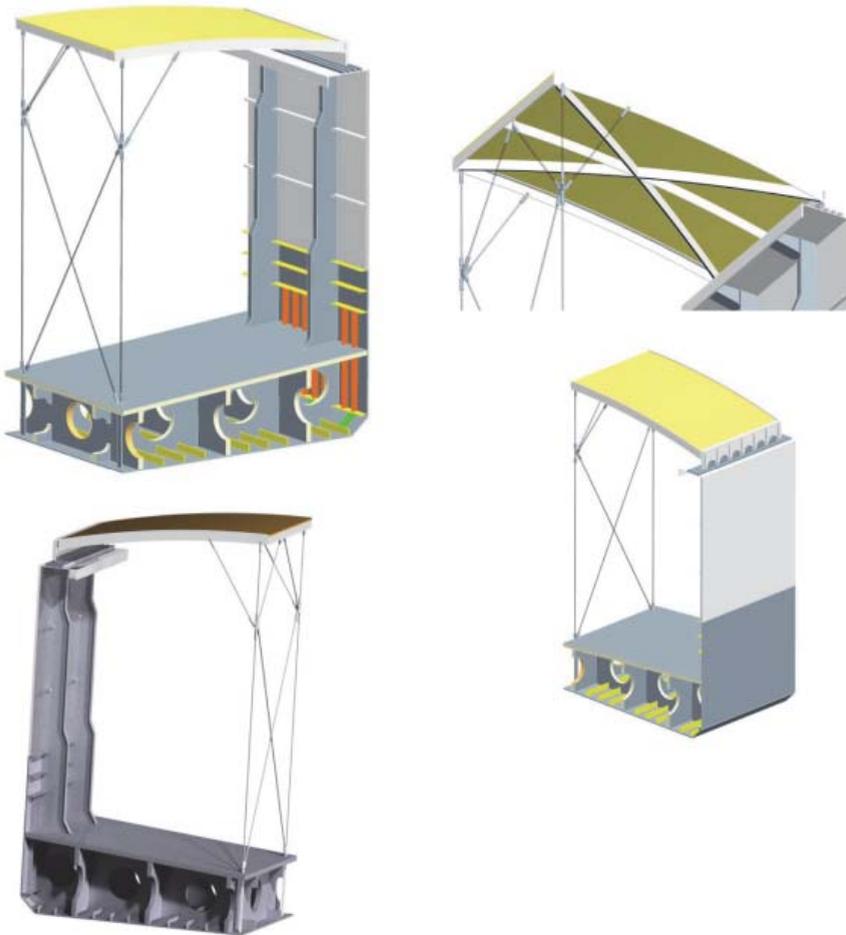


Abb. 34: Simulation Demonstrator – Schiffsegment in Leichtbauweise.



Abb. 35: Realisierter Demonstrator

## Danksagung

Die Projektpartner bedanken sich beim BMWi für die Bereitstellung von Fördermitteln und beim Projektträger Jülich/Berlin für die fachliche und organisatorische Betreuung.

## Literatur

- [1] [http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011\\_whith\\_paper\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_whith_paper_en.htm)
- [2] Abschlussbericht ULIVES 2012
- [3] SOLAS 2002 17 F
- [4] Linde, H. ; Perspektiven der Binnenschifffahrt in Europa
- [5] Lesson learnt on lightweight materials  
The Naval Architect Juli11, S.2007
- [6] Project Guidelines for Metal, composite laser welded Sandwich panels, DNV-Report Nr.2003-0751
- [7] Edward E. Hansen u. a. Lightweight structures for Bridge Applications JBC-05-04
- [8] [http://www.iwu.fraunhofer.de/de/schaumzentrum/produkte\\_maschinenbau.html](http://www.iwu.fraunhofer.de/de/schaumzentrum/produkte_maschinenbau.html)
- [9] [http://www.iwu.fraunhofer.de/de/schaumzentrum/produkte\\_maschinenbau.html](http://www.iwu.fraunhofer.de/de/schaumzentrum/produkte_maschinenbau.html)



# PREFUL – Einbinden experimenteller und numerischer Resultate in die Entwicklung einer spezifischen Reibungskorrektur für Propeller

Heinrich Streckwall (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt);  
Lars Greitsch (Mecklenburger Metallguss GmbH)

## 1. Einleitung

Bei der Auswertung des Propulsionsversuches fließen die am Modellpropeller gemessenen Schübe und Momente nicht unkorrigiert in die Großausführungsprognose ein. Unter anderem geht es darum, reibungsbedingte Anteile von Propeller-Schub und -Moment auf beiden Skalen zu erfassen (im Modellzustand und in der Großausführung). Somit prognostiziert man einen Wirkungsgrad-Unterschied, der dem Leistungsbedarf des großen Propellers "gutzuschreiben" ist.

Um die Reibungseinflüsse zu analysieren, wird der Propeller üblicherweise in eine idealisierte Strömungsumgebung versetzt, die eine homogene axiale Komponente zeigt und ohne Querkomponenten ist. Der Freifahrtversuch entspricht diesem Strömungsideal. Er ist als begleitendes Experiment zum Propulsionsversuch zu verstehen und wird in der Regel ebenfalls im Schlepp-tank durchgeführt.

Die Modellfreifahrt im Schlepptank überschreitet gewöhnlich die Reynoldszahl des Propulsionsversuches, bleibt aber weit unter der Reynoldszahl der Großausführung (siehe auch Abb. 1). Sei  $\nu$  die kinematische Viskosität von Wasser, so wird für Propeller die Reynoldszahl  $U_{ref} l_{ref} / \nu$  üblicherweise mit der Profillänge (für  $l_{ref}$ ) gebildet, welche der Flügel auf 70% des Propellerradius aufweist und entsprechend mit  $Re_{07}$  bezeichnet. Weiter beträgt die in  $Re_{07}$  eingehende Referenzgeschwindigkeit  $U_{ref}$  in guter Näherung 70% der Umfangsgeschwindigkeit, d.h. sie entspricht der Eigenbewegung des betrachteten Profilstückes.

Um trotz verletzter Reynolds-Ähnlichkeit aus den Modellwerten eine Großausführungsfreifahrt abzuleiten, kommen weltweit unterschiedliche Korrekturverfahren zum Einsatz. Zu den gängigen Verfahren lässt sich anmerken, dass diese bei der geometrischen Nachbildung des Propellerflügels nur einige wenige Parameter erfassen. Darüber hinaus wird "großer Propeller" oft sehr pauschal interpretiert, indem z.B. keine reibungsbedingten Unterschiede zwischen einem Propeller mit 10 m Durchmesser und einem mit 5 m Durchmesser in Erscheinung treten.

Die meisten Versuchsanstalten greifen auf ein von der ITTC 1978 vorgeschlagenes, relativ einfaches Korrekturverfahren (1) zurück, das geometrische Besonderheiten eines Propellers kaum erfassen kann. In der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) wurde abweichend davon bislang die sog. Lerbs/Meyne Methode (2) verwendet. Auch dieser Ansatz enthält die o.g. Pauschalisierungen hinsichtlich der Flügelform des Propellers und der tatsächlichen Dimension der Großausführung.

Es gibt seriöse Propeller-Entwerfer, die berichten, dank einer unkonventionellen Flügel-Geometrie Wirkungsgrad-Vorteile zu erzielen, ohne in anderen Belangen schlechter als ein vergleichsweise konventioneller Propeller zu werden. Hier mag ein Wirkungsgrad-Vergleich, der auf Modellmessungen basiert, nur bedingte Gültigkeit haben, andererseits aber eine Wirkungsgrad-Korrektur nach der ITTC Methode oder nach Lerbs/Meyne wegen der o.g. Vereinfachungen ebenfalls nicht überzeugen.

Angesichts dieses Dilemmas war es das Ziel von PREFUL, Maßstabskorrekturen zuverlässiger zu errechnen, so dass diese insbesondere auch für unkonventionelle Propeller gelten. Die PREFUL Partner sind die HSVA, die polnische Versuchsanstalt CTO sowie die Propellerhersteller MMG (Deutschland) und SCANA (Polen).

## **2. Vorgehensweise**

Der PREFUL-Arbeitsplan schloss Tunnelversuche für verschiedenste Propulsionskonzepte ein, mit dem Ziel, in einen Reynolds-Zahl Bereich zu gelangen, der nach oben hin deutlich über den Bereich herkömmlicher Tankversuche hinausgeht. Dadurch wurde die Spanne zur Grossausführung quasi ‚verkürzt‘ und die parallel verlaufende Methoden-Entwicklung eines Maßstabskorrektur-Verfahrens auf eine solide Basis gestellt. Tunnelversuche bei großen Reynoldszahlen erfolgten in der HSVA und bei CTO. Es wurden u.A. Tip-Rake-Propeller und High-Skew-Propeller untersucht. Beide Versuchsanstalten führten zudem RANS-basierte numerische Propelleranalysen durch, wobei hier auch MMG entscheidend mitwirkte. Letztlich wurde die Summe der numerischen Aufgaben zu etwa gleichen Teilen auf MMG, HSVA und CTO verteilt.

Am Ende sollte die Analyse aller Tests und die Auswertung aller Berechnungen eine neue und hoffentlich zuverlässigere Methode zum Skalieren von Propeller-Wirkungsgraden hervorbringen. Hier wurde eine Streifenmethode favorisiert. Als generelle Vorteile gegenüber dem ITTC Verfahren und der Lerbs/Meyne Methode wären zu nennen:

- Eine Streifenmethode erfasst Details der Propellerflügel-Kontur, wohingegen die beiden anderen Verfahren nur einen Flügel-Schnitt (auf dem "charakteristischen Radius") übernehmen.
- Man kann die Ergebnisse einer Streifenmethode nicht nur pauschal mit den Resultaten aus RANS-Berechnungen vergleichen, sondern eine Gegenüberstellung ‚Radius für Radius‘ vornehmen.
- Sollte eine detaillierte Erfassung der mit laminarer und der mit turbulenter Strömung bedeckten Zonen erforderlich sein, hätte die Streifenmethode Möglichkeiten, die Aufteilung dieser Zonen auf Druck- und Saugseite des Propellers unterschiedlich vorzunehmen.

Falls eine Mischung aus laminarer und turbulenter Strömung vorläge und keiner dieser Anteile dominant wäre, hätte das einige Bedeutung für die Skalierungsmethodik, wie Abb. 1 veranschaulichen soll. In Abb. 1 sind für einen Betriebspunkt des HSVA Propellers 2830, gekennzeichnet durch einen festgehaltenen normierten Schub  $KT$ , gemessene und erwartete Wirkungsgrade über der Reynoldszahl aufgetragen. Abb. 1 suggeriert, dass man auch mit Modellversuchen ein Reynoldszahl-Gebiet erreichen kann ( $Re_{07} > 10^6$ ), in dem die laminare Strömung auf beiden Flügelseiten vernachlässigbar ist und entsprechend der Wirkungsgrad als Funktion der Reynoldszahl bereits auf einer stetigen Kurve liegt (hier mit den □- Symbolen versehen), deren Charakter sich bis hin zur Großausführung nicht wesentlich ändert. Im Gegensatz dazu weisen Drehzahl-Variationen bei Schlepptankfreifahrten darauf hin, dass in diesem Reynoldszahl-Bereich ein komplexerer Verlauf des Wirkungsgrades zu erwarten ist (Δ-Symbol). Dieser kompliziertere Verlauf ist mit dem simultanen Auftreten laminarer und turbulenter Strömung zu erklären.

Der prognostizierte Großausführungs-Wirkungsgrad beträgt in Abb. 1 0.74 während im Schlepptank im besten Fall gerade einmal 0.68 gemessen wurden und für Tunnelversuche 0.7 erwartet werden. Wäre das die einzige auf die Modellpropulsion anzuwendende Korrektur hätten wir reibungsbedingt unsere unkorrigierte Prognose für den Leistungsbedarf des großen Propellers immerhin um fast 10% zu reduzieren. Der Wirkungsgrad des Propellers 2830, den dieser in einem idealen, nicht-viskosen Medium erzielen würde, läge immerhin bei 0.8.

Abb. 1 zeigt recht deutlich, daß eine Streifenmethode insbesondere auch auf die komplexen Strömungsvorgänge im Bereich der Modellversuche einzustellen ist. Detail-Informationen hinsichtlich des lokalen Strömungsverhaltens wurden den RANS-Rechnungen und den im Vorhaben durchgeführten Farbversuchen entnommen. Die Messung von Kräften und Momenten an großen

Modellpropellern bei hohen Drehzahlen, die zweckmäßigerweise in den Tunneln der HSVA und bei CTO stattfanden, dienten insbesondere der Absicherung unserer Vorstellungen vom idealisierten Propeller, dessen Kräfte und Momente aus dem Betrieb in einem nicht-viskosen Medium stammen.

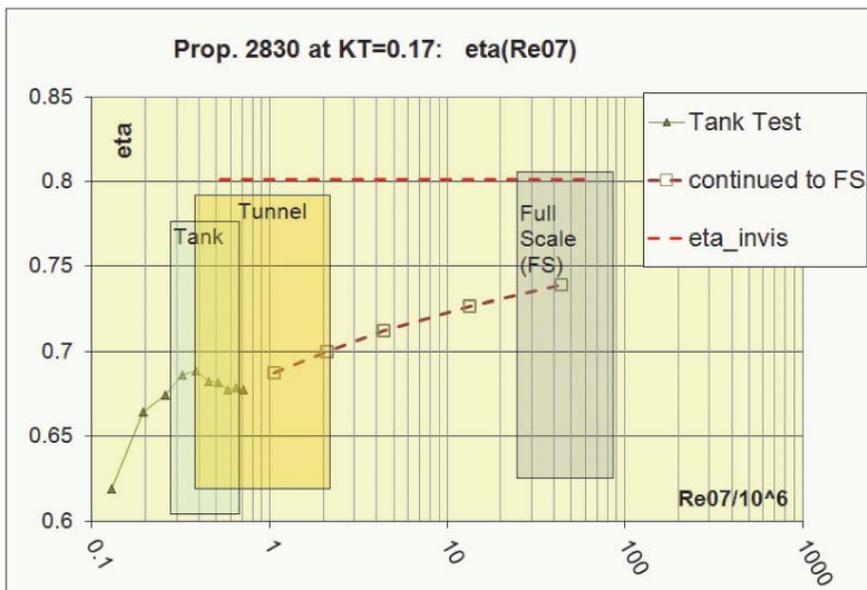


Abb. 1: Die Freifahrtversuche im großen Tunnel der HSVA können (wie hier am Beispiel des Propellers 2830 gezeigt) höhere Reynoldszahlen garantieren (die Reynoldszahl  $Re_{07}$  steigt logarithmisch entlang der horizontalen Achse). Die "continued to FS"-Linie deutet an, welchen Weg der Wirkungsgrad des Propellers in Richtung Großausführung vermeintlich nimmt. Als Referenz ist der Wirkungsgrad des Propellers 2830 gezeigt, den dieser in einem idealen, nicht-viskosen Medium erzielen würde.

### 3. Vergleichende Analyse existierender Korrekturverfahren in Verbindung mit Freifahrtberechnungen

Zunächst scheint es angebracht, das Verhalten der gängigen Korrekturverfahren mit Ergebnissen aus anderen Quellen zu vergleichen. Eine Gemeinsamkeit der üblichen Korrekturmethode ist tatsächlich das Konstrukt des nicht-viskosen Propellers (vergl. Abb. 1). Wüssten wir den Wirkungsgrad dieses geometrisch identischen Äquivalents, sollte die Skalierung des Wirkungsgrades herunter zum Großausführungs-Level recht verlässliche Resultate geben. Entsprechend bestand unsere erste Idee darin, mit den unterschiedlichsten Verfahren das ideale Verhalten ausgesuchter Propeller zu bestimmen.

Diese Vorgabe war insbesondere deshalb von Interesse, als verschiedene Korrekturmethode das ideale Verhalten unterschiedlich definieren und bestimmen. Die Lerbs/Meyne Methode identifiziert den Freifahrt-Wirkungsgrad  $\eta_i$  des idealen Propellers mit einem potentiellen Wirkungsgrad des betrachteten Propellers, den dieser im nicht-viskosen Medium zeigen würde (was generell einen Unterschied darstellt). Die ITTC Methode führt eine Reibungslinie für den Modellzustand ein und stellt damit normierte Oberflächenkräfte bereit, die entsprechend der aktuellen Flügelgeometrie in Kraft- und Moment-Korrekturen (und damit Wirkungsgrad-Korrekturen) umzuwandeln sind. Ein nicht-viskoses Berechnungsverfahren, wie etwa eine Randlelement-Methode, liefert per se den nicht-viskosen Propellerwirkungsgrad. Schließlich separiert eine RANS-Rechnung für alle Oberflächenelemente i.A. die Tangentialkräfte und Normalkräfte, sodass man, wenn man alle Reibungseffekte auf die Tangentialkräfte schiebt, den nicht-viskosen Propeller aus den Normalkräften bekommt.

Abb. 2 zeigt nicht-viskose Freifahrtwirkungsgrade für 2 Propeller, abgeleitet nach den oben erwähnten Verfahren. Auf der rechten Seite des oberen Bildes wurde zudem noch das Resultat einer Vortex-Lattice Methode ergänzt, die formal mit dem Paneel-Verfahren in eine gemeinsame Kategorie einzuordnen wäre. Die Säulen erreichen ausgehend vom Modellzustand (schwarz) nacheinander den Wirkungsgrad der Großausführung (dunkles Grau) und das nicht-viskose Niveau (leichtes Grau). Wir finden eine recht gute Übereinstimmung der nicht-viskosen Säulen und stellen ein etwas schlechteres Resultat für die Großausführungs-Säulen fest. Im Falle der ITTC- bzw. der Lerbs/Meyne-Methode sind die Modellwerte tatsächliche Messwerte aus

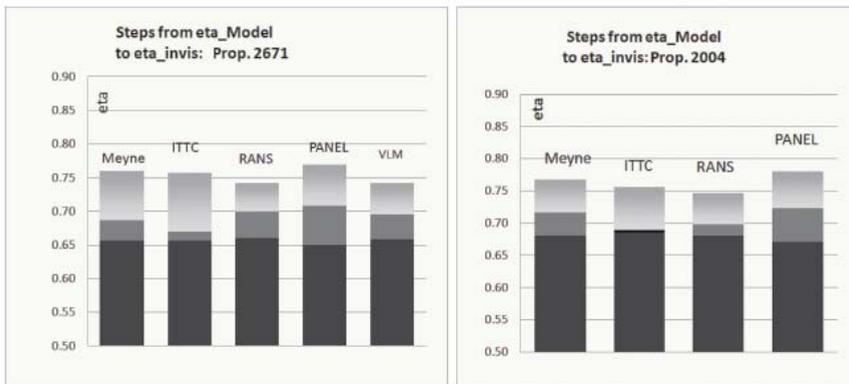
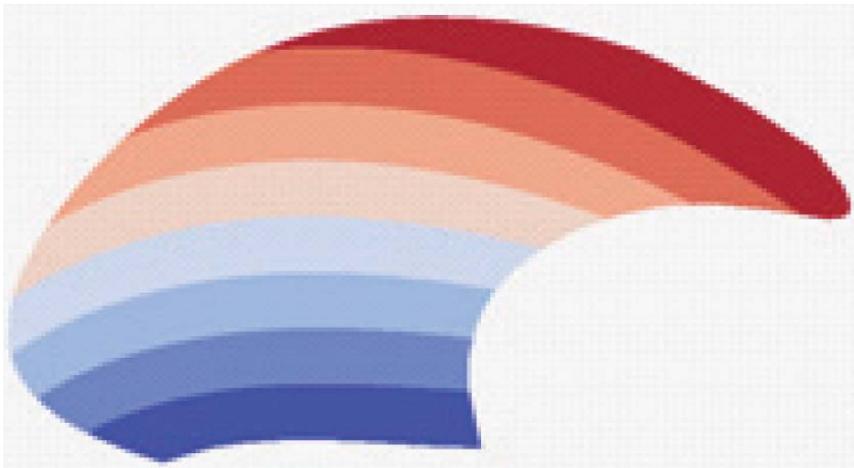


Abb. 2: Im linken Diagramm sind die vorausgesagten Freifahrtwirkungsgrade dem Propeller 2671 zugeordnet und gelten für einen Betriebspunkt entsprechend einer Fortschrittsziffer von  $J=0.79$ . Das rechte Diagramm gilt für den Propeller 2004 in einem Betriebszustand  $J=1.0$ .

Tunnelversuchen im Rahmen des Vorhabens. Für alle anderen Verfahren sind auch die Modellwerte reine Rechengrößen. Beim Propeller 2004, dessen Freifahrt im Tunnel der HSVA bei der höchsten erzielbaren Reynoldszahl gemessen wurde, sagt die ITTC Methode (unter Verwendung der Standard Rauigkeit) sogar eine negative Wirkungsgraddifferenz zwischen Großausführung und Modell voraus.

Daraus schlossen wir, dass bei einer neu entwickelten Streifenmethode durchaus auf das Konzept des aus der Modellfreifahrt ermittelten nicht-viskosen Propellers zurückgegriffen werden kann. Als eine wünschenswerte Vorgabe von messtechnischer Seite ist eine Freifahrt bei möglichst hoher Reynoldszahl zu sehen (was für die in Abb. 2 gezeigten Fälle zutrifft). Wenn, wie üblich, eine Modellfreifahrt mit einer Reynoldszahl deutlich unter  $10^6$  vorliegt, ist zu versuchen, Laminarbereiche abzuschätzen und deren Ausdehnungen in die Korrektur einfließen zu lassen.



*Abb. 3: Der Charakter einer Streifenmethode: Radiale Streifen werden mit lokalen Reynoldszahlen versehen, die eine örtliche Referenzgeschwindigkeit und eine örtliche Referenzlänge aufweisen, so dass sich über eine Reibungslinie örtliche Korrekturwerte für Kraft und Moment ergeben.*

#### **4. Realisierung der Streifenmethode**

Bei der Realisierung der Streifenmethode (vergl. Abb. 3) nutzten wir die RANS Resultate, um ein empirisches Modell zur Aufteilung der Flügeloberfläche in Laminarbereiche (mit relativ geringen Beiträgen zur Tangentialkraft) und turbulent umströmte Gebiete (mit relativ großen Tangentialkraft-Anteilen) zu erstellen. Zu diesem Zweck wurde die Streifenmethode kurzfristig zu einer "Oberflächen-Element Methode", wie in der Abb. 4 gezeigt. Im Vergleich mit RANS-Resultaten (siehe ebenfalls Abb. 4) konnten die Parameter des empiri-

rischen Modells festgelegt werden. Insbesondere gelangten wir so zurück zu einer spezifische Reibungslinie mit einem für das ganze Profil geltenden summarischen Widerstandsbeiwert (vergl. Abb. 5) die zum Einsatz in Verbindung mit einer Streifenmethode gut geeignet scheint.

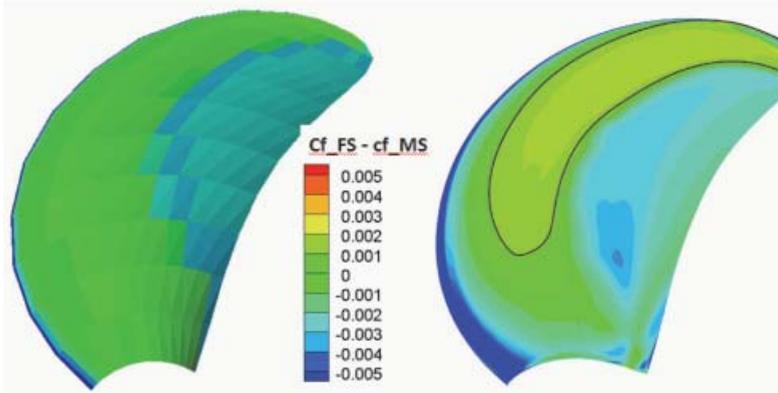


Abb. 4: Das Flächenverfahren auf der linken Seite zeigt eine Annahme, wie reibungsbedingte Unterschiede zwischen Großausführung und Modell auf den Flügel zu verteilen sind. Auf der rechten Seite basiert die entsprechende Darstellung auf dem Resultat einer von MMG durchgeführten RANS-Rechnung.

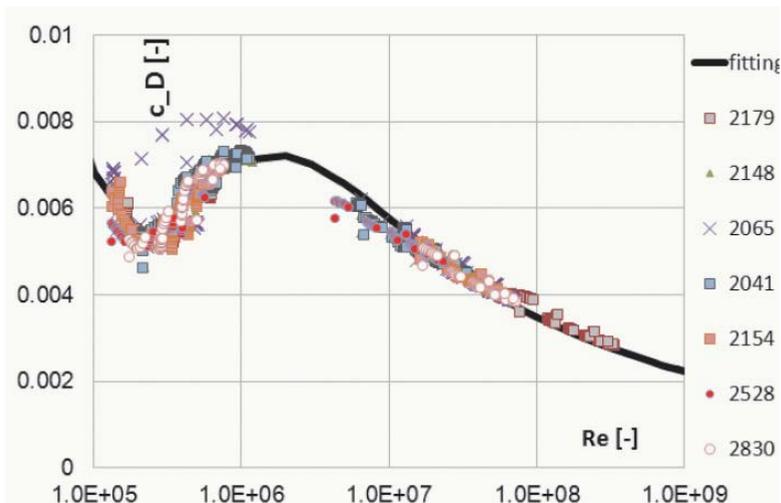


Abb. 5: Auswertung des Oberflächen-Verfahrens nach erfolgter Kalibrierung für eine Reihe von Beispielpropellern (gekennzeichnet durch eine 4-stellige Nummer) im Modellmaßstab und in der Großausführung. Die jeweiligen Punkte gelten für jeweils einen Propeller auf einem Radius in einem Maßstab. Dargestellt ist der reibungsbedingte Widerstandsbeiwert für den radialen Streifen. In der Summe ergibt sich eine Reibungslinie ("fitting"), die für die Streifenmethode Verwendung findet.

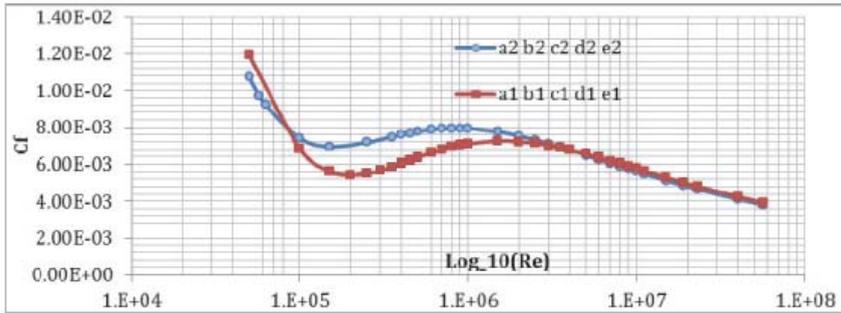


Abb. 6: Gegenüberstellung der vorgeschlagenen Reibungslinien, die rote Line entspricht der Linie aus Abb. 5, die blaue Linie gilt für den Propulsionszustand (mit mehr turbulenten Strömungsanteilen bei gleicher Reynoldszahl).

Da auch die Strömungsumstände des Propulsionsversuches erfasst werden müssen, wird hierfür eine abweichende Linie vorgeschlagen, die der erhöhten Turbulenz der eintreffenden Strömung Rechnung tragen soll (vergl. Abb. 6). Mit der neu entwickelten Streifenmethode unter Zuhilfenahme der Kurven aus Abb. 6 haben wir nun begonnen, Modellversuche neu auszuwerten und die alternative Leistungsprognose mit existierenden Vorhersagen zu vergleichen. Insbesondere werden dabei Fälle untersucht, für welche Probefahrtsmessungen vorliegen.

## 5. Zusammenfassung

Es wurden Resultate aus dem Projekt PREFUL vorgestellt und der Weg zu einer Streifenmethode, die eine Wirkungsgradprognose für den großen Propeller verbessern soll, beschrieben. Die Entwicklung der Streifenmethode als einfaches aber zuverlässiges Mittel zur Wirkungsgrad-Korrektur war das Ziel des Projektes. Jetzt stehen vergleichende Auswertungen von Propulsionsversuchen an, bei denen sowohl die neue Methode als auch eine der herkömmlichen Methoden (ITTC oder Lerbs/Meyne) Anwendung findet. Als Basis der gegenüberstellenden Anwendung der Methoden dienen dann Freifahrtprogramme der in Abb. 7 gezeigten Form (hier auf die Wirkungsgrade beschränkt), die Großausführungs-Wirkungsgrade und deren Relation zu den Modellwerten enthalten.

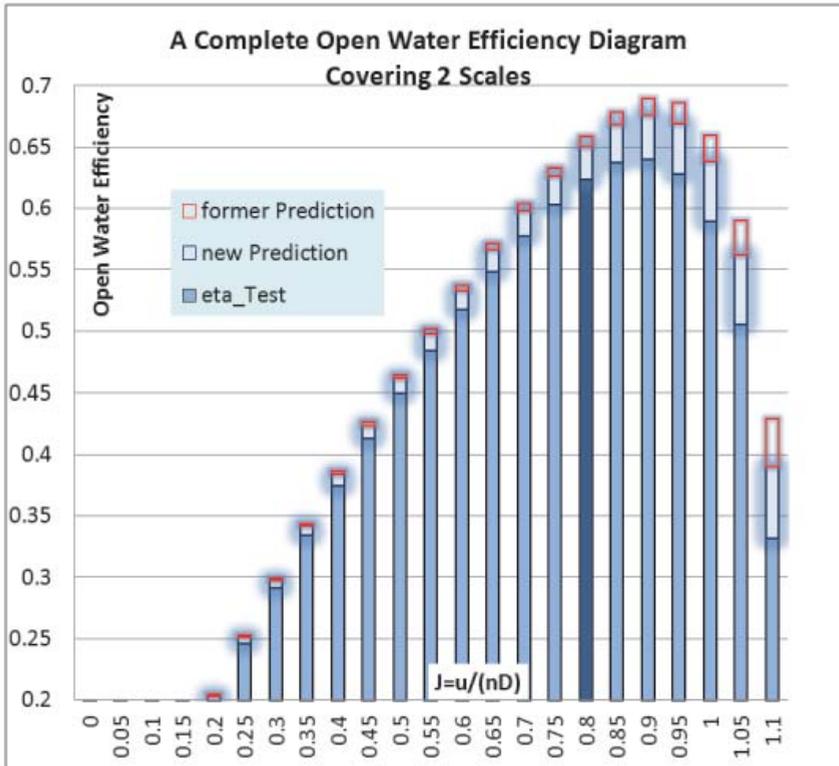


Abb. 7: Anwendung des bisherigen Verfahrens der HSVA und der neuen Streifenmethode (new Prediction). Für verschiedene Fortschrittsziffern  $J=u/(nD)$  ( $u$ =Anströmgeschwindigkeit,  $n$ =Drehzahl,  $D$ =Durchmesser) sind Wirkungsgrade kumulativ dargestellt. Es ergeben sich in diesem Fall aus den Modellwerten unterschiedliche Großausführungs-Wirkungsgrade ( $\eta_{\text{Test}}$ ), wobei die Streifenmethode sich hier konservativer verhält. Die dunklere Säule repräsentiert einen möglichen Betriebszustand des Propellers.

## 6. Literatur

- [1] ITTC: Principles of Naval Architecture – Volume II – Resistance, Propulsion and Vibration, SNAME, USA, 1988
- [2] Meyne, K.: Untersuchung der Propellergrenzschichtströmung und der Einfluss der Reibung auf die Propellerkenngrößen, STG-Jahrbuch, 1972



# MODESH – Neue Mess- und Simulationstechniken zur Untersuchung der Bewegung und Verformung von Schiffen im Seegang

A. Schumacher, P. Soukup (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt);  
J. Kaufmann (Germanischer Lloyd)

## Abstrakt

Das Verbundvorhaben MODESH (Motion and Deformation of Ships) mit dem Ziel, neue Mess- und Simulationsverfahren zur Bestimmung von Bewegungen und Verformungen von Schiffen im Seegang zu entwickeln, wurde in zwei Teilvorhaben gegliedert.

An der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) wurde das Teilvorhaben „Entwicklung einer 6-DOF GNSS Anlage und Weiterentwicklung von RANSE-Verfahren zur Messung bzw. zur Simulation von Schiffsbewegungen“ mit Beteiligung des Unterauftragnehmers GeoIT GmbH, bearbeitet. Die Bearbeitung des zweiten Teilvorhabens „Simulation und Messung extremer Schiffsanworten im Seegang“ wurde vom Germanischen Lloyd durchgeführt. Im Folgenden wird das Gesamtprojekt vorgestellt, die erreichten Ziele und die jeweiligen Lösungsansätze beschrieben.

## Einleitung

Die genaue Messung von Schiffsbewegungen und Schiffsverformungen sowie des herrschenden Seegangs über einen längeren Zeitraum ist Voraussetzung für die Erfassung und Identifizierung gefährlicher Situationen von Schiffen in schwerer See. Auch für die Validierung von neuen numerischen Simulationstechniken sind diese Kenntnisse unverzichtbar.

Herkömmliche Messtechniken können weder alle 6 Freiheitsgrade der Schiffsbewegungen noch über Zeiträume von mehreren Wochen bzw. Monaten erfassen, geschweige denn globale Verformungen des Schiffes infolge Seegangslasten messen. Auch die Berechnungsmethoden sind limitiert, was die genaue Vorhersage von speziellen Phänomenen wie z.B. große Rollbewegungen und speziell parametrisches Rollen, grünes Wasser an Deck oder Slamming angeht.

Aus diesen Feststellungen heraus ergibt sich die Notwendigkeit, sowohl bei der Bewegungsmessung von Schiffen, als auch bei der Entwicklung numerischer Vorhersageverfahren neue Techniken voranzutreiben, die den oben

geschilderten Bedarf decken, und somit einen bedeutenden Beitrag in Richtung Schiffssicherheit und Wirtschaftlichkeit des Seetransports zu leisten.

Eine Hauptaufgabe des Vorhabens war die Entwicklung und Einführung einer neuen Technik zur Langzeitmessung der Bewegungen und Verformungen des Schiffes im Seegang. Alle 6 Freiheitsgrade der Schiffsbewegung und globale Schiffsverformungen wie Durchbiegung und Torsion sollten mit einer guten Genauigkeit gemessen werden. Das zweite Hauptziel war es, vorhandene numerische RANSE-Verfahren für die Simulation der Bewegungen des Schiffes im natürlichen Seegang weiter zu entwickeln und speziell für die gezielte Untersuchung gefährlicher Situationen anzuwenden.

Mit computergesteuerten deterministischen Seegangsversuchen wurden die vom Germanischen Lloyd und HSVA entwickelten RANSE-Methoden validiert. Besonderes Augenmerk wurde auf extreme Rollbewegungen, Wasser an Deck sowie Slammingkräfte gelegt. Zur Messung der Slammingkräfte wurden neu entwickelte Kraftmesspaneele eingesetzt.

Um die Methoden zur Simulation der nichtlinearen Rollbewegungen weiter zu verbessern, wurden im Rahmen des Teilvorhabens Rolldämpfungsversuche mit einem Schiffsmodell durchgeführt. Dabei wurden die Rolldämpfungskoeffizienten in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Rollwinkel bestimmt.

### **Entwicklung und Implementierung einer 6-DOF GNSS Messanlage**

Mit der entwickelten GNSS Messanlage sollen alle 6 Freiheitsgrade der Schiffsbewegung, Beschleunigungen an beliebigen Schiffspositionen sowie globale Schiffsverformungen wie Durchbiegung und Torsion ermittelt werden. Das Herzstück der geplanten Messanlage ist eine „6-DOF GNSS-Anlage“, basierend auf „Global Navigation Satellite System“ (GNSS) Technologie. Sie besteht aus drei GNSS-Antennen mit angeschlossenen GNSS-Receiver, die in einem Dreieck angeordnet ihre Positionen auf der Erdkugel messen.

Die absolute Position der Antennen kann nicht sehr genau bestimmt werden, jedoch sind die Positionen aller drei Antennen mit dem gleichen Fehler versehen, so dass die relative Positionsänderung zwischen den Antennen sehr genau bestimmt werden kann. Die Methode wird „moving baseline method“ genannt.

Die zeitsynchrone Erfassung der Positionsrohdaten der GNSS-Antennen erfolgt mit dem von GeolT GmbH entwickelten und speziell für die vorliegende Aufgabe angepassten GeolT-Messwerterfassungssystem. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, dass das System bei Störungen oder nach einem Stromausfall die Datenaufzeichnung wieder automatisch fortsetzt, sodass

Langzeitmessungen auch ohne geschultes Personal möglich sind. Während des Projektes konnten insgesamt Daten von ca. 15 Monaten (mit Unterbrechungen) gespeichert werden.

Zwei Messanlagen mit je drei Antennen wurden im April 2009 auf dem von Hapag Lloyd zur Verfügung gestellten Containerschiff „Kobe Express“ installiert. Die Anlagen wurden auf dem Deckshaus und auf dem Vormast angeordnet (Abb.1). Während der folgenden drei Jahre wurde die GNSS-Anlage intensiv getestet und weiterentwickelt.

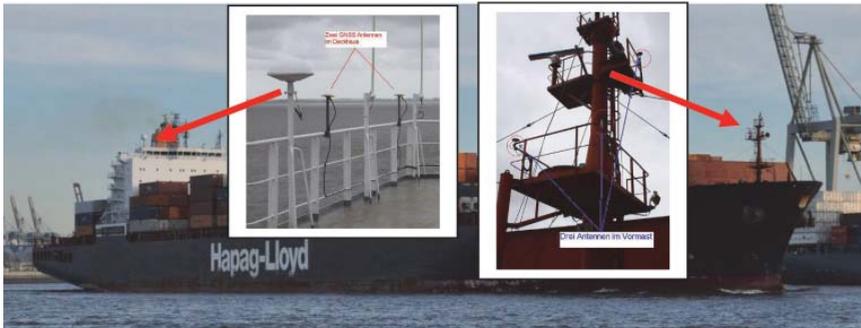


Abb. 1: GNSS-Anlagen auf der „Kobe Express“ (oben)

Nach der Erfassung müssen die Positionsrohdaten ausgewertet, geprüft und zu genauen relativen Positionsdaten (Baselines) weiter verarbeitet werden. Auch dieser GNSS-Prozessor basiert auf einer Entwicklung von GeoIT, der zu diesem Zweck erheblich weiterentwickelt wurde.

Um die Handhabung der gesamten GNSS-Anlage zu erleichtern und übersichtlich zu gestalten, wurde eine Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt. Damit können Messprojekte angelegt, die GNSS-Anlage initialisiert und bedient, die aufgezeichneten Positionsrohdaten verwaltet und verarbeitet werden. Das Hauptmenü der Benutzeroberfläche ist in Abb. 2 zu sehen.

Außerdem wurde eine Software entwickelt, welche aus den GNSS-Daten die Schiffsbewegungen (6 DOF) sowie daraus Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an beliebigen Schiffspositionen berechnet. Auch Driftwinkel und Kurse können dargestellt werden. Insgesamt war diese Aufgabe sehr aufwendig, da zwischen Aufzeichnung der Positionsdaten und resultierender Schiffsbewegung insgesamt fünf verschiedene Koordinatensysteme zum Einsatz kommen und die berechneten Schiffsbewegungen in geeigneter Weise gefiltert werden müssen.

Ein Vergleich der berechneten Werte erfolgte einerseits mit Messungen, die vom GL parallel zu MoDeSh auf der „Kobe Express“ durchgeführt wurden.

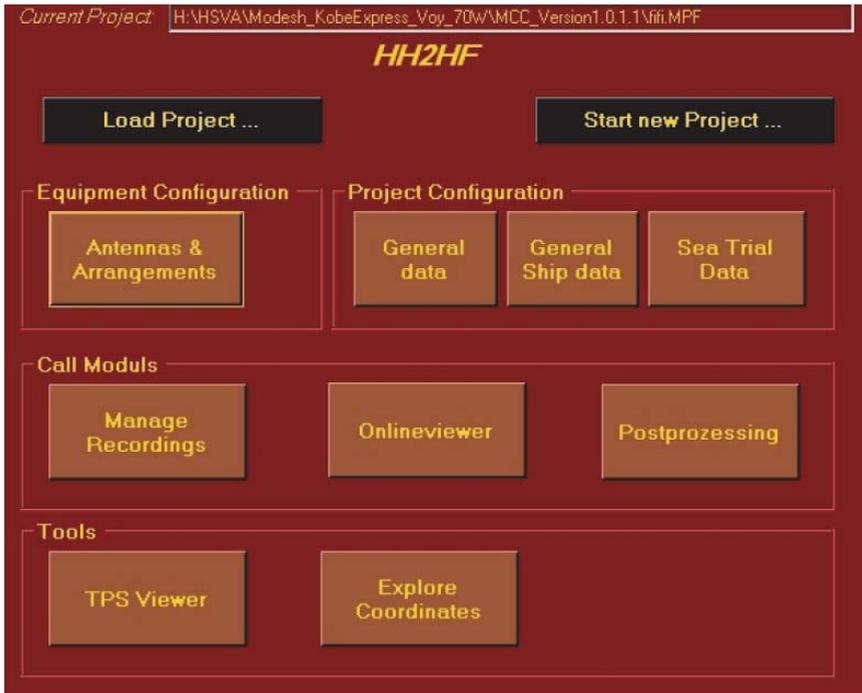


Abb. 2: Hauptmenü der entwickelten Benutzeroberfläche

Für einen Zeitraum, in dem größere Schiffsbewegungen registriert wurden, ist in Abb. 3 (links) der Vergleich zwischen den berechneten Roll- und Stampfwinkel sowie der Vertikalbeschleunigung am Heck dargestellt. Während einer Messreise der HSVA wurden Vergleichsmessungen mit einem Inertial-Messsystem mit faseroptischen Kreiseln durchgeführt. Ein Vergleich der gemessenen Roll- und Stampfbewegungen mit den aus der GNSS-Anlage berechneten Werten ist in Abb. 3 (rechts) zu sehen.

Der Vergleich mit den GL und HSVA Referenzdaten zeigt eine gute Übereinstimmung mit den aus den GNSS-Daten berechneten Roll-, Gier- und Stampfwinkel sowie Vertikalbeschleunigungen. Inwieweit die translatorischen Bewegungen richtig berechnet werden, konnte nicht endgültig festgestellt werden. Eigentlich sollten mit den zwei GNSS-Anlagen auch globale Schiffsverformungen ermittelt werden. Da jedoch die Entwicklung des Prozessors und der Berechnungssoftware viel aufwendiger war als geplant, konnte dies aus Zeitmangel nicht mehr realisiert werden.

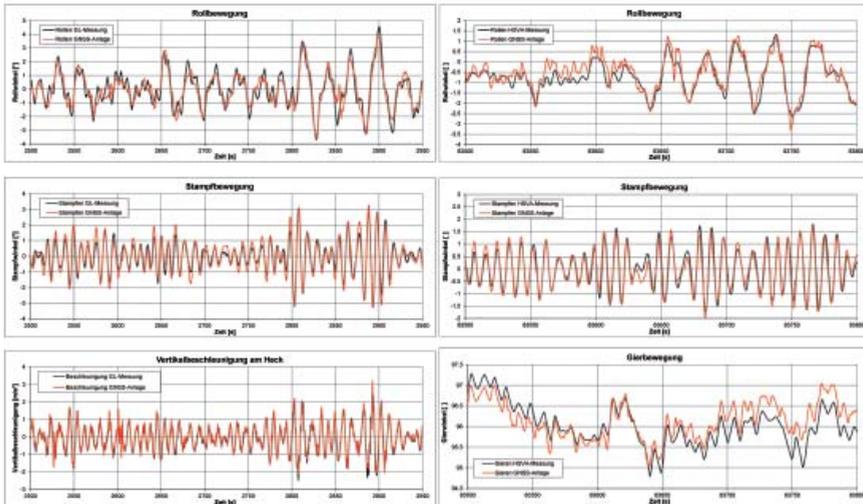


Abb. 3: Vergleich der Schiffsbewegungen der GNSS-Anlage mit GL-Bordmessungen (links) sowie mit HSVA-Vergleichsmessungen (rechts)

### Modellversuche

Mit dem Holzmodell eines Containerschiffes im Maßstab 1:44 wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei Versuchsreihen in der HSVA durchgeführt. Zunächst wurden Rolldämpfungsversuche und erste Versuche in moderaten Wellen durchgeführt. Für die zweite Versuchsreihe in hohen Wellen wurde das Modell mit Aufbauten und vereinfachten Containerstapeln vervollständigt. Die Linien und den Generalplan für den Bau des Modells des Containerschiffes stellte die südkoreanische Werft DSME (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd) zur Verfügung. Bei dem untersuchten Schiff handelt es sich um ein 282 m langes Containerschiff mit einer Tragfähigkeit von 4100 TEU.



Abb. 4: Fertig ausgerüstetes Schiffsmodell mit Decksaufbauten

Die Versuche mit dem frei fahrenden ferngesteuerten Modell wurden komplett computergesteuert durchgeführt. Die Steuerung des gesamten Versuchsablaufs wird vom zentralen Schleppwagenrechner übernommen. Das Fahren des Schiffsmodells und der Startzeitpunkt des Wellenerzeugers wer-

den zeitlich so aufeinander abgestimmt gesteuert, dass das Modell bestimmte Wellenzüge zu einer definierten Zeit an einem definierten Ort im Tank antrifft. Neben der Steuerung übernimmt dieser Computer auch das Messen der Steuerparameter von Ruder und Fahrtrieb, der Positionen von Quer- und Schleppwagen im Tank, der Bewegungsdaten des Modells und weitere versuchsabhängige Daten.

Der Quer- und Schleppwagen wird dem Modell so nachgeführt, dass die Kamera des optischen Bewegungserfassungssystems immer freie Sicht auf das Modell hat. Das optische Bewegungserfassungssystem erfasst die Relativbewegungen (Abstand und Orientierung, 6DoF) des Modells zum Schlepp- und Querwagen.

Mit Hilfe dieser Informationen berechnet der Schleppwagenrechner die absolute Position des Modells im Tank und kann dadurch den Schleppwagen dem Modell nachführen und das Modell entsprechend einem vorgegebenen Kurs (Begegnungswinkel) durch den Tank steuern. Zur Steuerung des Modells sendet der Schleppwagenrechner über ein Telemetriesystem die entsprechenden Vorgabewerte (Soll-Werte) für Ruderwinkel und Propellerdrehzahl an die Regler im Modell. Die Nachführung des Querwagens mit der montierten Kamera in Querrichtung übernimmt eigenständig die Regeleinheit des Querwagens.

Durch diese spezielle Versuchsanordnung kann die Modellbewegung und die exakte Modellposition im Schlepptank berührungslos erfasst werden.

### **Experimentelle Ermittlung der Rolldämpfungskoeffizienten**

Ein erklärtes Ziel von MoDeSh war u.a. die Entwicklung von RANSE-Verfahren zur Simulation von Schiffsbewegungen sowie lokalen Belastungen im Seegang. Für eine korrekte numerische Modellierung ist die Kenntnis des Rollverhaltens von Schiffen sowie deren Rolldämpfungskoeffizienten unerlässlich. Zur Bestimmung der wirksamen Rolldämpfung wurden deshalb erzwungene Rollbewegungsversuche durchgeführt. Dabei wird das Modell mittels eines Schwingungserregers zu harmonischen Rollbewegungen angeregt. Die Rolldämpfung von Schiffen verhält sich nichtlinear, d.h. mit wachsenden Rollwinkeln nimmt die wirksame Rolldämpfung im allgemeinen zu. Daher wurden zur Erfassung der Nichtlinearität Versuche mit verschiedenen großen Erregungsmomenten und damit verschiedenen großen Rollwinkeln durchgeführt. Durch eine gezielte Wahl von Massen und Hebelarmen wurden für jede untersuchte Schiffsgeschwindigkeit jeweils drei verschiedene Erregungsmomente eingestellt, die zu Resonanzamplituden zwischen  $5^\circ$  bis  $20^\circ$  führten. Somit wurden Rolldämpfungskoeffizienten für unterschiedliche Resonanzwinkel ermittelt.

Die Rolldämpfung des Modells wurde für vier verschiedene Geschwindigkeiten bei jeweils konstanter Propellerdrehzahl untersucht. Durch sehr langsames Drehen des Schwingungserregers wurden zunächst die statischen Krängungswinkel für die verschiedenen erregenden Momente ermittelt. Für jede Kombination aus Geschwindigkeit und erregendem Moment wurden fünf bis zehn Frequenzen nahe der Eigenfrequenz des Modells eingestellt, um die gewünschten Resonanzkurven zu erhalten.

Die gemessenen Rollwinkel, die sich bei den unterschiedlichen erregenden Momenten einstellen, werden als Funktion der Erregungsperioden aufgetragen (Abb. 5). Anhand der so erzeugten Resonanzkurven können die dimensionslosen Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung berechnet werden.

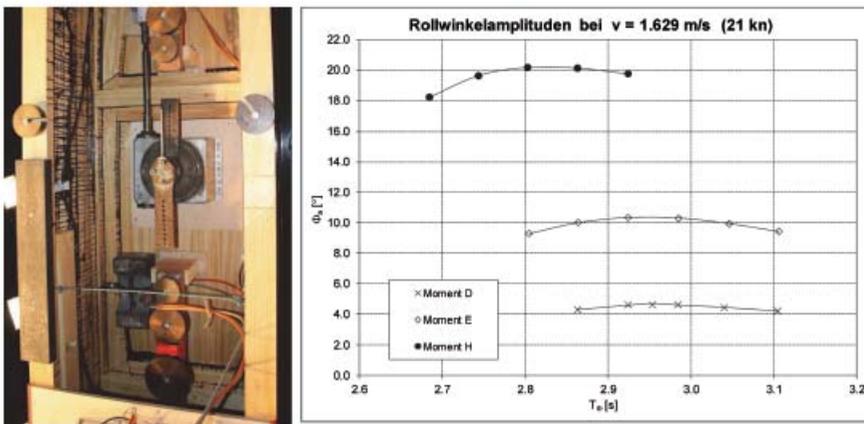


Abb. 5: Eingebauter Rollschwingungserreger (links) und Rollwinkel für verschiedene Erregungsmomente (rechts)

## Untersuchung von Extremereignissen

Für die zweite Versuchsserie wurde das Modell mit den Decksaufbauten und den Containerstapeln verwendet. Dies ermöglichte die Untersuchung von extremen Phänomenen wie Slamming, grünes Wasser an Deck und parametrisch erregtes Rollen.

Versuche zu Slammingereignissen am Vorschiff und grünem Wasser an Deck wurden in vorlichen regelmäßigen Wellen, unregelmäßigen Seegängen sowie in Wellenpaketen bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Dafür wurde das Modell mit drei, eigens angefertigten Kraftmesspaneelen am Vorschiff ausgerüstet (Abb. 6 links). Verschiedene Wellenhöhen und Wellenlängen bzw. Peakperioden wurden verwendet, um die verschiedenen Faktoren, Einflüsse und Abhängigkeiten zu untersuchen. In achterli-

chen regelmäßigen Wellen wurden die Slammingdrücke (ein Kraftmesspaneel) am Heck gemessen. In Abb. 6 (rechts) ist die Zeitreihe des Slammingdrucks am Bug in einer hohen regelmäßigen Welle gezeigt.

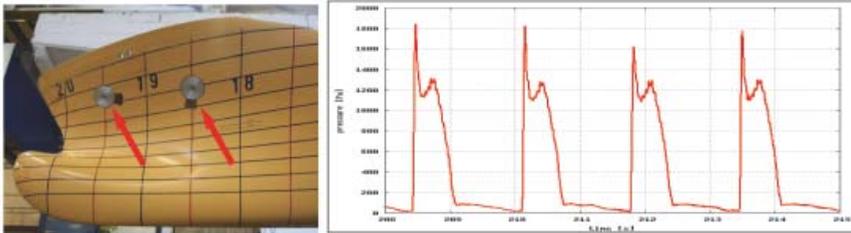


Abb. 6: Kraftmesspaneele (links) und gemessene Slammingdrücke (rechts)

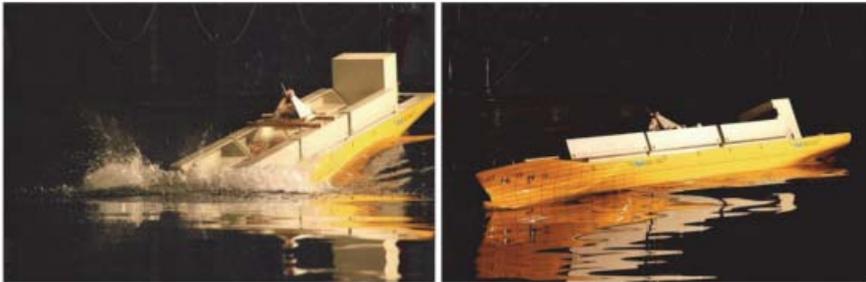


Abb. 7: Slamming (links) parametrisch erregtes Rollen (rechts)

Parametrisches Rollen wurde in regelmäßigen Wellen und in unregelmäßigen Seegängen untersucht. Es wurden sowohl vorliche als auch achterliche Begegnungswinkel untersucht. Eine gezielte Untersuchung war möglich, da im Vorfeld numerische Untersuchungen mit der linearen Streifenmethode ROLLSS durchgeführt wurden, um geeignete Ladefälle und potenziell kritische Bedingungen (Kombination aus Geschwindigkeit, Begegnungswinkel und Wellenlänge) zu identifizieren, bei denen parametrisches Rollen erwartet wird.

Neben der Ermittlung von Slammingkräften und der Untersuchung von parametrisch erregtem Rollen wurden die Übertragungsfunktionen des Modells unter Anwendung der Wellenpakettechnik für zwei Geschwindigkeiten gegen die See bestimmt. Im Rahmen dieser Versuchsserie wurden einige Seegänge ohne Modell auf gemessen, um sie anschließend in den entwickelten RANSE-Verfahren simulieren zu können.

## Weiterentwicklung von RANSE Verfahren

Herkömmliche RANSE-Verfahren sind eingeschränkt bei der Simulation von Schiffsbewegungen in schwerer See. Um die Schiffsumströmung, teilweise unter Berücksichtigung des drehenden Propellers, und die Schiffsbewegung in natürlichem Seegang mit einem RANSE-Verfahren zu simulieren, einschließlich solcher Situationen bei denen starke Bewegungen und starke Verformungen der freien Wasseroberfläche, wie brechende Wellen und Wasser an Deck vorkommen, wurden in diesem Vorhaben die vorhandenen numerischen Techniken verbessert und weiterentwickelt.

Die Simulation von Schiffsbewegungen und Belastungen im Seegang wurden in diesem Vorhaben sowohl mit der kommerziellen Software Comet (HSVA, GL), dem Code FreSCo+ (HSVA) als auch mit der OpenSource Bibliothek OpenFOAM (GL) durchgeführt.

Zur Simulation von Bewegungen wurde der RANSE Solver zuerst mit einem 6DOF (6 Degrees Of Freedom) Modul basierend auf Euler-Winkeln und später basierend auf Quaternionen gekoppelt.

Um die Simulation von natürlichem Seegang zu ermöglichen, wurde die Einlassrandbedingung erweitert. Der natürliche Seegang wird hierbei durch die Vorgabe der Orbitalgeschwindigkeiten aus einer Vielzahl von beliebigen Elementarwellen erzeugt. Dabei wird teilweise eine spezielle Anordnung von Dirichlet und Neumann Randbedingungen gewählt, bei der die Wellen das Berechnungsgebiet auch reflexionsfrei verlassen können.

Bei dem beschriebenen Verfahren wird grundsätzlich vorausgesetzt, dass die Form der Wasseroberfläche in der Nähe der Ränder bekannt ist, damit keine Reflexionen auftreten können. Ferner ist die numerische Dämpfung ein allgemein bekanntes Problem. Selbst auf einem beliebig feinen Gitter wird jede Welle in einem langen Berechnungsgebiet im Laufe ihres Fortschreitens durch Dämpfung verschwinden. Dieser Effekt ist bei kurzen Wellen stärker als bei langen Wellen. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich dabei in achterlichen Wellen.

Abhilfe dafür wurde durch einen „Free-Surface-Treatment“ Algorithmus geschaffen, bei dem die gewünschte analytische Lösung auch im Berechnungsgebiet erzwungen wird und erst im Nahfeld des Schiffes frei gelassen wird. Dazu muss die analytische Lösung für alle Zellen im Berechnungsgebiet berechnet werden und anschließend über Quellterme zur RANSE-Lösung hinzu addiert werden. Zwei Ansätze wurden dabei entwickelt und erprobt: In FreSCo+ eine implizite Methode, bei der das lineare zu lösende Gleichungssystem für die unbekanntenen Größen (Geschwindigkeit und die Zellfüllung),

durch Terme, die sehr viel größer als die Zentralkoeffizienten des Gleichungssystems sind und die analytische Lösung enthalten, erweitert wurde. In Comet und OpenFoam eine explizite Methode, bei der das Geschwindigkeitsfeld der RANSE-Simulation in jeder Zelle mit der analytischen Soll-Lösung verglichen wird und durch einen Quellterm von der Größe der Abweichung angepasst wird.

Mit dem beschriebenen Verfahren ist es nun möglich, die Wellen auch im Berechnungsgebiet zu erzeugen. Dadurch können zu stark gedämpfte Wellen wieder angefacht, gestörte Wellen bereinigt und vom Schiff abgestrahlte Wellen auch in Glattwasser geglättet werden.

## **Ausgewählte Beispiele aus den RANSE Simulationen**

### **Simulation eines transienten Wellenpaketes:**

Auf Grund der einfachen Geometrie und großen Bekanntheit wurde erst ein Wigley-Schiff zur Untersuchung herangezogen. Anstelle eines unregelmäßigen Seeganges mit zufälligen Phasen wurde ein transientes Wellenpaket erzeugt. Ein transientes Wellenpaket kann als ein Spezialfall eines unregelmäßigen Seeganges aufgefasst werden. Dabei wird eine Gruppe von Wellen erzeugt, die mit kurzen langsam laufenden Wellen beginnt, die von kontinuierlich immer länger werdenden Wellen gefolgt werden (Abb. 8). Der Vorteil dieser Technik liegt nun darin, dass mit einer sehr kurzen Bewegungssimulation sehr viele Informationen gewonnen werden können, da in einem solchen Wellenzug, wie in einem unregelmäßigen Seegang, das gesamte Frequenzspektrum enthalten ist. Abb. 9 zeigt die berechneten Stampfbewegungen mit verschiedenen Simulationsparametern.

Wie zu erwarten war, sind bei der Simulation ohne das neu entwickelte Free-Surface-Treatment (FST) insbesondere bei den kurzen Wellen wegen der hohen numerischen Dämpfung deutlich kleinere Stampfbewegungen fest zu stellen. Dies zeigt sich deutlich in Abb. 10. Darin wird die Wellenerhebung im Berechnungsgebiet zu verschiedenen Zeitpunkten ohne FST (links) und mit FST (rechts) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass ohne FST die kurzen Wellen überhaupt nicht abgebildet werden und somit auch keine Schiffsbewegungen hervorrufen können. Mit FST können nun alle Wellenfrequenzen gut abgebildet werden, was eine Grundvoraussetzung für die Simulation eines unregelmäßigen Seeganges ist. Insgesamt zeigt dieses Beispiel, dass das neue Free-Surface-Treatment eine erhebliche Verbesserung hinsichtlich der starken numerischen Dämpfung hochfrequenter Wellenkomponenten darstellt.

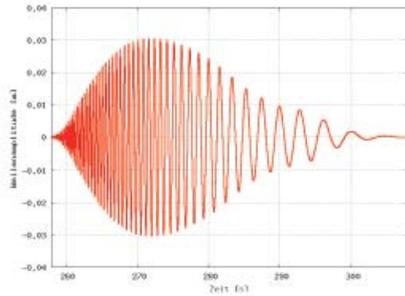


Abb. 8: Wellenzug aus einem transienten Wellenpaket.

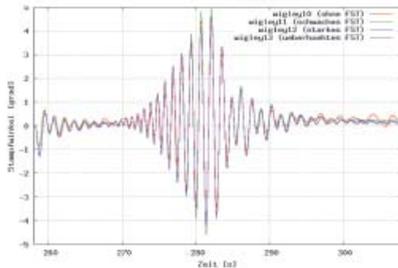


Abb. 9: Stampfbewegungen in einem Wellenpaket

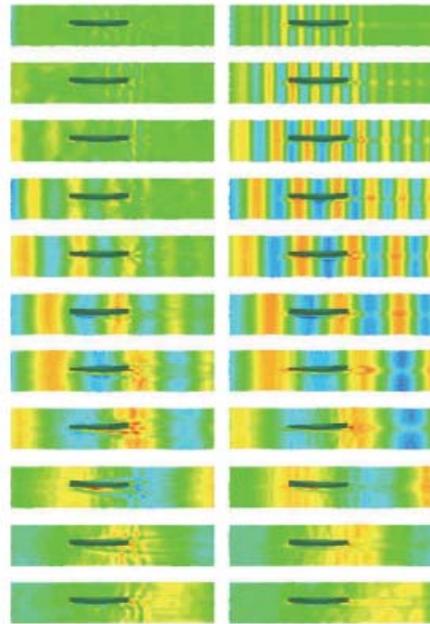


Abb. 10: Wigley-Schiff in einem Wellenpaket ohne (links) und mit (rechts) Free-Surface-Treatment

### Simulation von parametrischem Rollen in regelmäßigen und unregelmäßigen Seegängen:

Abb. 11 zeigt die RANSE-Simulation von parametrischen Rollen in regelmäßigen Wellen von vorn. Das wohl schwierigste Thema ist allerdings die Simulation von parametrischem Rollen in unregelmäßigen achterlichen Seegängen. Wegen der bekannten Phänomene ist die Wellendämpfung in diesem Fall in der Simulation besonders hoch. Aus diesem Grund wurden diese Simulationen nur mit Free-Surface-Treatment durchgeführt.

Ferner handelt es sich bei parametrischem Rollen um ein hochgradig nichtlineares Phänomen, und bei einem unregelmäßigen Seegang um eine stark instationäre Anregung. Dadurch ist es kaum möglich, einzelne Situation genau zu reproduzieren, denn bereits kleinste Abweichungen können zu einem völlig anderen Verlauf führen (Chaostheorie). Dies soll die Schwierigkeit der Vergleichbarkeit verdeutlichen.

Bei dem hier gezeigten Beispiel des Containerschiffes aus den Modellversuchen wurde ein Ladefall mit niedriger metazentrischer Höhe gewählt um

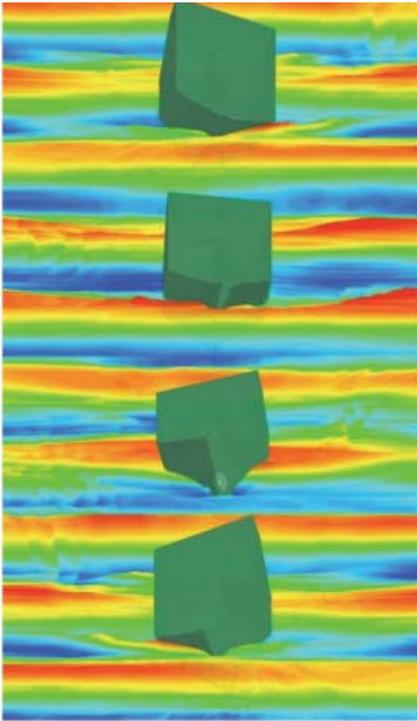


Abb. 11: Parametrisches Rollen in Wellen von vorne

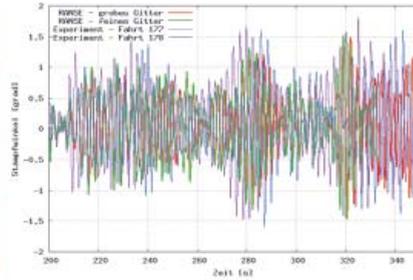


Abb. 12: Stampfbewegung in einem unregelmäßigen Seegang von hinten.

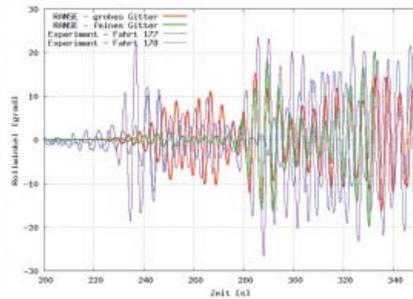


Abb. 13: Rollbewegung in unregelmäßigem Seegang von hinten

auch in nachlaufender See die gefährliche 1:2 Resonanz hinsichtlich parametrischen Rollens zu finden. Dazu wurde ein in ROLLSS erzeugter unregelmäßiger und besonders ungünstiger Seegang im Schlepptank und in der RANSE Simulation erzeugt. Dabei konnte auch Parametrisches Rollen wieder gefunden werden, wenn auch die Zeitverläufe, selbst in den Modellversuchen, jedes Mal anders waren. In der RANSE Simulationen wurde dieser Seegang mit knapp 400 Elementarwellen nachgebildet und die Bewegungssimulation wurde auf einem groben (700000 Zellen) und auf einem feinen (2.6 Mio Zellen) unstrukturierten Rechengitter durchgeführt und verglichen. Die Rechenzeit für eine 150 Sekunden lange Simulation betrug mit dem groben Gitter lediglich wenige Tage auf nur einem Clusterknoten. Erfreulich ist es, dass dank des Free-Surface-Treatments bereits auf dem groben Gitter gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Abb. 12 zeigt die Ergebnisse für die Stampfbewegung und die Abb. 13 die Rollbewegung aus den RANSE Simulationen und den Modellversuchen. Bei der Stampfbewegung ist tendenziell eine gute Vergleichbarkeit der Zeitschriebe festzustellen. Bei der Rollbewegung streuen, wie schon angedeutet, die Ergebnisse wegen der starken Nichtlinearität, sodass ein Vergleich schwierig ist. Trotzdem können die in der Simulation erzielten Ergebnisse als ein großer Erfolg gewertet werden.

## Simulation mit Autopilot

Um realistische Simulationen in natürlichem Seegang durchführen zu können, wurde eine Schnittstelle zum 6-DoF Löser entwickelt, über die externe, zeitabhängige Kräfte zur Laufzeit bestimmt und am Schiff angebracht werden können. Die Schnittstelle erlaubt das Auslesen des aktuellen Bewegungszustandes (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung).

Diese Schnittstelle wird genutzt, um eine virtuelle Ruderkraft am Schiff anzubringen. Die Ruderkraft wird von einem Autopiloten gesteuert. Der Autopilot ist als einfacher PD-Regler mit linearen Potential- und Differential-Glied implementiert. Das Potentialglied wird mit der aktuellen Abweichung des Gierwinkels vom Sollgierwinkel, das Differentialglied mit der aktuellen Gierrate ausgewertet.

Für eine realistische Simulation ist es wichtig, dass das Potential- und Differential-Glied ausgeglichen sind, um große Überschwingwinkel zu vermeiden. Es wurde zunächst ein einfacher Testfall entworfen. Ein Testfahrzeug startet auf der Position (0,0) mit Kurs Nord und steuert auf ein Ziel in der Position (70,20). Der Zielkurswinkel wird in jedem Zeitschritt aus der aktuellen Position des Fahrzeuges bestimmt. Die Geschwindigkeit der Rudermaschine wurde hier bewusst langsam gewählt, um den Effekt des Überschwingens zu betonen.

Abb. 14 stellt die Bahnen des Testfahrzeuges für vier Rechnungen mit verschieden starkem Potentialglied ( $d$ ) dar. Die Bahn der Rechnung mit  $d=0$  (Potentialglied deaktiviert) zeigt ein deutliches Überschwingen. Die größten Werte ( $d=1$  und  $d=1.5$ ) zeigen ein geringes Überschwingen.

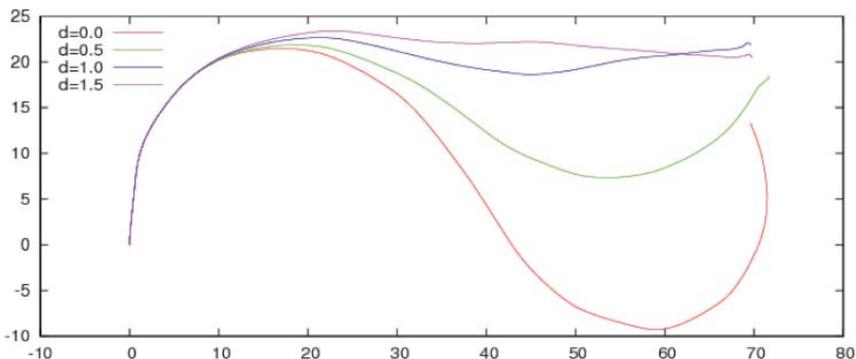


Abb. 14: Bahn des Testfahrzeuges für verschiedene Einstellungen des Differentialgliedes des Kursreglers

## Simulation mit Propeller

Um zu untersuchen, inwieweit für die Vorhersage von Schiffsbewegungen in schweren Seegang und in extremen Bewegungssituationen wie beispielsweise parametrisches Rollen die Berücksichtigung der tatsächlichen Vorausschwindigkeit notwendig ist, wurde der 6DoF-Löser entsprechend erweitert, um einen geometrisch modellierten Propeller zu berücksichtigen. Die Kräfte durch den Propeller fließen bei Integration der Kräfte in die Bewegungsgleichung mit ein.

Die Kräfte aus der Propellerrotation wurden dabei mit den zwei folgenden Methoden modelliert und verglichen: Bei der Multiple Reference Frame (MRF) Methode bewegt sich das Berechnungsgitter im Bereich der Propellergeometrie nicht mit. Stattdessen wird ein Quellterm zur Impulsgleichung addiert, der zusätzlichen Korioliskräfte durch die Propellerrotation mit berücksichtigt. Bei der SI Methode wird das Berechnungsgitter im Bereich um den Propeller in jedem Zeitschritt entsprechend der Rotationsrate bewegt. Aus der Gitterbewegung ergeben sich direkt die Kräfte und Momente auf den Propeller. An der Trennfläche zwischen dem rotierenden Teil und dem statischen Teil werden die Strömungsvariablen interpoliert.

Der Berechnungsaufwand ist bei der SI-Methode durch Gitterbewegung und Interpolation aufwändiger als bei der MRF-Methode, die Ergebnisse aber genauer, da die Physik direkt abgebildet wird und nicht durch ein Modell angenähert. Da für Simulationen besonders in irregulärem Seegang der Berechnungsaufwand von RANSE Berechnungen aber für viele industrielle Anwendungen immer noch sehr hoch ist, wurde untersucht, ob mit der MRF-Methode ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können bei entsprechend reduziertem Aufwand.

Der Testfall war ein typisches 8000 TEU Container Schiff. Für diesen Fall gab es Ergebnisse aus Propellerfreifahrts-, Widerstands- und Propulsionsversuchen. Abb. 16 zeigt die Ergebnisse aus den Simulationen des Propellerfreifahrtversuchs für unterschiedliche Gitterfeinheiten. In Abb. 15 sind die Ergebnisse auf dem feinsten Gitter für den Schub- und Momentenbeiwert  $K_T$  und  $10K_Q$  und den Propellerwirkungsgrad  $\eta_0$  über die Fortschrittsziffer  $J$  aufgetragen. Die Ergebnisse für die MRF-Methode zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Modellversuchen. Eine Fortschrittsziffer wurde außerdem mit der SI-Methode gerechnet. Der Unterschied zwischen den Methoden lag dabei unter 0,5%.

Die Berechnungen zur Untersuchung der Propeller-Schiffs Wechselwirkungen wurden zuerst ohne Berücksichtigung der freien Oberfläche in einer Einphasenströmung durchgeführt. Der Propeller wurde mit einer konstanten Drehrate rotiert. Der Einfluss folgender Parameter wurde untersucht: Die Po-

sition des Propellers relativ zum inhomogenen Nachstromfeld (insgesamt vier Propellerpositionen in  $15^\circ$  Schritten), die Größe des MRF-Bereichs, in dem Quellterme berücksichtigt wurden (2 Größen) und die Zeitschrittgröße der SI-Berechnungen (5 Zeitschrittweiten).

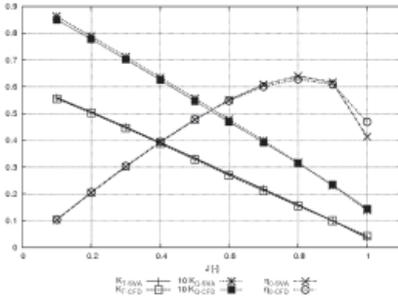


Abb. 15:  $KT$ ,  $10 KQ$  und  $\eta Q$  vs. Fortschrittsziffer  $J$ ; Index:  $SVA =$  Modellversuche; Index  $CFD =$  MRF-Methode

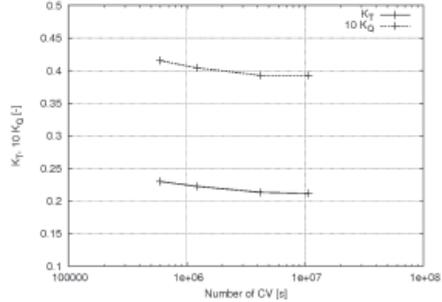


Abb. 16: Einfluss der Gittergröße auf  $KT$  und  $KQ$

Eine Variation der Propellerposition zeigte nur einen geringen Unterschied im Schub. Durch den kleineren MRF-Bereich verschieben sich die Ergebnisse deutlich hin zu den Ergebnissen der SI-Simulation. Eine Reduzierung des Zeitschritts zeigte eine klare Konvergenz der SI-Rechnungen.

Abb. 17 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung in einer Ebene Mitte Schiff und die Druckverteilung auf dem Rumpf und Propeller für die Berechnungen mit zwei verschiedenen MRF-Bereichen und der SI-Methode. Hier ist ein deutlicher Einfluss der Größe des MRF-Bereichs zu erkennen und die Geschwindigkeitsverteilung hinter dem Propeller zeigt klare Unterschiede verglichen zur SI-Methode. Daher wurde in den nachfolgenden Simulationen nur die SI-Methode verwendet.

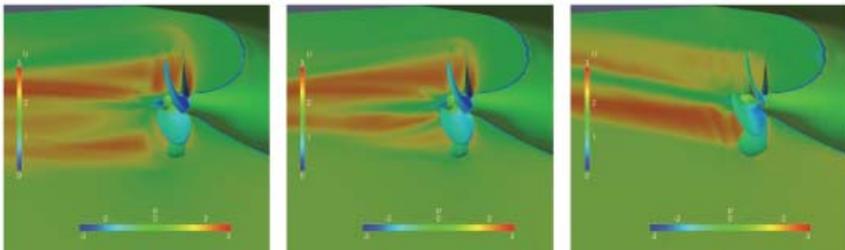


Abb. 17: Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche und Geschwindigkeitsverteilung in der Mittschiffsebene, MRF Position 1 (links), kleine MRF-Zone (Mitte), und SI (rechts)

Auf Basis der Voruntersuchungen wurden umfangreiche Validierungsrechnungen der weiterentwickelten Verfahren in regel- und unregelmäßigen Wellen durchgeführt. Neben der geometrischen Modellierung des Propellers wurde zum einen eine konstante Kraft vorgegeben, zum anderen die Geschwindigkeit konstant gehalten, d.h. die Bewegung in Schiffslängsrichtung unterdrückt. Vor allem zwischen geometrischer Modellierung des Propellers und Vorgabe einer konstanten Propulsionskraft zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede im Bewegungsverhalten.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Die genaue Messung von Schiffsbewegungen und Schiffsverformungen sowie des herrschenden Seegangs über einen längeren Zeitraum ist die Voraussetzung für die Erfassung von gefährlichen Situationen von Schiffen in schwerer See, sowie für die Validierung von neuen numerischen Simulationstechniken, die in der Lage sein sollen, solche Situationen mit großen Schiffsantworten vorherzusagen.

Im Rahmen dieses Vorhabens konnte eine neue Technik zur Langzeitmessung der Schiffsbewegungen im Seegang eingeführt und in der Großausführung erprobt werden.

Zur Validierung der vom Germanischen Lloyd und der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt weiter entwickelten RANSE-Methoden wurden computergesteuerte deterministische Seegangsversuche durchgeführt.

Mit den ausgewählten Beispielen wurde gezeigt, dass im Bereich RANSE Simulation großer Bewegungen in natürlichen Seegängen erhebliche Verbesserungen erzielt worden sind.

Dadurch kann schon im Entwurfsstadium neuer Schiffen ein Beitrag zur Verbesserung der Schiffssicherheit geleistet werden.

## 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

