



Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik

Tagungsband der Statustagung 2011

Schriftenreihe Projektträger Jülich

Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik

Tagungsband der Statustagung 2011

Schriftenreihe Projektträger Jülich

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 gefördert.

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
Internet www.fz-juelich.de/zb

Satz und Layout

Projekträger Jülich

Druck

Grafische Medien
Forschungszentrum Jülich GmbH

Schriftenreihe Projekträger Jülich

ISBN 978-3-89336-745-0

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JUWEL)
unter 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

GeneSim – Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation 7

Dirk Steinhauer, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Michael Hübler, Lars Wagner, Eric Esins, Center of Maritime Technologies, Philipp Pester, Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG, Axel Friedewald und Robert Wandt, Technische Universität Hamburg-Harburg

Ultraleichte Raumzelle – Entwicklung von ultraleichten Großstrukturen in Faserverbund- und Hybrid-bauweise für den Schiffbau 25

Dirk Büchler, Thomas Elsen, BaltiCo GmbH, Nikolai Glück, Fraunhofer AGP, Manfred Sier, WIS GmbH, Siegfried Bludszuweit, MET GmbH

HAI-Tech – Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme 47

Sascha Buchbach, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Heinrich Kordy, Fraunhofer IFAM; Herr Christian Johannsen, HSVA Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH; Herr Andreas Hesse, Fahrion Engineering GmbH & Co. KG; Herr Dr. Wolfgang Sichermann, Blohm + Voss Naval GmbH

HYDROS – Lastgesteuerte hydrostatisch-hydrodynamische Radialgleitlager für Pod-Antriebe 63

Dipl.-Ing. P. von Bergen, Blohm + Voss Industries GmbH, Dr. L. Knippschild, Prof. Dr.-Ing. habil. K. Brökel, Universität Rostock, Dr.-Ing. R. Wegmann, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach, TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. J. Weber, TU Dresden, Dipl.-Ing. S. Gold, TU Dresden, Institut für Fluidtechnik

CFK Prop 6m – Entwicklung von Konstruktions-, Simulations- und Prüfverfahren für 3-D verstärkte CFK-Propellerstrukturen bis 6 m Durchmesser 75

Hannes Kröger, Voith Advanced Propeller Technologies GmbH & Co KG, Siegfried Bludszuweit, Werner Fröhlingsdorf, MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Olaf Grewe, Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik, Steffen Bartke, Christian Kliewe, Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau

HYDROFERT – Auswirkungen fertigungsbedingten Oberflächenimperfectionen auf das hydrodynamische Verhalten ausgewählter Schiffsstrukturen 91

Dr. Uwe Hollenbach, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

OFF-DESIGN – Hydrodynamische Berechnungsmethoden für Propulsions- und Manövrierorgane im Off-Design 105

T. Stoye, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft; M. Richter, EUB; T. Lücke, H. Streckwall, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

Vorhaben ROT – Robots in Tanks 119

Leif Christensen*, Thomas Vögele*, Frank Kirchner*, Niklas Fischer**, Reinhard Ahlers**, Thomas Witolla***, Lars-Erik Etzold***, George Psarros****

(* DFKI GmbH - Robotics Innovation Center, ** Balance TC GmbH, *** MEYER WERFT GmbH, **** Det Norske Veritas (Norwegen))

PropSeas – Propulsion in Seaways 141

M. Abdel-Maksoud¹, J. Dohmen², M. Greve¹, E. van Heumen², K. Hitzbleck², K. Koushan³, W. Menzel⁴, B. el Moctar², T. Rung¹, K. Woekner-Kluwe¹

(¹ TUHH, ²UDE, ³ MARINTEK Coordinator, ⁴ GL)

AGaPaS – Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See 159

H. Kucharzewski, J. Burg (MarineSoft, Rostock); G.F. Clauss, A. Kauffeldt, N. Otten (Technische Universität Berlin, Schiffs- und Meerestechnik); D. Sedlacek, U. Fielitz (Institut für Sicherheitstechnik und Schiffsicherheit e.V., Rostock); R. Bronsart, T. Buch, M. Haase, E. Ihde, A. Krüger, M. Kurowski, B.P. Lampe, S. Neubert, R. Stoll, M. Wulff (Universität Rostock); W. Sichermann, T. Richard (Blohm + Voss Naval, Hamburg)

MPT – Mehrphasenfördersysteme und -anlagentechnik für Kohlenwasserstoffe in Offshore und Onshore – Deutsch-Russische F&E-Kooperation 195

Mark Reichwage, Gerhard Rohlfing, Jens-Uwe Brandt, Jörg Lewerenz, Marco Bredemeier (Joh. Heinr. Bornemann GmbH)

Submarine Gashydrat-Lagerstätten: Erdgasproduktion und CO₂-Speicherung (SUGAR) 211

Prof. Dr. Ing. K. Wallmann und den Mitgliedern des SUGAR-Konsortiums

GeneSim – Generisches Daten- und Modellmanagement für die schiffbauliche Produktionssimulation

Dirk Steinhauer, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG Michael Hübler, Lars Wagner, Eric Esins, Center of Maritime Technologies Philipp Pester, Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG Axel Friedewald und Robert Wandt, Technische Universität Hamburg-Harburg

1. Einleitung

Der simulationsunterstützten Planung und Steuerung kommt besonders im Schiffbau als Produktion von Unikaten eine besondere Bedeutung zu. Die Komplexität in den Abhängigkeiten zwischen dem Produkt mit der enormen Teilevielfalt, den vielfältigen und aufwendigen Produktionsprozessen und dem Ressourcengefüge auf einer Werft bzw. bei den Zulieferern machen simulationsbasierte Planungswerkzeuge unabdingbar. Simulation als Unterstützungswerkzeug für die Planung ermöglicht eine vorausschauende Bewertung von Alternativen zur Produktivitätssteigerung unter Berücksichtigung aller relevanten Abhängigkeiten sowie eine Erhöhung der Planungssicherheit.

Der Simulationseinsatz in der Produktionsplanung setzt zum einen ein Simulationsmodell bzw. Werkzeuge zur effizienten Modellierung und zum anderen die Integration des Modells in eine Umgebung zum durchgängigem Management von Eingangsdaten und zur anwenderorientierten Ergebnisdarstellung voraus. Das Simulationsmodell beinhaltet die Werftressourcen, Produktionsrandbedingungen und Funktionalitäten zum Ausführen der Produktionsprozesse. Die Eingangsdaten enthalten die den Produktionsablauf beeinflussenden Daten zum Produkt, zur Planung, zur Baumethode und zu den variablen Ressourcen sowie die Prozessparameter, wie z.B. die von Produkteigenschaften abhängigen Zeiten und Geschwindigkeiten.

Durch die Verwendung von Simulationsbausteinkästen wie dem STS (Simulation Toolkit Shipbuilding), der inzwischen nicht nur im Schiffbau sondern auch in anderen Branchen wie dem Bauwesen eingesetzt wird, ist die Modellierung von schiffbaulichen Produktionsabläufen mit akzeptablem Aufwand möglich [5]. Eine Bibliothek vordefinierter und parametrierbarer Simulationsfunktionalitäten steht hier zur Verfügung, mit deren Hilfe Simulationsmodelle von schiffbaulichen Produktionsabläufen effektiv und effizient aufgebaut werden können.

Im Gegensatz zur Modellierung existierten hinsichtlich der Eingangsdaten bzw. deren Management sowie hinsichtlich der Simulationsergebnisse bisher auf einzelnen Werften nur Einzellösungen, die auf spezifischen Anwendungsfällen basieren und nur Teilaspekte abdecken. Diese Einzellösungen sind aufgrund der Heterogenität der Anforderungen von den Werften nicht direkt übertragbar auf anderen Unternehmen.

Das Fehlen eines durchgängigen Datenmanagements ist derzeit das größte Hindernis für Werften, die Simulation in der Produktionsplanung einzusetzen. Bei den Werften hingegen, die schon Teillösungen im Einsatz haben, kann die Simulation nicht mit ausreichender Effektivität und Effizienz eingesetzt werden und damit nicht das volle Potenzial entfalten. Die Arbeit an dieser Problemstellung war in der internationalen Kooperationsgemeinschaft SimCoMar (Simulation Cooperation in the Maritime Industries, www.SimCoMar.com) als das Hauptaufgabengebiet für die zukünftige Entwicklung definiert worden. Im Oktober 2009 startete dann das vom BMWi mit dem Förderkennzeichen 03SX219 geförderte und auf zwei Jahre angelegte Verbundvorhaben GeneSim (www.genesim.de) [4].

2. Ziele und Struktur des Vorhabens GeneSim

Im Vorhaben GeneSim sollten die Produktivität sowie die Planungssicherheit in der schiffbaulichen Produktion verbessert werden, indem das unterstützende Planungswerkzeug der Produktionssimulation verbessert und die möglichen Aufgabengebiete auf bisher nicht berücksichtigte Felder ausgeweitet werden. Zusätzlich war eine im Schiffbau allgemeine Verwendbarkeit der zu erforschenden Konzepte sicherzustellen.

Zum Verbundvorhaben GeneSim hatte sich ein Konsortium konstituiert, welches nicht nur ein breites Spektrum an schiffbaulichen Produkten repräsentiert sondern auch Erfahrungen aus unterschiedlichen Simulationsanwendungen und wissenschaftliche Unterstützung kombiniert:

- Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG (FSG)
- Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG (FLW)
- Howaldtswerke Deutsche-Werft GmbH & Co. KG (HDW)
- Center of Maritime Technologies e.V. (CMT)
- Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Produktionsmanagement und –technik (TUHH)

Die Projektpartner hatten sich im Verbundprojekt GeneSim folgende Teilziele gesetzt:

1. Erweiterung des Simulationseinsatzes in Produktionsplanung und -steuerung
 - a. Systematische Bewertung von alternativen Planungsszenarien hinsichtlich Ergebnis, Robustheit und anderer Kriterien
 - b. Simulation unter Unsicherheiten durch Vervollständigung der Daten mittels verschiedener Szenarien
 - c. Wiederverwendung von Simulationsszenarien
2. Steigerung der Effektivität und Effizienz des Simulationseinsatzes
 - a. Systematisches Daten- und Modellmanagement
 - b. Verringerung des Aufwands bei Datenbeschaffung, Validierung und Verifikation
3. Beschleunigung des Einstiegs für neue Simulationsanwender der maritimen Industrie (Werften und Zulieferer)

Weil alle Partner zu den Nutzern des STS (Simulation Toolkit Shipbuilding) gehören, konnte im Vorhaben GeneSim auf einen gemeinsamen Softwarestandard auf der Simulationsmodellseite aufgebaut werden.

In GeneSim wurde zunächst eine gemeinsame Datenstruktur entwickelt, welche dann als Basis für die Entwicklung von Methoden zur Datenbeschaffung, zur Validierung und Verifikation sowie zur Auswertung von Simulationsergebnissen diente. Des Weiteren wurden Konzepte zur Daten und Modellverwaltung entwickelt und die Szenariotechnik adaptiert. Der schematische Arbeitsplan ist in Abbildung 1 dargestellt.

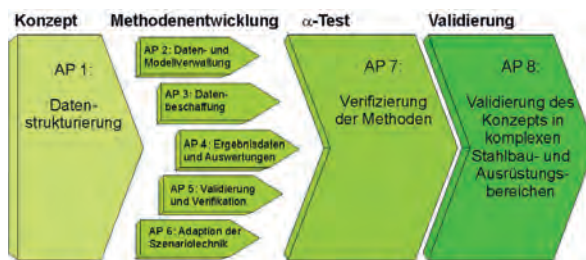


Abbildung 1: Schematischer Arbeitsplan des Verbundvorhabens GeneSim

3. Die GeneSim Datenstruktur

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer generischen Datenstruktur für die schiffbauliche Produktionssimulation, die allen Unternehmen der maritimen Industrie zur Verfügung steht und den Aufbau der Simulationsdatenbasis erleichtert. Zusätzlich sollten Konzepte für eine z. B. im Rahmen der SimCoMar-Gemeinschaft unterstützte Verbreitung und Aktualisierung der Datenstruktur definiert werden.

Analysiert wurde auch die Möglichkeit, Daten aus den unterschiedlichen Softwaresystemen des Unternehmens zu verknüpfen und direkt an die Simulation zu übergeben. Diese Herangehensweise wurde aber verworfen, u. a. weil unter Umständen benötigte Daten bei einigen Werften gar nicht elektronisch vorgehalten werden, die Nachvollziehbarkeit von Simulationsdaten nicht gewährleistet werden kann und weil die Generierung von noch nicht vorhandenen oder unvollständigen Daten in den Softwaresystemen oft nicht möglich oder nicht sinnvoll ist.

Grundlage für die Definition der Datenstruktur war die Sammlung von Anforderungen aus den unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Simulation bei den Vorhabenspartnern. Dazu wurde eine Reihe von Workshops durchgeführt, denen die Bereiche Stahlbau, Schiffsausrüstung und Einrichtung von Passagierbereichen intensiv im Hinblick auf die erforderlichen Daten gemeinsam analysiert wurden. Diese Daten wurden dann in eine Struktur gebracht, welche im Folgenden in einem iterativen Prozess verschlankt und aggregiert wurde.

Die Beschreibung der Datenstruktur wurde unabhängig von einem Datenbankwerkzeug vorgenommen. Weil schon bei den beteiligten Partnern unterschiedliche Werkzeuge im Einsatz sind und die Allgemeingültigkeit gewahrt bleiben sollte, wurde die Struktur als Entity-Relationship-Modell entwickelt. Für diese Modellierung wurde ein Handbuchs für Modellierungskonventionen entwickelt, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Datenstruktur beinhaltet und verknüpft u.a. die Daten

- zum Produkt bzw. seinen Elementen und seinen teilweise hierarchischen Strukturen (Montagehierarchie, Systemhierarchie, räumliche Struktur und Topologie),
- zu den Ressourcen,
- zu den Prozessen (Detailprozesse und Prozessvorlagen),

- Zur Verifikation der entwickelten Ansätze wurde aus der GeneSim-Struktur eine Datenbank in MySQL aufgesetzt (Abbildung 2).

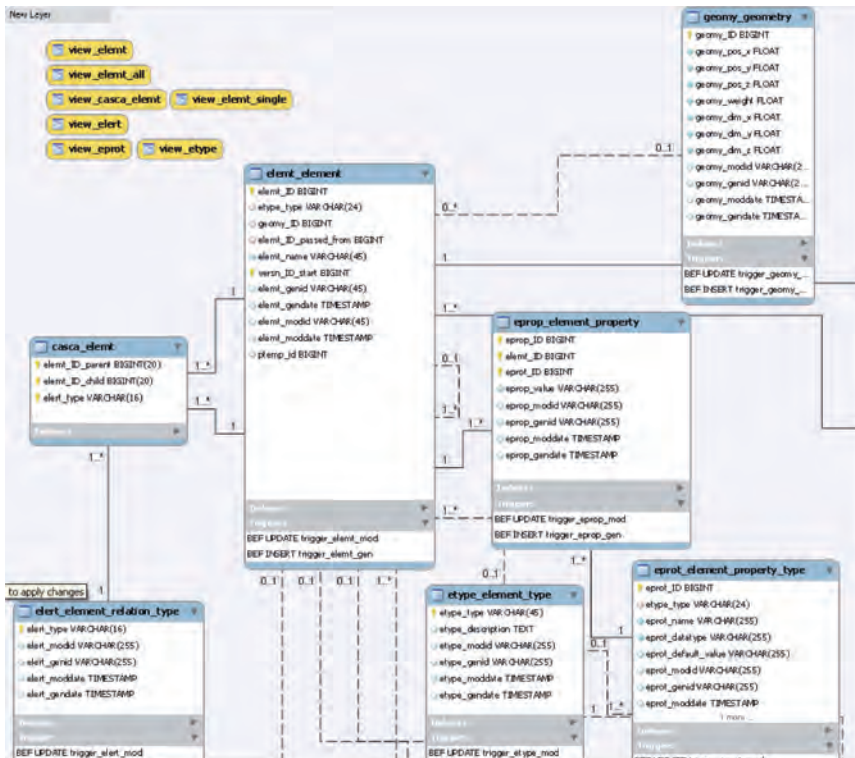


Abbildung 2: Ausschnitt aus dem ER-Modell der Datenstruktur

4. Daten- und Modellverwaltung

In GeneSim wurden ein Konzept zur Daten- und Modellverwaltung entwickelt, welches die Wiederverwendung von Daten und Modellen für die Produktionssimulation ermöglicht und so den simulationsbasierten Planungsprozess vereinfacht. Wesentliche Anforderungen an die Daten- und Modellverwaltung waren u. a. die Nachvollziehbarkeit von Simulationsergebnissen und die Analysemöglichkeit von Änderungen in den Daten.

4.1 Konzept für die Modellverwaltung

Die Voraussetzungen für eine vereinfachte Modellverwaltung sind identifizierende Modellattribute und ein modularer Aufbau der Modelle. Daher wurden in Projektworkshops Simulationsmodelle klassifiziert und Attribute zur Verwaltung von Simulationsmodellen definiert. Die Ergebnisse wurden in die bestehende GeneSim-Datenstruktur implementiert, um mitarbeiterunabhängig Modelle zu archivieren und finden zu können.

Neben den identifizierenden Modellattributen wurden erste Ansätze zur Generierung von Modellen aus definierten Modulen betrachtet. Hierbei werden Simulationsmodule für unterschiedliche Modellbestandteile archiviert und können mittels eines Modellgenerators zu einem Gesamtmodell integriert werden (siehe auch Szenariotechnik).

4.2 Konzepte zur Datenverwaltung

Für den planungsbegleitenden Simulationseinsatz im Schiffbau muss die Datenverwaltung folgende Funktionen bieten:

- Standardisierung der Systemschnittstelle für den Datenzugriff
- Versionierung der Daten zur Nachverfolgbarkeit von Änderungen
- Szenariobasierte Datenverwaltung

Um den einheitlichen und effizienten Zugriff auf das zu entwickelnde Datenbanksystem unabhängig von der Datenbanksoftware, mit der es umgesetzt wird, zu ermöglichen, wurde ein Data-Warehouse-Konzept adaptiert. Schnittstellen für einen standardisierten Zugriff auf ein Ablagesystem zur Datenhaltung und Archivierung wurden definiert. Die Übersicht über das System zum Datenmanagement ist in Abbildung 3 dargestellt.

Als Umsetzungslösung für eine API (Application Programming Interface) wurde der Zugriff über SQL Befehle gewählt. Sogenannte „Stored Procedures“ in Kombination mit vordefinierten Abfragen („Views“) ermöglichten aber den Aufbau einer API, die die gestellten Anforderungen erfüllte. Ein derartiges Konzept ermöglicht Systeme, bei denen das Datenbanksystem durch ein nach einem vollständig anderen Prinzip arbeitendes Datenbanksystem ersetzt werden kann, ohne dass Änderungen an der zugreifenden Software notwendig werden. Dadurch ist es möglich das Datenbanksystem zu verändern und weiterzuentwickeln, ohne die zugreifenden Applikationen austauschen zu müssen.

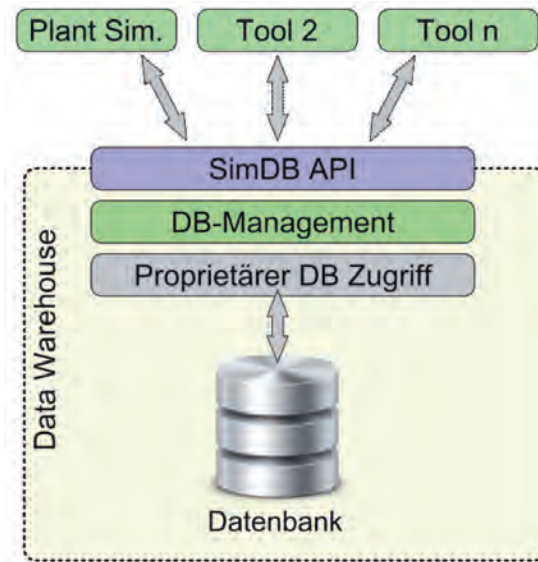


Abbildung 3: Übersicht über das System zum Datenmanagement

Die Versionierung eines Datensystems muss widersprechende Ziele erreichen. Zum einen soll das System die Wiederherstellung aller vorhergehenden Datenstände ermöglichen und dadurch die Verwaltung der detaillierten Datenversionen vereinfachen. Zum anderen ist ein möglichst geringer Speicherbedarf und eine performante Systemleistung bei der Verarbeitung der Daten erforderlich. Als Lösungsansatz wählten die Projektpartner daher die hierarchische Versionierung auf Datensatzebene, bei der durch die Datenmodellentitäten vorgegebene Datensätze versioniert werden und bei Änderungen als neuer Datensatz angelegt und verwaltet werden.

Aus den Aufgaben für das Simulationsmodell ergab sich die Anforderung der eindeutigen Zuordnung von Simulationseingangsdaten zu Simulationsergebnis- bzw. Simulationsergebnisdaten und dem verwendeten Simulationsmodell. Da alle involvierten Daten sich im laufenden Betrieb aber permanent in der Weiterentwicklung befinden, ist der Einsatz eines Systems zur szenariobasierten Datenverwaltung notwendig. Dieses System ermöglicht das Binden eindeutig identifizierbarer Daten durch eine Szenario-Identifikationsnummer zueinander. Das Szenario entspricht dabei einem Ordner, der alle für die Simulation relevanten Daten und Modelle beinhaltet. Das szenariobasierte Konzept erläutert der Abschnitt Szenariotechnik.

4.3 Demonstrator der Daten- und Modellverwaltung

Das GeneSim-Konzept zur Daten- und Modellverwaltung wurde anhand eines Demonstrators (siehe Abbildung 4) nachvollzogen und evaluiert. Der Demonstrator ist eine Software-Oberfläche für die GeneSim-Datenmanagement-API, mit der Datensätze erzeugt, angelegt, kopiert und archiviert werden können. Die Versionierung ist als Funktion der API integriert.

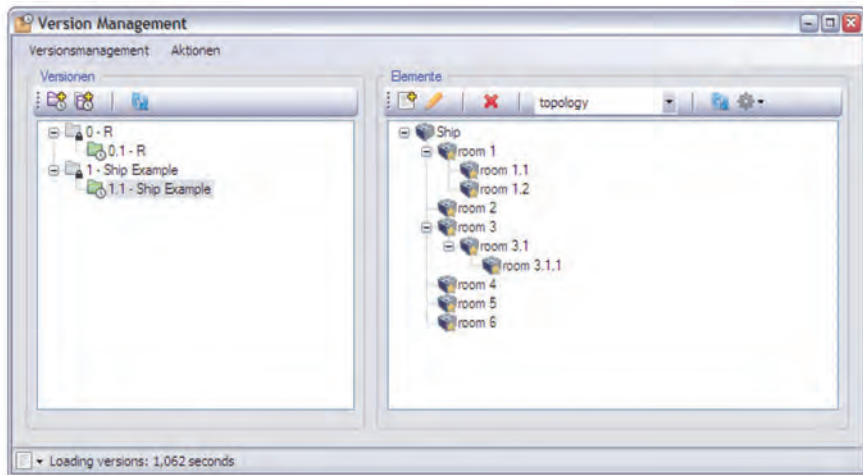


Abbildung 4: Versionsmanagement im Demonstrator „Simulation Tool“

5. Konzepte zur Datenbeschaffung

Eine wesentliche Aufgabe des Datenmanagements ist das Füllen der Datenstruktur mit den entsprechend der Simulationsaufgabe relevanten Daten. Die Datenbasis für die Simulation liegt allerdings in den meisten Unternehmen verteilt über die verschiedenen EDV-Systeme zur Auftragsabwicklung (ERP, BDE, PDM u.a.) in unterschiedlichen Formaten vor. Im Schiffbau wird die Auftragsabwicklung durch die Parallelisierung der Produktentwicklung zur Produktionsplanung geprägt. Diese Besonderheit der Schiffbauindustrie resultiert in vielfältigen Anforderungen an die EDV-Systeme und führt damit zu einer heterogenen Zusammensetzung der EDV-Systeme in jedem Schiffbauunternehmen.

Das Ziel des Arbeitspakets war die Gewährleistung der Datenversorgung in allen Planungsphasen des Schiffbaus sowie die Möglichkeit zur Verringerung des Aufwands für die Simulationsdatenaufbereitung und -generierung.

Zunächst wurden die unterschiedlichen Datenflüsse im Umfeld der Simulation bei den Partnerunternehmen analysiert. Daraus konnte eine Strukturierung der Datenquellen für die Simulation abgeleitet werden. Für diese einzelnen Datenquellen sind dann Importstrategien entwickelt worden, um die vorhandenen Daten in die Simulationsdatenstruktur zu importieren und die Daten unterschiedlicher Quellen zu verknüpfen.

Weil aber oft die relevanten Simulationseingangsdaten in den Systemen der Werft nicht oder nur unvollständig vorhanden sind, wurden auch Konzepte zur Datengenerierung entwickelt. Diese Datengenerierung soll auf den bekannten Daten aufsetzen und sie extrapolieren, Vergleichsprodukte heranziehen und modifizieren oder Benutzervorgaben in Simulationsdaten umsetzen.

Zur Umsetzung der Datengeneratoren wurde anschließend ein auf dem xml-Format basierender, flexibel anwendbarer Softwaremechanismus entwickelt und in einem Demonstrator umgesetzt. Hier können für ausgewählte Anwendungsfälle Produktbeschreibungen durch den Benutzer spezifiziert werden, welche anschließend in relevante Simulationsdaten übertragen und in die Datenbank gespeichert werden.

6. Ergebnisdaten und Auswertungen

Im Forschungsvorhaben GeneSim bestand eine wesentliche Aufgabe in der Betrachtung der Auswertungen von Simulationsergebnisdaten in Bezug auf die schiffbauliche Produktionsplanung. Dazu wurden zunächst die Anforderungen aus den einzelnen Anwendungsfeldern bei den Partnerwerften gesammelt und analysiert.

Allgemeine Anforderungen an die Auswertung sind zum einem simulationslaufübergreifende Vergleichsbetrachtungen mit Hilfe von generierbaren Templates mit modularen Auswerteansichten, bspw. verschiedene Diagramme, Tabellen etc. auf einer Übersichtsseite. Ebenso müssen die Simulationslaufeigenschaften bzw. die Simulationslaufbeschreibung im Auswertungsmodul verwaltet und in den Auswertungsbericht übernommen werden.

Auf Basis der Module wurden standardisierte Auswertungsmodule konzipiert. Mit Hilfe eines modularen Konzeptes wird die aufgaben- oder nutzerspezifische Zusammenstellung von Auswertungen ermöglicht. Zusätzlich steigert und sichert die strukturierte Ablage der Ergebnisdaten die Entscheidungstransparenz. Ein besonderes Kriterium war hier auch die direkte Vergleich- und Nachvollziehbarkeit der simulierten Planungen.

Für jedes Auswertungsmodul gibt es je nach Betrachtung des Simulationsergebnisses verschiedene Anforderungen. Hierzu wurden Darstellungsmöglichkeiten vorgesehen wie Gantt-Diagramme zur Darstellung von Prozessschritten nach Elementen und Ressourcen über der Zeitachse mit verschiedenen Filterfunktionen sowie Möglichkeiten der Aggregation. Auch eine möglichen Farbvarianz (u.U. Farbverlauf) nach Terminverzug, Ressourceneinsatz oder Kostenvergleich hilft bei der schnellen Interpretation der Simulationsergebnisse.

Im Funktionsumfang der Auswertungen für Ressourcenauslastungen sind Filtereinstellungen sowie die Aggregation nach Qualifikation, Organisationseinheit mit frei wählbarem Betrachtungszeitraum vorgesehen. Die spezifizierten Statistikfunktionen enthalten allgemeine Funktionen wie Mittelwert, Standardabweichung, aber auch Teile- sowie Prozessstatistiken zur Ermittlung von Start-, Endterminen sowie möglichen Unterbrechungen.

Die graphischen Auswertungen beschränken sich dabei je nach Anwendungsfall nicht nur auf Diagramme. Auch die Möglichkeit der Einbindung von visuellen Darstellungen in Form von Sankey-Diagrammen, Screenshots, Filmen oder sogar 3D-Ansichten kann für Aufgaben der schiffbaulichen Produktionsplanung wichtig sein.

7. Validierung und Verifikation

Die Validierung und Verifikation von Daten und Modellen sind aufwendige und kaum standardisierbare Prozesse, die notwendig sind, um die Qualität der Simulationsanwendung sicherzustellen [2]. Im Rahmen von GeneSim wurden die wesentlichen Aspekte der Validierung und Verifikation im simulationsbasierten Planungsablauf ermittelt und Konzepte zur Integration von standardisierten Vorgehensweisen entwickelt.

Zunächst wurden im Rahmen von Workshops die Kriterien für Datenvalidität ermittelt und strukturiert. Auf Basis dieser Analyse wurden Methoden zur Prüfung der Validität entworfen. Dabei zeigte sich eine sehr große Heterogenität in den Anforderungen.

Auch Methoden zur datentechnischen Unterstützung der Modellverifizierung wurden in GeneSim entwickelt. Als Basis dafür wurden Modellierungs- und Anwendungsfehler klassifiziert und deren Entdeckungsmöglichkeiten anhand der Ergebnisdaten analysiert.

Das Datenmanagement kann auch die Modellvalidierung entscheidend unterstützen, in dem es für die einzelnen Anwendungsfälle geeignete Ver-

gleichsmöglichkeiten von Simulationslaufdaten mit dem Produktionsstatus vorsieht. Auch für diese Fragestellungen sind in GeneSim Methoden entwickelt worden, welche auf Basis unterschiedlicher Kriterien zur Modellvalidität Funktionen zur Analyse der Simulationsergebnisdaten vorsehen.

8. Szenariotechnik

Unsicherheiten im Produktentstehungsprozess führen zu Abweichungen vom geplanten Prozess. Das Ziel einer robusten Planung kann durch eine Variation des Planungsszenarios erreicht werden. Klassische Stellgrößen dazu sind die personellen und materiellen Ressourcen, die Belastungen und die Auftrags- bzw. Arbeitsgangfolgen. Werden die Kernelemente eines Simulationsszenarios (Simulationsdaten, Auswertungen und Simulationsmodell, Abbildung 5) im Hinblick auf die unterschiedlichen betrieblichen Fragestellungen untersucht, werden Variationsbedarfe zum einen für das Modell und zum anderen für Datenquellen und Datengenauigkeit deutlich.

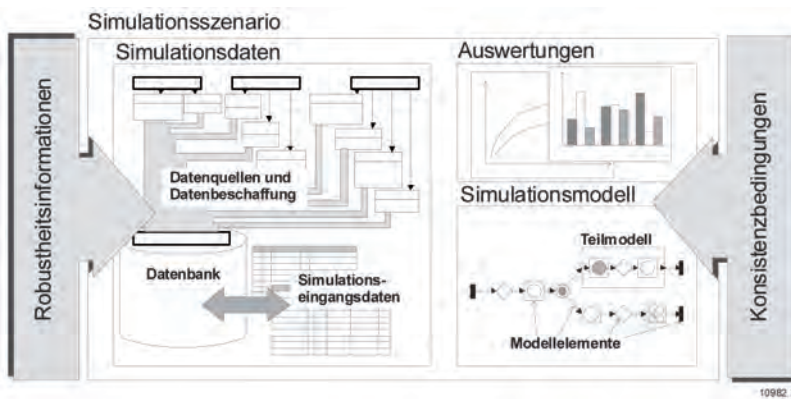


Abbildung 5: Simulationsszenario [1]

Der im Rahmen des Verbundprojekts GeneSim gefundene Lösungsansatz besteht in einer Erweiterung des Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) um ein Auswahl- und Anpassungsverfahren mit Hilfe von sog. Modell- und Funktionsaspekten. Die Modellaspekte beschreiben die Struktur, d.h. die Zusammensetzung des Moduls aus seinen einzelnen Komponenten und deren Veränderung auf der Grundlage vordefinierter Modellvarianten bzw. Methoden-, Schnittstellen- oder Wertvarianten. Dies ermöglicht die Entwicklung von Simulationsbausteinen auf der Basis einer durchgängigen Beschreibungssystematik. Die ergänzenden Funktionsaspekte bestimmen die Arbeitsweise des Moduls durch eine gezielte Ansteuerung von implementierten alternativen Simulationsalgorithmen, also ein Feintuning der Module.

Zum diesem Zweck wurde ein Modellierungsansatz gewählt, bei dem ein Simulationsszenario über den Erstellungsvorgang modelliert und konfiguriert werden kann. Dazu dienen Konfigurationsregeln, die ein der Spezifikation entsprechendes, fehlerfreies Simulationsszenario zusammenstellen. Voraussetzung ist eine Abbildung der Datenstruktur bzw. der Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellelementen, um die Konsistenz des Simulationsszenarios programmbasiert untersuchen zu können. Sowohl für den Simulationsexperten als auch für den Anwender wird so eine kongruente, problemorientierte Konfiguration unter Einschluss von Varianten möglich.

Um die Auswahl der benötigten Bausteine und Module übersichtlich zu gestalten, werden die zu modellierenden Szenarien und die Simulationskomponenten über Deskriptoren systematisiert. Die Szenariendesriptoren bestehen u. a. aus der Modellbezeichnung, Eckdaten der Datenbasis sowie den möglichen Einflussgrößen und Annahmen bei der Szenariobildung. Die Deskriptoren der Module und Bausteine umfassen die genannten Modell- und Funktionsaspekte, insbesondere die Schnittstellenbeschreibung. Ausgehend von der Aufgabe des Bausteins sind hierfür sowohl die materialflussbeschreibenden Kriterien zur physischen Bewegung von Simulationsobjekten als auch die Informationsflüsse der logischen Abläufe zu berücksichtigen, damit nur Bausteine mit übereinstimmenden Übergabeparametern ausgewählt werden können.

9. Verifikation der Konzepte an Referenzszenarien

Die Überprüfung bzw. Verifizierung der Umsetzbarkeit des Daten- und Modellmanagementkonzepts wurde an Referenzszenarien vorgenommen. Hierzu wurden die Konzepte für folgende Anwendungsfälle untersucht:

- Schiffseinrichtung
- Schiffsausrüstung
- Stahlbau
- Zulieferintegration und Logistiknetzwerke

9.1 Schiffseinrichtung

Bei der FSG wurden Referenzszenarien im Bereich der Schiffseinrichtung definiert und untersucht. Diese Szenarien sind verschiedenen Passagierfährenprojekten entnommen worden.

Zunächst wurde analysiert, welche Daten zum Produkt und seiner Struktur, zu den Prozessen und zur Planung in den EDV-Systemen verfügbar sind und diese wurden mit den Anforderungen der Simulation abgeglichen. Die verfügbaren Daten wurden dann über die Schnittstellen, die schon für die existierende Simulationsdatenbank entwickelt wurden, in die GeneSim-Datenbank importiert und durch generierte und manuell erzeugte Daten ergänzt. Die Daten konnten dann auch z. B. mit dem VolumeEditor des Demonstrators visualisiert werden (Abbildung 6).

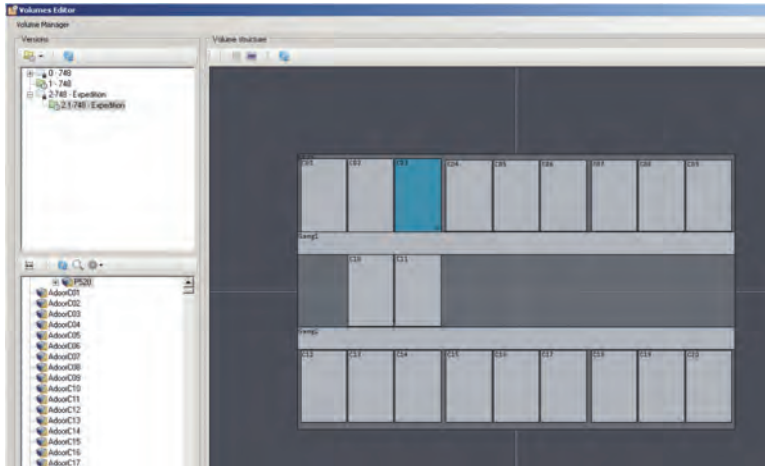


Abbildung 6: Visualisierung von Simulationsdaten zu einem Kabinenbereich einer Passagierfähre im VolumeEditor des Demonstrators „Simulation Tool“

Mit Hilfe der Produkt-, Prozess- und Planungsdaten konnte dann z. B. ein Simulationsmodell eines Kabinenbereichs für das betreffende Szenario generiert werden (Abbildung 7). Die im Szenario definierten Prozesse zum Innenausbau wurden dann im Simulationsmodell ausgeführt.

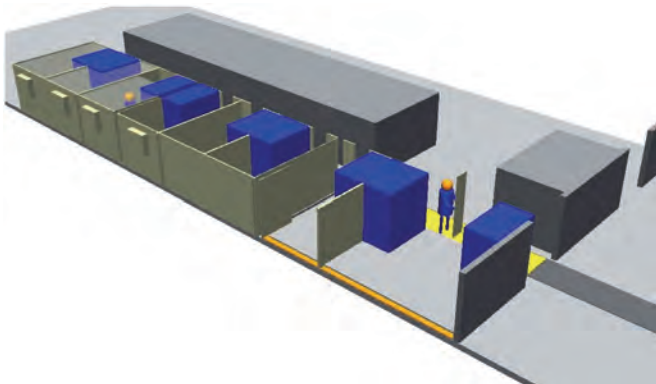


Abbildung 7: Simulationsmodell von Abläufen zum Innenausbau

Die Simulationsergebnisse wurden dann zurück in die GeneSim-Datenstruktur geschrieben und dem Szenario zugeordnet. Über die definierten Auswertemodule war eine Analyse des Simulationslaufes, z. B. die Engpassermittlung möglich.

9.2 Stahlbau

Bei der FLW wurden die entwickelten Konzepte im Bereich des Stahlbaus verifiziert. Dafür wurde u. a. ein Simulationsszenario zur Reihenfolgebestimmung definiert und analysiert.

Wie bei der üblichen Vorbereitung des Simulationslaufes bei einem Projektstart wurden für eine bekannte Einteilung der Stahlstruktur in Sektionen (FLW intern auch Sektionseinteilung genannt) die produktspezifischen Informationen aus Teamcenter in die GeneSim-Datenbank übernommen. Dabei wurden objektspezifische Attribute (Abmaße, Gewicht, Material, Typ wie Boden-sektion oder Maschinenraum) übertragen.

Im Simulationsszenario zur Reihenfolgebestimmung für die Montagefolge wurden die in der Datenbank abgelegten Daten dem Simulationsmodell zugeordnet. Diese Ausgangsdaten für die Simulation konnten nun vor dem Simulationslauf über eine Benutzeroberfläche nochmals angepasst bzw. fehlende Daten manuell nachgepflegt werden. Die im Simulationsmodell hinterlegten Regeln bildeten den schiffbaulichen Abarbeitungsprozess ab und konnten an Veränderungen manuell angepasst werden. Ebenso konnte eine Priorisierung der Reihenfolge, aber auch der Regeln erfolgen. Diese Manipulation wurde in einem Szenarioverwalter vorgenommen und reproduzierbar festgehalten.

Zur Ermittlung der optimalen Montagefolge unter den aktuell gegebenen Bedingungen wurden mehrere Simulationsszenarien mit unterschiedlichen Vorgaben in Bezug auf verfügbaren Zeitraum, Reihenfolgestart etc. durchgeführt. Das Ergebnis pro Simulationslauf wurde mit den vorgegebenen Einstellungen, Objekten und Regeln in der Datenbank abgelegt. Über eine Datenschnittstelle wurden diese Daten aus der Datenbank in ein vordefiniertes Auswertungsmodul geladen und zur Entscheidungshilfe ausgewertet.

9.3 Zulieferintegration und Logistik

Auf Grund des Leistungsumfanges ist die Lieferantenkoordination eine wichtige Aufgabe der Werft [3]. Die Varianz der Leistungen erzeugt wiederum die Forderung nach verschiedenen Integrationsarten. Diese müssen dem Komplexitätsgrad der Leistungserbringung entsprechen. Dazu sind drei Szenarien definiert worden: Termindefinition, Steuerung über Vorgabezeiträume sowie Integration mit variablem Detaillierungsgrad.

Termindefinitionen legen Vorgaben für die Lieferanten von Komponenten und Halbzeugen fest. Die im ERP-System vorliegenden Termine sind eine Input-Information für die Simulation. Anpassungen der Termine erhält die Simulation über einen aktualisierenden Datenimport. Veränderungen und ihre Auswirkungen sind nach dem Simulationsdurchlauf interpretierbar und können eine weitere Koordination bedingen.

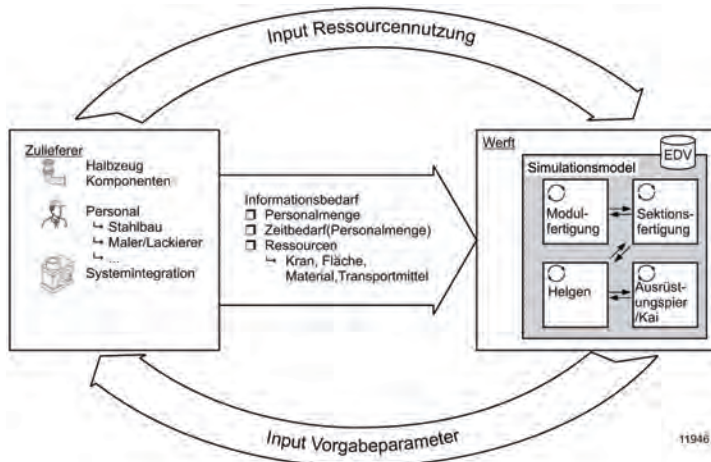


Abbildung 8: Informationsaustausch zwischen Lieferant und Werft

Die Steuerung über Vorgabezeiten setzt einen detaillierten Austausch von Informationen voraus, weshalb dieser Ansatz bei der Integration komplexer System anzuwenden ist (vgl. Abbildung 8). Der Lieferant definiert seine Personalkapazität sowie den Zeit- und Ressourcenbedarf. Die Simulation nutzt diese Informationen als Input und bestimmt das Bearbeitungszeitfester. Typisch ist eine weiterführende Koordination, wobei der große Informationsumfang eine höhere Flexibilität in der Termingestaltung ermöglicht. Der Datenaustausch findet über die Simulationsdatenbank oder das ERP-System statt. Maßgeblich ist hier, welche Informationen im ERP-System liegen und wie gut der Import in die Simulationsdatenbank zu realisieren ist.

Die Integration mit variablem Detaillierungsgrad setzt in frühen Phasen des Projektes nur die Definition von Terminen voraus. Mit diesen planen die Lieferanten die eigene Produktion und den frühesten Zeitpunkt für die Systemintegration. Sobald der Projektfortschritt eine detailliertere Simulation ermöglicht, nutzt das Simulationsmodell die zusätzlichen Informationen bezüglich Personal-, Zeit- und Ressourcenbedarf. Diese sind im ERP-System oder der Simulationsdatenbank vorzuhalten. Nach der Festlegung besteht zwischen Werft und Lieferanten immer noch eine gewisse Flexibilität, die von beiden für die Bedarfsanpassung nutzbar ist.

Für eine wirksame Implementierung der drei beschriebenen Szenarien ist einerseits klar zu regeln, wie die Kommunikation zwischen Werft und Lieferant zu erfolgen hat. Andererseits sind die Abläufe bei der Datenhandhabung zwischen ERP-System, Simulationsdatenbank und Simulationsmodell klar und zuverlässig zu regeln. In Kooperation mit der FSG ist dies für alle Integrationstypen exemplarisch untersucht und für Unterauftragnehmer aus den Bereichen Klimaanlage, Kommunikationstechnik und Innenausstattung validiert worden.

10. Fazit und Ausblick

In GeneSim wurde von den Projektpartnern eine universell nutzbare Datenstruktur für die schiffbauliche Produktionssimulation entwickelt. Auf Basis dieser Datenstruktur wurden Methoden zur Generierung von nicht vorhandenen bzw. unvollständigen Daten, zur Verifikation und Validierung von Modellen und Daten sowie zur Auswertung von Simulationsläufen definiert. Die Ansätze konnten an Referenzszenarien aus unterschiedlichen Bereichen der schiffbaulichen Produktion verifiziert werden.

Der in GeneSim entwickelte Ansatz findet inzwischen nicht mehr nur im Schiffbau seine Anwendung. Im Rahmen der Kooperation SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering, www.simo-fit.com) wird der Ansatz nun branchenübergreifend zusammen mit dem Bauwesen eingesetzt und weiterentwickelt. Die Datenstruktur wird heute auf einem Server der Ruhr-Universität Bochum verwaltet, welcher den SIMoFIT Partnern zur Verfügung steht. Die Datenstruktur wird nun kontinuierlich an neue Anforderungen angepasst. Die Änderungen werden in Absprache mit den Kooperationspartnern von unterschiedlichen Partnern vorgenommen.

Mit Hilfe der Datenstruktur lassen sich Datenanforderungen verschiedener Simulationsanwendungen nun schnell und effektiv definieren und kommunizieren. Unternehmen, welche die Simulation noch nicht einsetzen, finden hier die nötige Unterstützung für Simulationsprojekte bzw. die Implementierung von Simulation in den Planungsprozess.

Die entwickelten Erkenntnisse des Vorhabens GeneSim finden inzwischen auch im europäischen Forschungsprojekt BESST (Breakthrough in European Shipping and Shipbuilding Technology) ihre Anwendung. Das Datenmanagement wird hier auf Fragestellungen der Logistik an Bord von Schiffen angewendet.

Auch für weitere branchenfremde Anwendungen wurde das in GeneSim entwickelte Datenmanagement schon eingesetzt. So haben Studien, die derzeit

bei der FSG im Bereich der Simulation von Produktions- und Logistikabläufen bei der Errichtung und Wartung von Offshore-Windparks durchgeführt werden, die Eignung auch für diese Aufgabenstellung gezeigt.

Bei den Arbeiten am Vorhaben GeneSim hat sich eine Reihe von zukünftigen Forschungsaktivitäten abgezeichnet. Die Datenverfügbarkeit, -qualität und -struktur in der schiffbaulichen Produktionsplanung ist heute nicht für eine effiziente Feinplanung und Simulationsunterstützung geeignet. Des Weiteren sind die Auswertungsmöglichkeiten der Simulation heute noch nicht für den konsequenten Einsatz in der Baumethodenplanung geeignet. Auf diesen Gebieten zeichnet sich ein dringender Bedarf an weiteren Forschungsarbeiten ab.

Referenzen

- [1] C. Nedeß, A. Friedewald, L. Wagner: „Verbesserte Planung durch Ablaufsimulation von Szenarien“. In: Digital Engineering - Herausforderungen für die Arbeits- und Betriebsorganisation. Hrsg.: SCHENK, Michael. Berlin: GITO-Verlag, 2009, S. 239-259.
- [2] M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel: „Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken“. Berlin: Springer-Verlag, 2008
- [3] U. Stalleicken: „Marktorientierte Produktion komplexer Investitionsgüter - Analysen, Strategien und Konzepte am Beispiel des deutschen Schiffbaus“ Dissertation, erschienen in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 125, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [4] D. Steinhauer: “GeneSim - Development of a Generic Data Model for Production Simulation in Shipbuilding”, 9th Euro-Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT) 2010, Gubbio, S
- [5] D. Steinhauer: „The Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) – 10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications“, 10th Euro-Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT) 2011, Berlin, S. 453 – 465

Ultraleichte Raumzelle – Entwicklung von ultraleichten Großstrukturen in Faserverbund- und Hybridbauweise für den Schiffbau

Dirk Büchler, Thomas Elsen BaltiCo GmbH, Nikolai Glück Fraunhofer AGP, Manfred Sier WIS GmbH, Siegfried Bludszweit MET GmbH

Einleitung

Faserverbundwerkstoffe besitzen Eigenschaften, die sie von metallischen Werkstoffen unterscheiden. Durch ihre ausgeprägte Anisotropie lassen sich gerichtete Eigenschaften erzielen, die in ihren Parametern deutlich über denen metallischer Werkstoffe liegen. Besonders attraktiv sind dabei die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Andererseits bedingen diese Besonderheiten auch eine Reihe von Problemen und Schwierigkeiten, die bislang ihre Verbreitung einschränkten. Durch die komplexen Fertigungsprozesse lassen sich die Prozesse nicht so einfach automatisieren. Die inhomogene Materialstruktur macht eine Qualitätskontrolle schwer. Um trotzdem hochwertige Produkte herstellen zu können, werden Technologien verwendet, die relativ hoch veredelte Grundmaterialien benötigen und damit meist auch teuer sind.



Abbildung 1: Brückenstruktur in Stabwickelbauweise

In den vergangenen Jahren wurde deshalb verstärkt an technologischen Lösungen gearbeitet, die einen Teil dieser Probleme reduzieren sollen. Dazu gehören z.B. Tape-Legeverfahren oder auch fibre placement Systeme.

Im Schiffbau spielt der wirtschaftliche Aspekt eine noch bedeutendere Rolle, da hier alternative Schiffsstrukturen aus kostengünstigem Stahl gefertigt werden. Andererseits gewinnt auch hier der Leichtbau zunehmend an Bedeutung, da für viele Schiffe, insbesondere bei Fahrgastschiffen, Yachten und Cruiselinern, die oberen Aufbauten aus Gründen der hydrostatischen Stabilität sehr leicht ausgeführt werden müssen.

Bei der BaltiCo GmbH wurde daher ein neuer Ansatz verfolgt. Das hier Stabwickeltechnologie genannte Verfahren ermöglicht durch die Ablage von vorab getränkten Fasersträngen auf Knotenpunkten die Erzeugung komplexer 2- und 3-dimensionaler Bauteile (siehe Abbildung 1). Die Ablage der Faserstränge selbst erfolgt über ein Roboterportalsystem (Abbildung 2). So lassen sich auch sehr große Bauteile wirtschaftlich fertigen.



Abbildung 2: Roboterportalsystem zum Stabwickeln

Aus der neuen Technologie resultiert eine Reihe von Vorzügen. Durch die Vollautomatisierung und eine kontinuierliche Fertigung ergeben sich relativ geringe Fertigungskosten. Dieser Effekt wird durch erhebliche Materialeinsparungen unterstützt. So können die Materialien genau dort eingesetzt werden, wo sie benötigt werden. Außerdem wird kein Abfall produziert, da keinerlei Verschnitt anfällt. Die eingesetzten Materialien sind nur gering veredelt, da im Wesentlichen als Basiskomponenten Kunstharz und Rovingfasern eingesetzt werden, die im Gegensatz zu Geweben/ Gelegen oder Prepreg-Systemen erheblich kostengünstiger sind. Vielfach kann ein höherwertiges Basismaterial, z.B. Kohlefaser im Gegensatz zu Glasfasergeweben, eingesetzt werden, ohne dass sich die Materialkosten dadurch erhöhen. Durch die punktweise Ablage der Faserstränge ist außerdem ein relativ kostengünstiger und leichter Vorrichtungsbau für die Fertigungseinrichtungen möglich.

Durch die Gitterstrukturen werden die Faserstränge dominant in Faserrichtung belastet. Dadurch können die Fasereigenschaften optimal genutzt werden. Insbesondere das hohe Dauerfestigkeitspotential von Kohlefasern kommt so voll zum Tragen. Die Stränge können sehr gut zum Umwickeln von metallischen Komponenten verwendet werden. Damit sind formschlüssige Verbindungen möglich, die leicht und in reproduzierbarer Qualität hergestellt

werden können. Das erleichtert die Anbindung an metallischen Baugruppen und ermöglicht modulare Bauweisen mit derartigen Strukturen.

Mit diesem neuartigen Verfahren ergeben sich natürlich auch eine ganze Reihe von Fragen und Aufgabenstellungen. Das betrifft konstruktive Aspekte, wie die Steifigkeiten und Festigkeiten verschiedener Formen von Knotenverbindungen, die Knicksteifigkeiten bei Druckbelastungen sowie die Anbindung und das Verhalten von Oberflächen. Zum anderen sind Fragen der Anbindung an bestehende metallische Strukturen, Aspekte wie Brand- und Schallschutz und letztlich auch eine Vielzahl von technologischen Aspekten für die Umsetzung wichtig.

Das Verfahren

Konstruktive Eigenschaften

Die Eigenschaften einer Tragwerksstruktur werden durch die Eigenschaften der Stäbe und die Eigenschaften ihrer Verbindung in den Knoten bestimmt. Durch die spezifische Verbindung der Stabwerke in einem kontinuierlichen Legeprozess ergeben sich für die Stäbe und Knoten spezifische Eigenschaften, die in der Auslegung und Dimensionierung berücksichtigt werden müssen.

Struktur

Im Legeprozess erfolgt eine einmalige oder schrittweise Aufschichtung von Fasersträngen zu einem Stabwerk. Dabei ist die Formgebung des Fadenquerschnitts erst einmal weitgehend unbestimmt und wird durch die geometrische Anordnung der Stäbe und die Formgebung der Knoten bestimmt. Nach Abschluss des primären Legevorganges kann die Form jedoch durch Umwickeln oder ähnliche Lösungen zu einem Rundquerschnitt qualifiziert werden (siehe Abbildung 3).

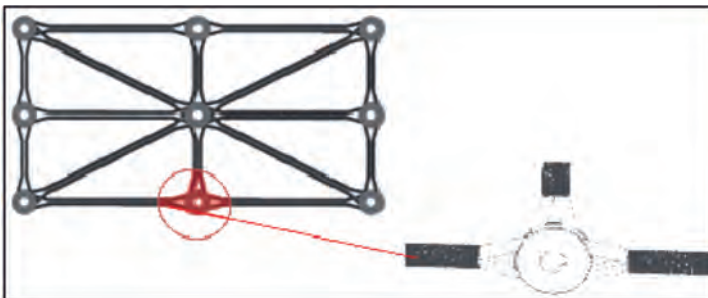
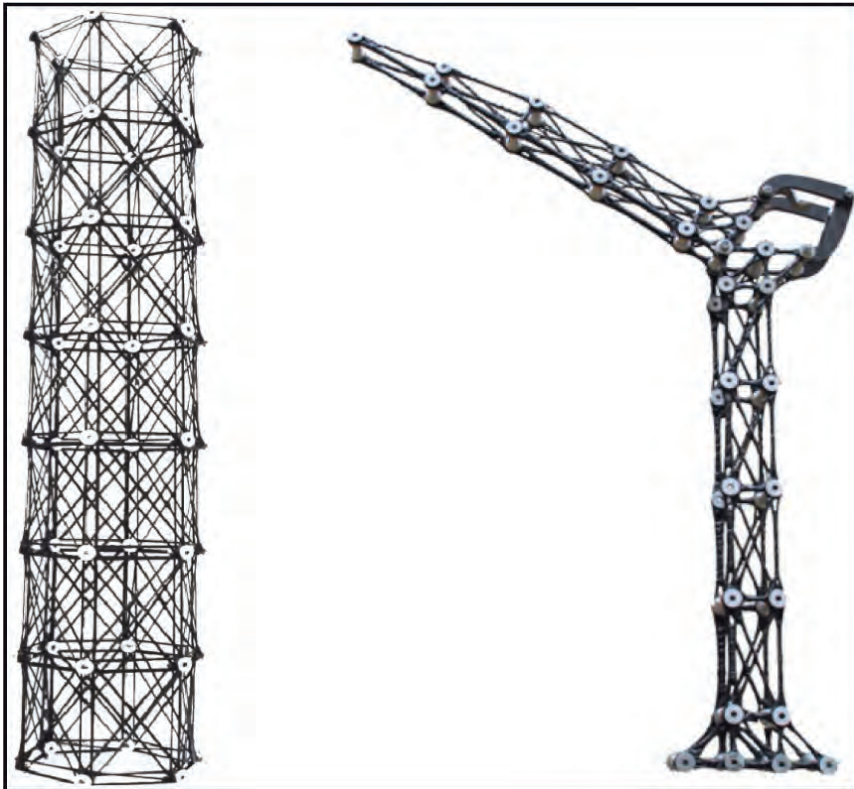


Abbildung 3: Umwickelte Stabwerksstruktur

Die primäre Struktur selbst kann durch Einwickeln verfeinert werden. Das Stabwickeln kann sehr gut mit anderen Bauteilen verknüpft und kombiniert werden. So können Stäbe und Spanten aus anderen Materialien in den Fertigungsprozess eingebunden werden und diesen unterstützen.

Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Um einfache Befestigungsmöglichkeiten zu ermöglichen, können beispielsweise metallische Knoten eingewickelt werden (Abbildung 4 links). Eine weitere Möglichkeit besteht im Einbinden von kompletten vorab gefertigten Stäben verschiedener Materialien, z.B. bei Gittermasten (Abbildung 4 rechts).



*Abbildung 4: Turmstruktur mit metallischen Knoten (links);
Trägerstruktur mit metallischen Querverbindern (rechts)*

Durch die Einbindung von Querspannen lassen sich sehr effizient großflächige Gitter und profilierte Tragflügelsysteme aufbauen wie in Abbildung 5 dargestellt.

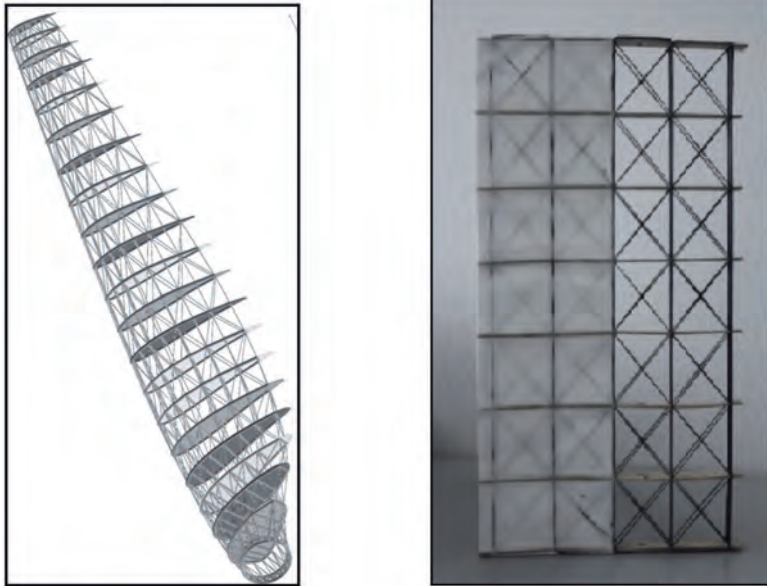


Abbildung 5: Gitterstrukturen mit Spanten: Rotorblatt (links); Wandstruktur (rechts)

Die entstehenden Stäbe sind durch ein geringes Eigenwiderstandsmoment gekennzeichnet, da sie zwar aus hochfesten, aber damit auch relativ dünnen Stabstrukturen bestehen. Sie sind daher bei Druckbelastung knickgefährdet. Diese Gefährdung muss durch geeignete konstruktive Maßnahmen minimiert werden. Dazu gehört die Konzentration von Druckspannungen in einzelnen knicksteifen Stäben, die Stützung durch externe Strukturen oder die Feinvernetzung.

Knoten

Die Knotenpunkte bestimmen mit ihrer Steifigkeit die Eigenschaften der Gesamtkonstruktion mit. Sie definieren wesentlich die Materialauslastung sowie die Steifigkeit. Sie können als Stiftumwicklung in verschiedenen Ausführungen, wie zum Beispiel als Multistiftvariante (Abbildung 6) oder auch einfach als freie oder umwickelte Kreuzung von Strängen (Abbildung 7 links) realisiert werden.

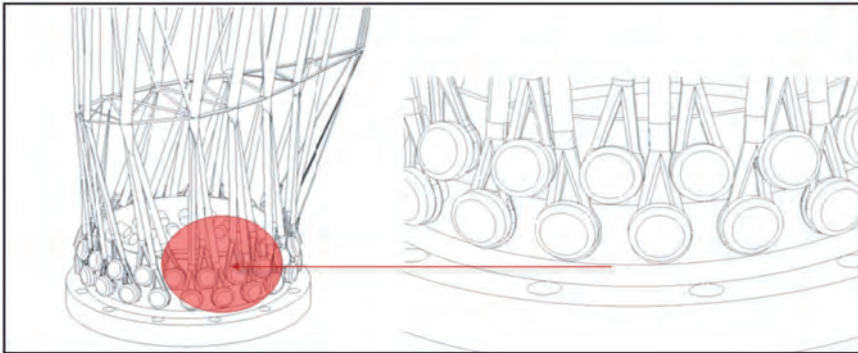


Abbildung 6: Rotorflügelbefestigung durch Flanschknотenumwicklung

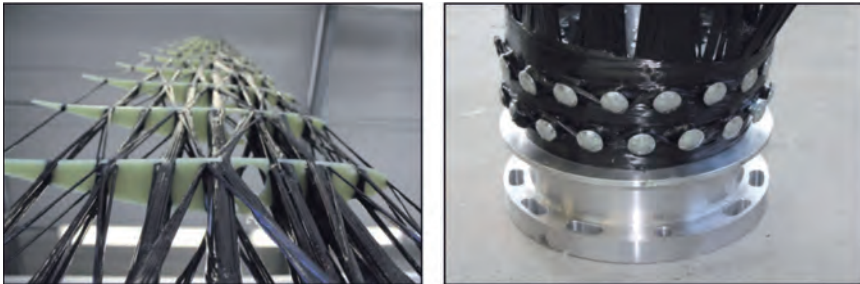


Abbildung 7: Knotenformen

Mathematische Umsetzung

Um derartige Strukturen berechnen zu können, wurde eine spezielle Berechnungs- und Optimierungssoftware entwickelt, die eine Auslegung unter Berücksichtigung biegeschlaffer Stäbe und des Knickverhaltens (Eulerscher Knickstab) ermöglicht. Gleichfalls kann damit die Gesamtstruktur unter Berücksichtigung verschiedener Lastfälle optimiert werden. Dabei können dann verschiedene Nebenbedingungen berücksichtigt werden, wie z.B. die Zusammenfassung zu Stabgruppen sowie Mindest- und Maximalquerschnitte. Die Optimierung kann dabei nach verschiedenen Strategien erfolgen. So kann z.B. die Methode steepest descent mit nichtlinearen Nebenbedingungen im einfachen Fall auf die Stabquerschnitte angewandt werden. Dabei werden alle Stäbe gleichzeitig geprüft und entsprechend der Belastung modifiziert. Die Verformungen und daraus resultierenden Kräfte und Festigkeiten einschließlich Knicken werden als Funktionen der Stabquerschnitte angesehen. Um die bei komplexen Strukturen auftretenden „Zigzags“ dieses Verfahrens zu vermeiden, kann auch mit conjugated gradients gearbeitet werden.

Die Zielfunktion der Optimierung ist linear in den Querschnitten der Stäbe, aber da die Nebenbedingungen nicht linear sind, liegt ein hochdimensionales (in der Praxis bis mehrere Tausend Variablen), nicht lineares Optimierungsproblem vor. Man kann also nicht unbedingt erwarten, mit einem Startwert das Optimum zu erreichen. Deshalb müssen obige Verfahren mehrmals angewendet werden, wobei bisherige Ergebnisse Berücksichtigung finden. Konkret heißt dies, dass ein Startvektor mittels einer multidimensionalen Normalverteilung mit gewichteten Standardabweichungen berechnet wird.

Experimentelle Optimierung der Knotenpunkte

Im Laufe des Projekts wurden, wie oben beschrieben, auf Grund von fertigungstechnischen Anforderungen unterschiedliche Arten von Knotenpunkten entwickelt. Erster Ansatz war der klassische Schlaufenanschluss, also einfache axial-symmetrische seitlich begrenzte Augen, um die die Faserbündel gewickelt werden und in unterschiedliche Richtungen abgehen (siehe Abbildung 8).

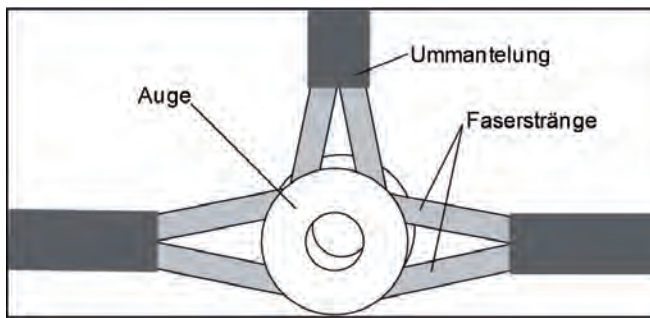


Abbildung 8: Knotenpunktvariante mit Schlaufenanschlüssen

In der aktuellen Konstruktionsvariante bilden Ausschnitte in GFK-Spanen die Knotenpunkte, da dies die Fertigung deutlich vereinfacht. An den tragenden Anbindungspunkten der Stabwerksstruktur zur Umgebung, bspw. zum Schiffsdeck, kommen jedoch nach wie vor Schlaufenanschlüsse zum Einsatz. Da an diesen Punkten die Krafteinleitung erfolgt, treten hier auch die höchsten Beanspruchungen auf. Das folgende Kapitel beschäftigt sich daher ausschließlich mit der Optimierung der Wickelmuster zur Erhöhung der Festigkeiten des Schlaufenanschlusses.

Notwendigkeit von Referenzwerten

Wie eingangs beschrieben, bestehen die gewickelten Stabwerke aus mehreren parallel gelegten Faserrovings, also Faserbündeln aus Kohlenstoff- oder Glasfasern und einer Epoxidharzmatrix, so dass sich die mechanischen Ei-

enschaften theoretisch nach der Mischungsregel [VDI] ermitteln lassen, wie in Abbildung 9 dargestellt.

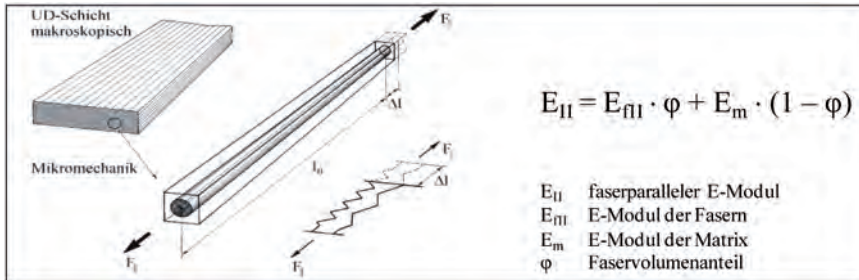


Abbildung 9: Mikromechanisches Modell zur Herleitung des Faserparallelen Elastizitätsmoduls E_{II} eines längsbelasteten unidirektionalen Laminates [SCH]

Da es beim Strangziehen jedoch in Folge von Fadenumlenkungen, beim Durchlaufen des Tränkbades und am Fadenauge zu einer Schädigung einzelner Fasern kommt, sind die realen Festigkeiten industriell verarbeiteter Faserrovings niedriger, als im Labor ermittelte Datenblattwerte des Herstellers. Nimmt man also die aus den Datenblattwerten errechneten Festigkeiten als theoretisch erreichbare Referenzwerte beim Optimierungsprozess der Wickelparameter an, ergeben sich Verbesserungspotenziale, die eigentlich keine sind. Zur Bewertung unterschiedlicher Wickelvarianten hinsichtlich noch möglicher Festigkeitssteigerungen werden daher im Experiment ermittelte Festigkeiten selbst verarbeiteter Rovings als Referenzwerte benötigt.

Beschränkung auf Zug- und Druckversuche

Da es sich bei den Konstruktionen um Stabwerke handelt, treten innerhalb der Stäbe theoretisch nur Zug- und Druckkräfte auf. Im realen Bauteil kommt es auf Grund der nicht momentenfreien Lagerung der Stäbe in den Knotenpunkten auch zu Biegung und Torsion. Diese spielen jedoch eine untergeordnete Rolle, weshalb im Projekt nur die Zug- und Druckfestigkeiten der Rovings ermittelt werden. Als kleinste Einheit steht dem Konstrukteur ein Roving zur Verfügung. Im Verbundprojekt „Ultraleichte Raumzelle“ wurden ein Glasfaserroving mit 2400 tex (1 tex = 1 g/km) und ein Kohlenstofffaserroving mit 1600 tex verwendet. Als Matrixmaterial kam ein EP-Harz zum Einsatz.

Notwendigkeit von Warmzugversuchen

Da die Wandkonstruktionen auf Schiffen zum Einsatz kommen, gelten strenge Anforderungen an ihre Eigenschaften im Brandfall. Neben definierten Mindestisolationseigenschaften der Wand ist zudem die strukturelle Integrität der

Wand für 30 Minuten gefordert [SOL]. Messungen während der Brandversuche haben ergeben, dass die Temperatur der Tragstruktur innerhalb der geforderten Standzeit auf Werte von bis zu 150°C ansteigt. Daher wurden neben der Referenzwertermittlung bei Raumtemperatur zusätzlich Warmversuche durchgeführt.

Besonderheiten bei der Probenherstellung

Auf Grund der Form des vorliegenden Halbzeugs als Faserroving ist die von metallischen Werkstoffen bekannte Herstellungsvariante für taillierte Zugproben durch nachträgliches Fräsen oder Drehen nicht möglich. Ebenso ist eine direkte Einspannung des Rovings nicht möglich, da dieser infolge der durch die Spannwerkzeuge verursachten Spannungskonzentrationen stets an der Einspannung versagt. Abhilfe schaffen Proben nach DIN EN ISO 9163 [D91] mit nachträglich angegossenen sanft auslaufenden Endlaschen aus flexibilisiertem EP-Harz, die dann mit Standardspannbacken für Flachproben geprüft werden können.



Abbildung 10: Rovingzugproben mit angegossenen Endlaschen vor und nach der Prüfung

Ermittlung der Roving-Zug-Festigkeiten

Bei den so gefertigten Proben versagen im Zugversuch bei ca. 50% der geprüften Proben schlagartig alle Fasern in der Probenmitte, was nach [D91] als bewertbarer Bruch gilt. Bei den restlichen Proben kommt es zu einem stufenweisen Versagen einzelner Fasern oder zu einem Bruch an der Einspannung. Abbildung 11 zeigt die so ermittelten tatsächlichen Festigkeiten und E-Moduln der verarbeiteten Glas- und Kohlefaserrovings im Vergleich zu den Datenblattwerten und den Einfluss erhöhter Temperatur auf die Zugfestigkeit von Glasfaserrovings.

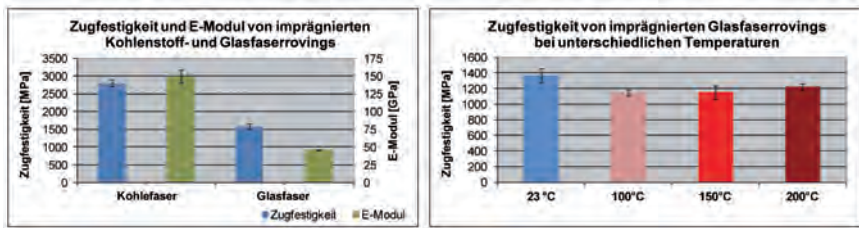


Abbildung 11: Vergleich der mechanischen Zugeigenschaften von Glas- und Kohlefaserrovings (links) und Temperatureinfluss auf die Festigkeit von Glasfaserrovings (rechts)

Es zeigt sich, dass die Schädigung der Fasern durch die Verarbeitung geringer ausfällt als zunächst befürchtet, was für die entwickelten Fertigungsanlagen spricht. Außerdem wird deutlich, dass der Temperatureinfluss infolge des faserdominierten Festigkeitsverhaltens sehr gering ausfällt und bei zugbeanspruchten Stäben im Brandfall kein Versagen droht.

Ermittlung der Roving-Druck-Festigkeiten

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit sind kurze gedrungene Prüfkörper notwendig, um ein Stabilitätsversagen durch Knicken auszuschließen. Die Rovings werden dabei ebenfalls imprägniert, anschließend jedoch in einer Form (siehe Abbildung 12) zu Stäben mit einem definierten Durchmesser von 6 mm gepresst.

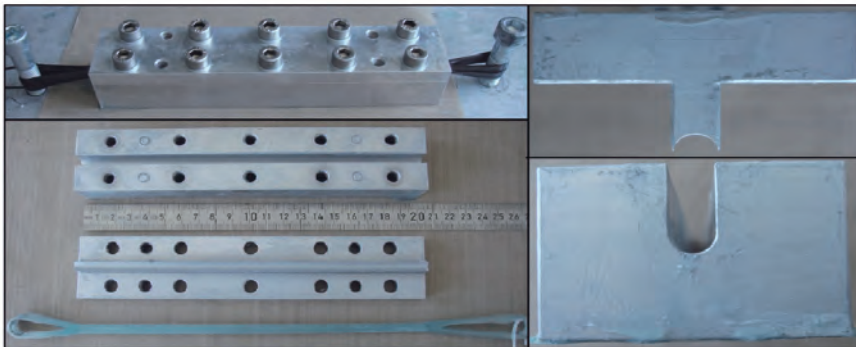


Abbildung 12: Form zur Herstellung von Druckprüfstäben

Nach der Aushärtung werden die Stäbe in Prüfkörper zerteilt und nach ISO 3597 [135] geprüft. Abbildung 13 zeigt den Festigkeitsvergleich zwischen Glas- und Kohlefaserproben und den Einfluss erhöhter Temperatur auf die Druckfestigkeit von Glasfaserrovings.

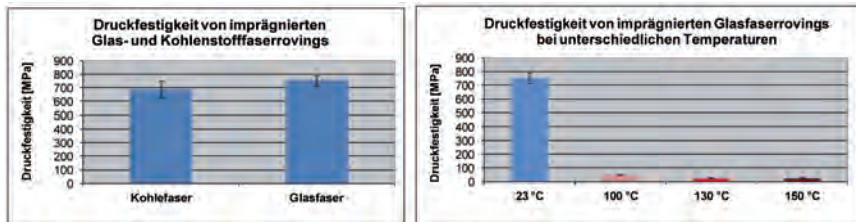


Abbildung 13: Vergleich der mechanischen Druckeigenschaften von Glas- und Kohlefaserrovings

Es zeigt sich, dass der Unterschied zwischen Glas- und Kohlefaser nicht nur deutlich geringer ist, sondern die Glasfaserproben eine höhere Festigkeit aufweisen. Außerdem wird durch den starken Abfall der Wärmefestigkeit deutlich, dass die Druckfestigkeit von der Matrix dominiert ist und das hier geprüfte EP-System bereits bei 100°C einen Großteil seiner Festigkeit verliert. Es wurde daher durch ein System mit deutlich höherer Glasübergangstemperatur ersetzt, so dass ein temperaturbedingtes Versagen innerhalb der ersten 30 Minuten ausgeschlossen werden kann.

Optimierung des Schlaufenanschlusses

Mit den nun vorhandenen Referenzwerten von ca. 1580 MPa Zug- und 750 MPa Druckfestigkeit für einen imprägnierten 2400-tex-Glasroving ist eine reale Bewertung unterschiedlicher Varianten des Schlaufenanschlusses möglich. Für die Experimente wurden Einzelstäbe teilweise manuell, teilweise automatisiert hergestellt und mit Hilfe einer servomechanischen Universalprüfmaschine zerstörend geprüft.

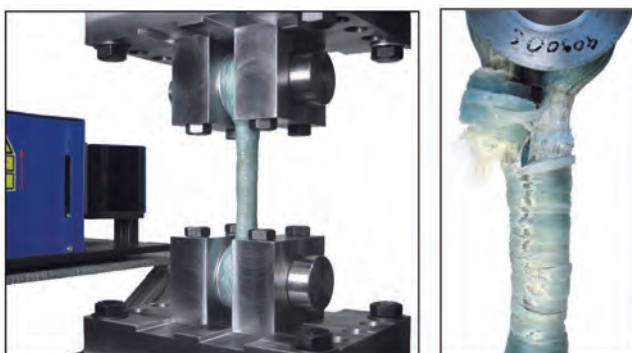


Abbildung 14: In Prüfvorrichtung eingespannte Probe mit Laserextensiometer (links); Probenbruch durch Umantellungsversagen (rechts)

Variante 1: Parallele Stränge mit Ummantelung

Zum Projektstart wurden die Rovings in einer einfachen Schlaufe um die Augen gelegt und zum Abschluss zur Erhöhung der Druckfestigkeit mit einer Ummantelung versehen, die die beiden Einzelstränge vereint. Hierdurch wird rechnerisch eine Verdoppelung der Knicklänge erreicht und das Auge soll bei Druckbelastung geometrisch blockiert werden. In Zugversuchen zeigte sich in Folge der konstruktionsbedingten Aufziehkkräfte am Auge ein zweistufiges Versagen. Zunächst wurde die Ummantelung aufgesprengt und anschließend versagte einer der Faserstränge. Der Ausnutzungsgrad betrug bei einer Zugfestigkeit von 312 MPa nur ca. 20%. Als Versagensbild bei Druckbeanspruchung zeigte sich ein Eindringen des Auges in den mit Harz gefüllten Keil zwischen den Strängen bei 91 MPa (12%).

Variante 2: Parallele Stränge mit verstärkter Ummantelung

Um den frühzeitigen Bruch durch das Versagen der Ummantelung herauszuzögern wurde die Ummantelung mit Kohlenstofffasern ausgeführt. Nach mehrfacher Erhöhung der Ummantelungsstärke konnte so ein direktes Versagen der Längsstränge am Ummantelungsende bei einer auf den Stabdurchmesser bezogenen Nennspannung von 680 MPa (43%) herbeigeführt werden. Die Druckfestigkeit bleibt von dieser Maßnahme unbeeinflusst.

Variante 3: Gekreuzte Stränge mit Ummantelung

Ein Kreuzen der Stränge - als Acht gelegt - reduziert die Aufziehkkräfte, schont somit die Ummantelung und verlagert die Spannungsüberhöhung in den Längssträngen vom Ummantelungsende zum Auge hin. Der Bruch tritt nun, wie aus der Literatur für den „normalen“ Schlaufenanschluss bekannt, am Ansatz des Auges auf. Die Nennbruchspannung beträgt jetzt 750 MPa (47%). Eine weitere Steigerung ist kaum möglich, da es am Ansatz der Schlaufe durch das Umlenken der Kraft zu einer Spannungsüberhöhung kommt [SCH]. Bei den hier verwendeten Geometrieverhältnissen beträgt der Faktor ca. 2, so dass das Material nahezu ausgelastet ist. Eine direkte Steigerung der Druckfestigkeit war durch das Kreuzen der Stränge nicht möglich.

Variante 4: Gekreuzte Stränge mit Ummantelung und Stützstiften

Auf Grund des gleichbleibenden Versagensbildes beim Druckversagen in Form von Eindringen des Auges in den Keil, wie die Abbildung 15 zeigt,

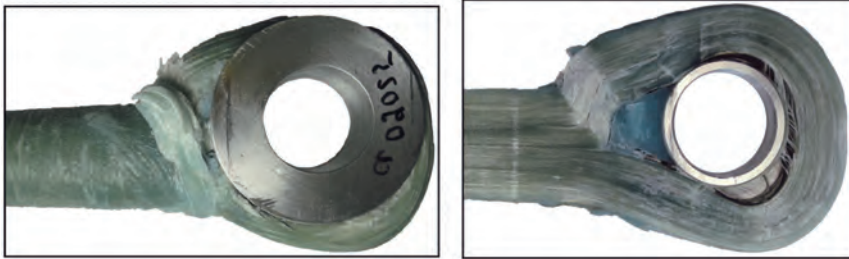


Abbildung 15: Druckversagen durch Deformation des Harzkeils (links); im Schliff (rechts)

wurden zusätzliche Stützstifte quer zum Stab eingebracht, um das Auge geometrisch zu behindern und die Kraft in die zwei Stränge einzuleiten. Zusätzlich wurde die Ummantelung bis an die Stützstifte und das Auge herangewickelt. Im Ergebnis konnten so Druckfestigkeiten von 435 MPa (57%) erreicht werden. Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der erreichbaren Nennbruchspannungen im Vergleich zu den an Rovings ermittelten Referenzwerten.

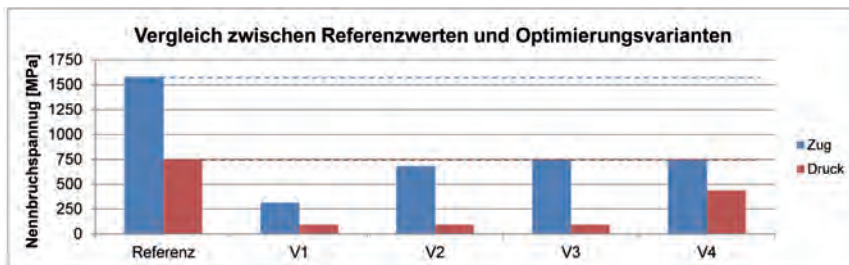


Abbildung 16: Festigkeiten der Konstruktionsvarianten im Vergleich zu den Rovingreferenzwerten

Technologie

Für die Fertigung derartiger Bauteile musste eine spezielle Anlage konfiguriert und aufgebaut werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Anwendungszentrum in Rostock wurden Grundfunktionalitäten einer derartigen Anlage systematisch erprobt. Seit Anfang 2011 ist eine derartige Anlage (siehe Abbildung 17), die aus einem 3-Achsportal, einem 6-Achsroboter und 2 synchron betriebenen Drehachsen besteht, bei der BaltiCo GmbH in Betrieb.

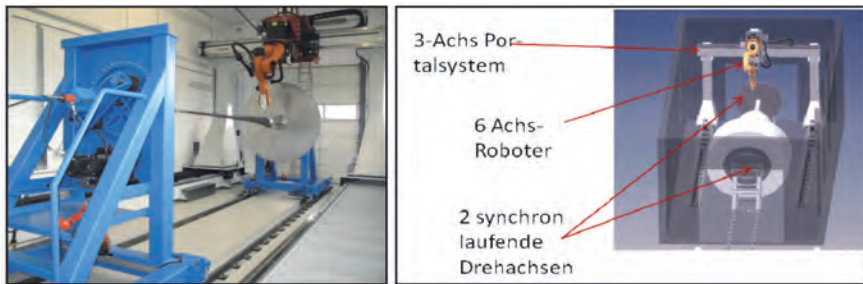


Abbildung 17: Legeportal der Fa. BaltiCo (links) und CAD-Modell der Anlage (rechts)

Um eine prozesssichere Fertigung zu sichern, sind stabile Fadenzuführungen und deren Tränkung notwendig. Die Verarbeitungskapazität der Anlage beträgt momentan 40 kg/h. Ein wesentlicher Bestandteil der technologischen Umsetzung ist die mathematische Beschreibung, Simulation und Optimierung des Legevorganges. Dazu war es erforderlich, ausgehend von den Festigkeits- und Optimierungsrechnungen, Legestrategien zu entwickeln und zu programmieren, die einen kontinuierlichen Legevorgang für die einzelnen Bauteile ermöglichen. Darüber hinaus wurden für die Ablage der Fadenstränge an den Knoten spezielle Strategien entwickelt, die einen stabilen Ablegevorgang ermöglichen.

Umsetzung

Deckshausstrukturen

Deckshausstrukturen im Schiffbau sind üblicherweise Stahlschweißkonstruktionen. Insbesondere bei Fahrgastschiffen und großen Yachten ergeben sich durch das hohe Gewicht Einschränkungen. So geht es bei derartigen Fahrzeugen darum, durch eine möglichst große Deckszahl eine hohe Passagierkapazität zu erreichen. Hohe Gewichte weit über der Wasserlinie beeinflussen jedoch die Stabilität sehr negativ und sind daher nicht zulässig. Vielfach wird mit Aluminiumkonstruktionen versucht, derartige Probleme zu reduzieren. Eine weitere Alternative besteht in der Verwendung von Wand- und Deckenmodulen in Stabwickeltechnologie. Dadurch ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die bei „landgestützten Lösungen“ nicht unbedingt nötig sind. Der Aufgabe, die Technologie für Deckshausstrukturen zu qualifizieren und Anforderungen aus dem Schall- und Brandschutz zu berücksichtigen, haben sich die Partner des Verbundvorhabens gestellt. Als Ausgangspunkt wurde das Deckshaus eines Binnentankers mit einer Länge von 100 m gewählt (siehe Abbildung 18), der in seinen Abmessungen und Anforderungen den Problemstellungen des Vorhabens entsprach und letztlich auch

eine erste Anwendungsmöglichkeit eröffnete. Die Abmaße betragen 9,4 x 7,8 x 2,6 m.

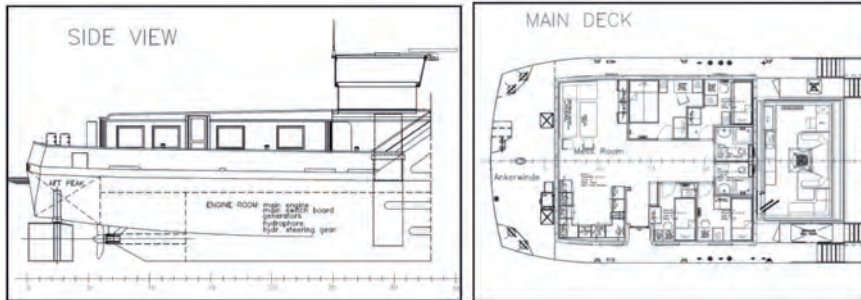


Abbildung 18: Deckshaus eines Binnentankers

Zur tragenden Struktur gehören die Außenwände, Boden und Decke sowie 4 Stützen, die die Decke auf dem Boden abfangen. Die Raumzelle ist nicht fest mit dem Schiffsrumpf verschweißt, sondern wird an Back- sowie Steuerbord über einen Dämpfer in den Schiffsrumpf eingehängt. Auf der Basis der bestehenden Ausführung in Stahlbauweise und den Anforderungen des GL für derartige Schiffe erfolgte durch MET eine Analyse der Struktur für relevante Lastfälle. Sie erbrachte für alle Lastfälle eine ausreichende Dimensionierung bei einem Stahleigengewicht von 20 t. Abbildung 19 zeigt die Verformungen unter Extremlast.

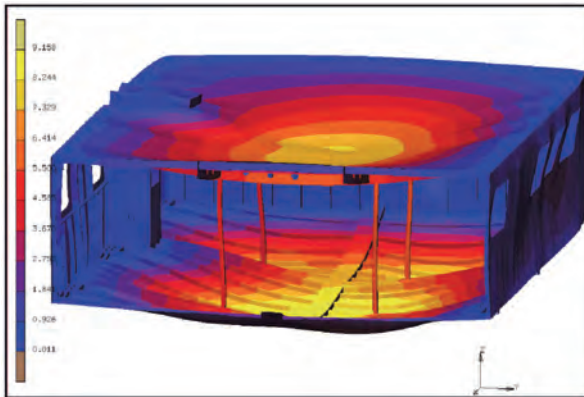


Abbildung 19: Deckshausverformungen unter Extremlast

Für die Stahlstruktur wurden in Abhängigkeit von den Lastkombinationen Maximalspannungen zwischen 51 und 145 MPa sowie Verformungen von 3 bis 10 mm errechnet. Darauf aufbauend wurden verschiedene Lösungen für Stabgitterstrukturen erarbeitet, wie nachfolgend dargestellt:

Reine Stabgitterlösung mit variablen Knoten bzw. mit Rasterknoten:

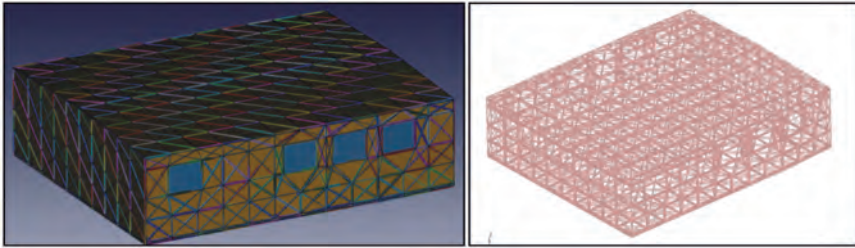


Abbildung 20: Deckshaus mit variablen Knoten (links); Deckshaus mit Rasterknoten (rechts)

Hybridlösungen mit Spanten und/oder Stringern:

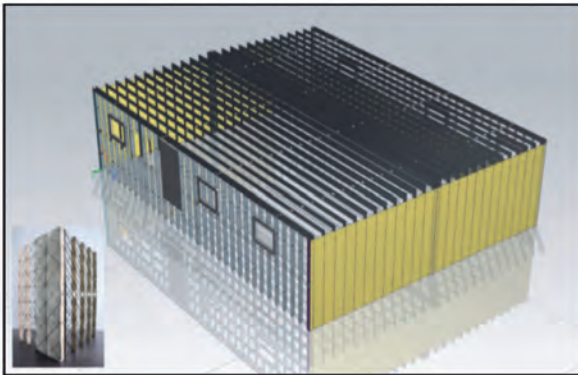


Abbildung 21: Deckshaus als Hybridlösung mit Spanten

Aus technologischen Gründen und Kostengründen wurde letztlich eine Hybridlösung mit Spantenstrukturen gewählt.

Dabei wird ein Spantengerüst mit einem CFK-Gitter bewickelt. Die Last wird in Schubrichtung durch das Gitter, in Biegerichtung in der vertikalen Ausrichtung durch das Spantengitter aufgenommen. Die Belastung in der Biegeebene mit waagerechter Ausrichtung wird durch die Fundamentierung und das Gitter aufgenommen (siehe Abbildung 22). Die Lastaufnahmefähigkeit ist flexibel durch die Stärke der Verstärkungsgitter einerseits als auch durch die Breite und Stärke der GFK-Spanten einstellbar. Das Ausknicken der vertikal angeordneten Spanten wird effizient vom Gitter verhindert. Für eine übliche Wand- und Deckenbelastung von 300 kg/m^2 lassen sich z.B. Flächengewichte von $1.6 \dots 2,7 \text{ kg/m}^2$ je nach Material, Bauhöhe und Gitterdichte ohne Isolierung erzielen.

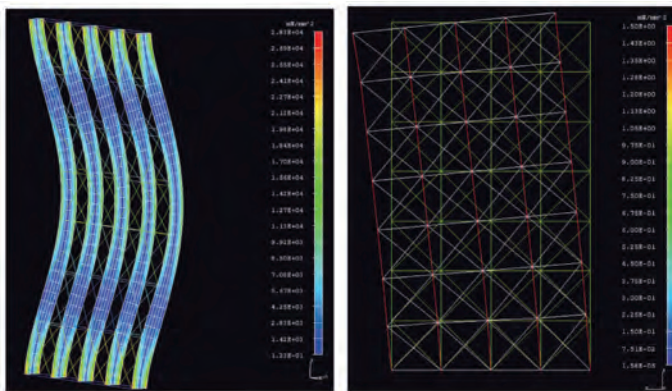


Abbildung 22: Lastaufnahme durch das Spantengerüst (links); durch das Stabwickelgitter (rechts)

In die Gitterstruktur werden Lüftungs- und Versorgungskanäle integriert. Die Gitterelemente können als Einzelmodule gefertigt werden und über Montageverbinder zu Großmodulen in Längsrichtung oder über Eck verbunden werden, wie in Abbildung 23 dargestellt.

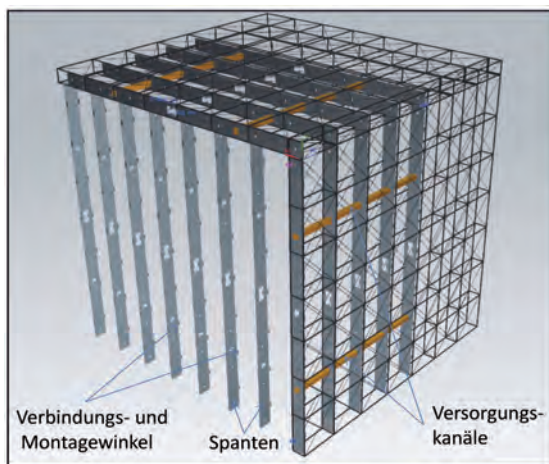


Abbildung 23: Wand- und Deckenkonstruktion in Spantenbauweise

Die Gitterwände werden beidseitig vollständig isoliert (siehe Abbildung 24) und ermöglichen damit auch die Einhaltung der Brandschutznorm B15 auf Schiffen.

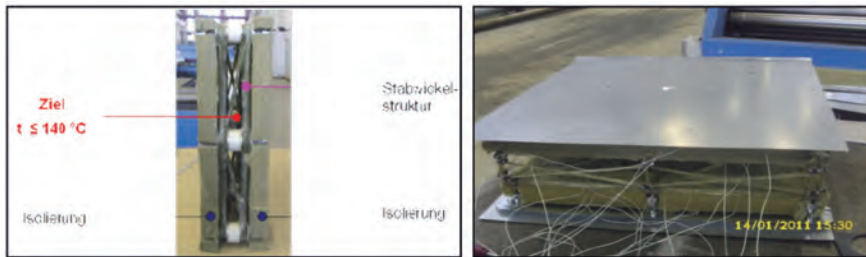


Abbildung 24: Aufbau Brandschutzplatte

Mit den so konfigurierten Platten wurde das Deckshaus als Einheit konstruiert. Dabei wurden die Seitenwände mit einer Wandstrukturdicke von 100 mm ausgelegt. Bei der Decken- und Bodenstruktur wurde eine Wandstärke von 150 mm verwendet. Damit ergeben sich folgende Gewichtsanteile der tragenden Struktur für das Gesamtdeckshaus:

Wände	Decken	Boden	Gesamt
212 kg	249 kg	249 kg	711 kg

Tabelle 1: Gewichtsverteilung Deckshaus

Hinzu kommt das Gewicht für Isolierung und Verblechung. Entsprechend den Brandversuchen wurde Ultimate UMPN 90 verwendet. Als Verblechung wird Stahlblech oder Alublech verwendet. Damit erhöhen sich die Gewichte auf ein Flächengewicht von ca. 17,5 kg/m².

Den Vergleich der Panelgewichte mit der bestehenden Stahlkonstruktion ohne Trägersysteme zeigt das folgende Diagramm:

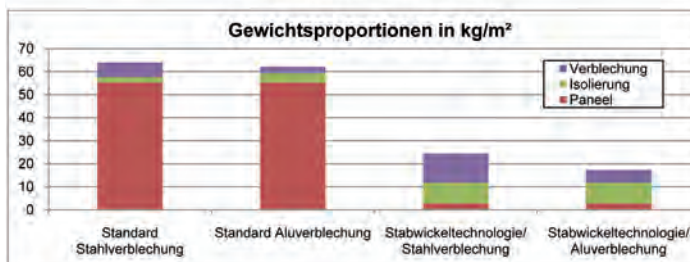


Abbildung 25: Gewichtsvergleich

Als Gesamtgewicht ergeben sich für das Deckshaus 3.5 t. Ein alternatives Stahlsystem wird mit einem Gewicht von 21.7 t gefertigt.

Ausblick

Anwendungsspektrum

Das Verfahren bietet durch seine hohe Flexibilität ein breites Anwendungsspektrum. Mit der vorgestellten Lösung ist sicher nur ein kleiner Teil möglicher Anwendungen beschrieben. Durch die sehr günstige Einbindung von metallischen Verbindungsteilen bietet sich das Verfahren auch für die Fertigung von Chassiskomponenten für Fahrzeuge, Schiffe (Abbildung 26) oder Anwendungen im allgemeinen Maschinenbau an.

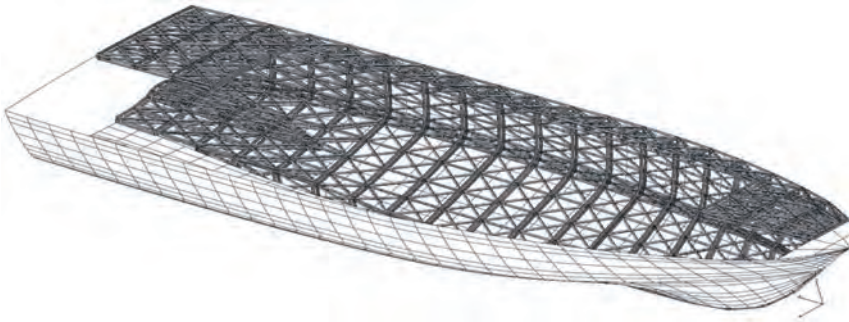


Abbildung 26: Schiffsrumpf in Stabwickeltechnologie

Die sehr kostengünstige Produktionsweise ermöglicht darüber hinaus Anwendungen im Bauwesen und neue Möglichkeiten in der Architektur. Eine naheliegende Anwendung sind z.B. Tragwerksstrukturen für Gittermasten. Besonderer Vorteil ist hier die sehr kostengünstige Produktion als auch die korrosionsbeständige und isolierende Struktur. Herausforderung für die derartige Anwendung ist die Stabilisierung der Druckstäbe, da keine Stützfunktion einer Außenhaut vorliegt. Das kann durch feinvernetzte Gitter oder durch kombinierte Konstruktionsweisen (Abbildung 27) mit reinen Zugstäben in der Stabwickelstruktur erfolgen. Verfahrensbedingt lassen sich auch sehr gut Einzelsegmente fertigen und in herkömmlicher Weise zu Gesamtmasten verschrauben.

Durch die Stabwerksstruktur lassen sich Aktuatoren für adaptive Lösungen zur Formänderung und Schwingungsbeeinflussung relativ einfach integrieren.



*Abbildung 27:
Gittermast für Kleinwindkraftanlage*

Technische Weiterentwicklung des Fertigungsverfahrens

Ein Schwerpunkt in der weiteren Entwicklungsarbeit ist die technische Weiterentwicklung des Verfahrens. Das betrifft sowohl technische Herausforderungen der Anlage selbst als auch die Weiterentwicklung konstruktiver Lösungen. Zu ersteren gehören neben einer weiteren Vergrößerung der möglichen Fertigungsabmessungen, wie Bauteilgröße und Verarbeitungskapazität auch die Erhöhung der „Intelligenz“ der Anlage bezüglich Wegoptimierung und Beeinflussung sowie aller Nebenprozesse, wie Fadenführungen, Fadenbehandlung und Tränkung. Auch wird es lösungsspezialisierte Anlagenentwicklungen geben.

Mit dem hier vorgestellten Verfahren ergibt sich für Konstrukteure und Designer eine Vielzahl neuer Lösungsmöglichkeiten. Noch steht dieser neuartige Technologieansatz am Anfang. Es wird sicher noch viele Lösungen und Entwicklungen für eine breite Einführung geben müssen, das Verfahren bietet aber schon jetzt für viele Anwendungen alternative und wirtschaftlich attraktive Umsetzungsmöglichkeiten.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundprojektes ULRZ umgesetzt und finanziell unterstützt. Wir danken dem BMWi sowie den beteiligten Mitarbeitern vom Projektträger Jülich für die jederzeit engagierte Betreuung und Unterstützung.

Quellen

- [VDI] VDI 2014 - Blatt 1: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund - Grundlagen; Verein Deutscher Ingenieure; Beuth; Düsseldorf 1989
- [SCH] Schürmann, H.: Konstruieren mit mit Faser-Kunststoff-Verbunden; Springer; Berlin 2005
- [SOL] SOLAS: International Convention for the Safety of Life at Sea - Chapter II-2: Fire protection, fire detection and fire extinction; IMO; London 1974
- [D91] DIN EN ISO 9163: Textilglas - Rovings - Herstellung von Probekörpern und Bestimmung der Zugfestigkeit von imprägnierten Rovings; Beuth; Düsseldorf 2005
- [I35] ISO 3597-3: Textilglasverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften an Stäben, hergestellt aus roving-verstärktem Harz - Teil 3: Bestimmung der Druckfestigkeit; Beuth; Düsseldorf 2003

HAI-Tech – Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme

Sascha Buchbach, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung; Heinrich Kordy, Fraunhofer IFAM; Herr Christian Johannsen, HSVA Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH; Herr Andreas Hesse, Fahrion Engineering GmbH & Co. KG; Herr Dr. Wolfgang Sichermann, Blohm + Voss Naval GmbH

1. Einleitung und Ziele des Vorhabens

Der Strömungswiderstand eines Schiffkörpers stellt einen entscheidenden Faktor für den Energieaufwand und somit auch für den Treibstoffverbrauch eines Schiffes dar. Seit einigen Jahren ist bekannt, dass eine der Haifischhaut nachempfundene mikrostrukturierte Oberfläche (sog. Riblets) geeignet ist, den Strömungswiderstand einer Oberfläche signifikant zu senken. In einigen Bereichen haben prototypische Anwendungen (z.B. das Bekleben einer Renn-Yacht mit Riblet-Folie oder die Mikrostrukturierung von Schwimmanzügen) bereits die Wirksamkeit einer solchen Strukturierung belegt. Eine großtechnische Anwendung ist wegen des Fehlens einer technisch umsetzbaren und preiswerten Lösung bisher allerdings nicht erfolgt.

Die bislang einzige für Großstrukturen anwendbare Technik ist das Bekleben mit einer oberflächenstrukturierten Folie. Hierbei überwiegen allerdings die Nachteile, die sich einerseits durch die erschwerte Applikation auf gekrümmten Oberflächen und andererseits durch Alterungsprozesse des Folienmaterials und des Klebers ergeben und somit den wirtschaftlichen Nutzen wieder zunichte machen.

Das Ziel des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojektes »HAI TECH« war es, die bisherige Folienlösung durch ein oberflächen-strukturiertes Lacksystem zu ersetzen. Die Ergebnisse dieses Projektes sollen in erster Linie dazu dienen, den Treibstoffverbrauch großer Transportschiffe zu senken und damit einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Emissionen von Treibhausgasen zu leisten oder im Gegenzug die Fahrgeschwindigkeit zu erhöhen.

Der Strömungswiderstand eines bewegten Körpers im Wasser wird durch eine Mikrostrukturierung der Oberfläche des Körpers entscheidend beeinflusst. Ein Beispiel aus der Natur sind die Schuppenstrukturen von schnellen Haiarten, die durch ihre Rillengeometrie den Strömungswiderstand des Fisches und damit die Geschwindigkeit und den Energieverbrauch optimieren.

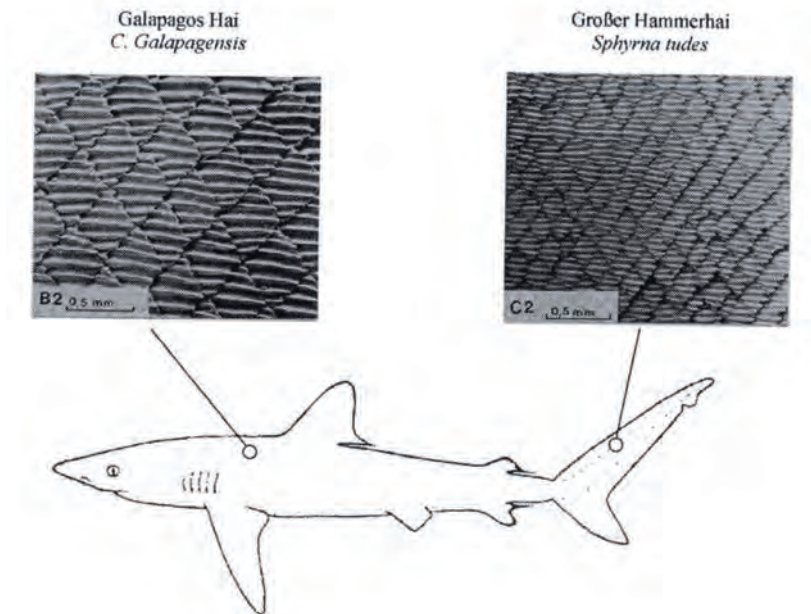


Abbildung 1: Schuppenstruktur schneller Haiarten [1]

Untersuchungen und erste technische Anwendungen solcher Rillenstrukturen (im Folgenden Riblets genannt) haben gezeigt, dass mit einer optimalen Oberflächenstrukturierung der Strömungswiderstand um bis zu 10 % vermindert werden kann, was sich in einer entsprechenden Reduzierung des Treibstoffverbrauchs niederschlägt [2].

Erste Überlegungen zeigen, dass der Einsatz von Riblets im Schiffbau vor allem im Bereich der schnellen Containerschiffe sinnvoll ist. Abb. 2 und 3 zeigen, an welchen Stellen des Schiffskörpers Riblets sinnvoll aufgebracht werden können.

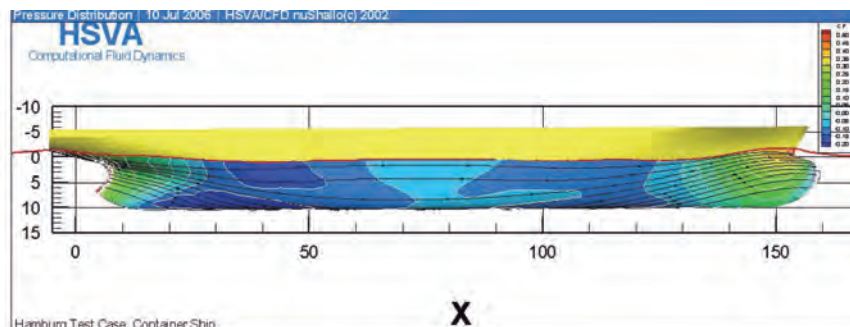


Abbildung 2: Druckverteilung und Stromlinien bei Designgeschwindigkeit

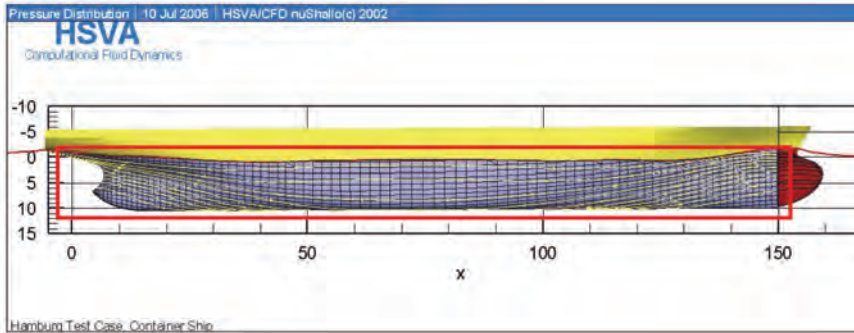


Abbildung 3: möglicher Bereich der Überdeckung mit Riblets

Eine technisch und wirtschaftlich umsetzbare Lösung der Ribletapplikation sollte folgende Eigenschaften haben:

- Automatisierbares und schnelles Verfahren,
- Anwendbarkeit sowohl im Neubau als auch in der Schiffsreparatur,
- Anti-Fouling Wirksamkeit,
- Haltbarkeit der hydrodynamischen Wirksamkeit für mindestens 5 Jahre (Dockzyklus),
- Hohe mechanische Belastbarkeit.

Im Projekt HAI TECH stand die Entwicklung eines großtechnischen Verfahrens im Mittelpunkt, das auf einer simultanen Applikation und Strukturierung der aufgetragenen Beschichtung beruht. Die grundsätzliche Machbarkeit ist bereits im Labormaßstab mittels eines am IFAM entwickelten prototypischen Applikationsgerätes gezeigt worden.

Die Zielerreichung wird dabei durch eine breit gefächerte Vorgehensweise abgesichert, in deren Fokus die Ermittlung einer geeigneten der Strukturgeometrie, die Entwicklung des Beschichtungsmaterials sowie die für einen Praxiseinsatz erforderliche Applikationstechnik steht.

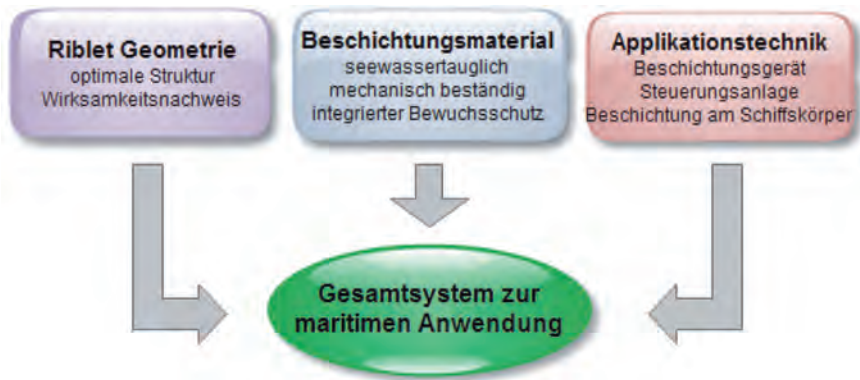


Abbildung 4: Projektstruktur

Als große Herausforderung stellt sich dabei die Haltbarkeit und dauerhafte Wirksamkeit der Mikrostruktur und somit der strömungsgünstigen Eigenschaften unter Einsatzbedingungen dar (siehe Abbildung 5). Hierfür ist insbesondere ein ausreichender Schutz der Oberfläche vor Bewuchs erforderlich. Deshalb liegt ein großer Schwerpunkt auf die Entwicklung eines hoch wirksamen Antifoulingssystems, das zudem die aktuellen Biozid-Richtlinien erfüllt.

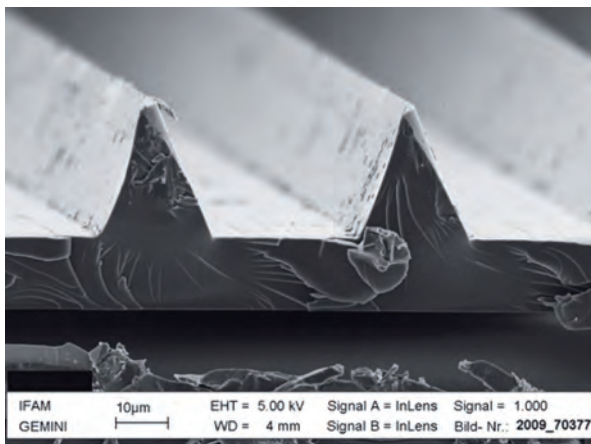


Abbildung 5: Rasterelektronenmikroskope Aufnahme einer riblet-strukturierten Lackoberfläche

Die Forschungsschwerpunkte waren:

- Strömungssimulation zur Optimierung der Rillengeometrie und Richtung auf den Anwendungsfall maritime Technik

- Entwicklung von mechanisch extrem belastbaren Lackstrukturen, welche ebenfalls Anti-Fouling Wirksamkeit beinhalten, durch Einsatz von strahlungshärtenden Polymeren und Nanotechnologie
- Entwicklung eines im Werftbetrieb prozesssicheren Applikationsverfahrens
- Experimentelle Absicherung des Ausmaßes der Wirksamkeit zur Reduktion des Strömungswiderstandes durch Versuche im Strömungskanal mit anschließender Projektion auf den realen Schiffskörper und experimentelle Absicherung des Verschleißwiderstandes sowie der Bewuchseigung durch realitätsnahen Einsatz an Schiffskörpern

Strömungsgünstige Oberflächen

Seit den 1980er Jahren ist bekannt, dass Rillenstrukturen, die sich von der Schuppenstruktur von schnellen Haiarten ableiten, den Strömungswiderstand eines Körpers beeinflussen [3]. Gezielte Untersuchungen haben zur Verbesserung der Strukturen bis zu Verminderung des Strömungswiderstandes um 10 % geführt [4]. Das Funktionsprinzip derartiger Ribletstrukturen ist aufgeklärt. Die Kenntnis der Wirkungsweise hat bereits zu optimierten Strukturen für bestimmte Anwendungsfälle aus dem Luftfahrtbereich geführt.

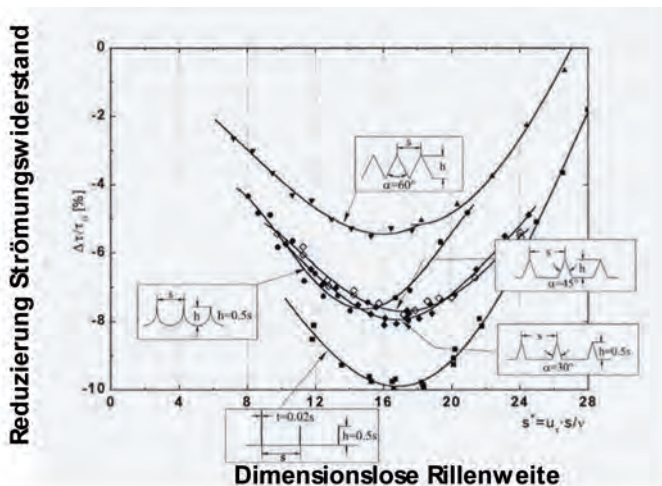


Abbildung 6: Zu erzielende Reduzierung des Strömungswiderstandes bei verschiedenen Geometrien

Ebenfalls bekannt ist der Einfluss der Deorientierung von der optimalen Strömungsrichtung.

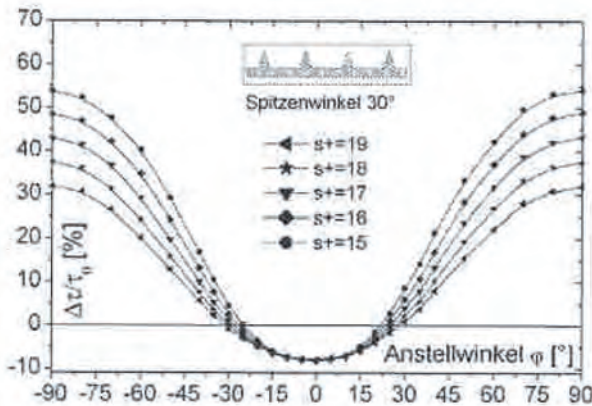


Abbildung 7: Einfluss der Abweichung von optimaler Strömungsrichtung auf Wirksamkeit

Offenbar hat eine Abweichung von $\pm 15^\circ$ von der Strömungsrichtung nur eine geringe Abnahme des Effektes zur Folge, während eine Abweichung von größer als 30° den Strömungswiderstand erhöht.

Eine Folie, die die ersten, noch nicht optimierten Strukturen aufwies, wurde auf ca. 30 % der Fläche eines Airbus A340 geklebt, welcher bei Cathay Pacific daraufhin einige Jahre im Serienbetrieb getestet wurde. Im Ergebnis zeigte dieses Flugzeug einen um 1-2 % reduzierten Treibstoffverbrauch, obwohl nur 30 % der Oberfläche mit der Folie versehen werden konnten und mit der Folie zusätzliches Gewicht auf das Flugzeug gebracht wurde, was dem Einspareffekt entgegenwirkte. Bereits 1987 wurde die Riblet-Technologie für den Yachtbau erprobt indem die Segelyacht „Stars & Stripes“ mit einer Riblet-Folie beklebt wurde und damit den America's Cup gewann. Weitere Anwendung findet die Riblet-Technologie bei der Herstellung von Schwimmanzügen (Fa. FLUENT).

2. Projektergebnisse

Das IFAM betreute das Projekt von der gesamten FuE-Seite her und koordiniert die einzelnen Projektschritte. Die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA) ist für die Strömungssimulation zuständig und hat praktische Versuche im Modellmaßstab durchgeführt. Die Beluga Fleet Management GmbH & Co. KG sowie die Emden Werft und Dockbetriebe GmbH begleiteten das Projekt von der schiffbaulichen Seite und stellten die

notwendigen maritimen Gegebenheiten für Praxistests zur Verfügung. Die Fahrion Produktionssysteme GmbH & Co. KG übernahm im Projekt die Entwicklung der großtechnischen Steuerungsanlage für den späteren Einsatz in der Werft.

Numerische Berechnungen und Modellversuche zur Optimierung und Überprüfung der Wirksamkeit reibungswiderstandsreduzierender Lacksysteme

Die Versuche wurden im großen Hydrodynamik- und Kavitationstunnel der HSVA durchgeführt. Der 7.42 m lange Prüfkörper bestand aus hölzernen An- und Ablaufteilen und die Prüfoberfläche bestand aus zwei jeweils 3 m langen Aluminiumrohren von 500 mm Durchmesser, die von vorn bzw. hinten auf eine Unterkonstruktion geschoben wurden. Abbildung 8, zeigt den Prüfkörper fertig vorbereitet.



Abbildung 8: Prüfkörper für Simulationsversuche

Der Prüfkörper wurde mit Wassergeschwindigkeiten bis über 10 m/s angeströmt. Die Geschwindigkeitsmessung (VZuströmung) erfolgte dabei unter Anwendung des Gesetzes von Bernoulli durch Messung des Abfalls des statischen Drucks in der Düse vor der Tunnelmessstrecke. Diese Geschwindigkeit wurde nach der Kontinuitätsgleichung für die Messstreckenversperrung durch den Prüfkörper korrigiert ($V_{\text{neben dem Körper}}$). Ziel des Versuchsauf-

baus war die Erreichung möglichst hoher Reynoldszahlen Re , um die Widerstandsunterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächen unter möglichst schiffsähnlichen Verhältnissen zu untersuchen. Hierzu ist eine hohe Reynoldszahl wichtig, weil der Reibungs-Widerstandskoeffizient C_F sich mit der Reynoldszahl bekanntermaßen verändert und am Schiff wegen der großen Schiffskörperlänge eine hohe Reynoldszahl erreicht wird.

In Abb. 9 ist zunächst der Gesamt-Prüfkörperwiderstand für beide Oberflächen über der Strömungsgeschwindigkeit neben dem Prüfkörper aufgetragen.

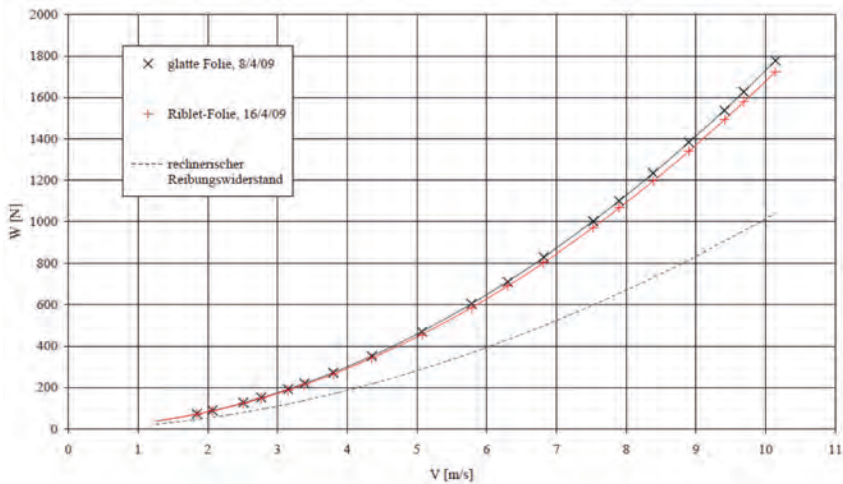


Abbildung 9: Gesamt-Körperwiderstand in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Neben dem Reibungswiderstand der Prüfbeschichtung beinhaltet dieser Widerstand natürlich auch Anteile aus der Reibung an den An- und Ablaufteilen, sowie Druckwiderstände infolge der unvermeidbaren Strömungsablösung am Schwanzende des Prüfkörpers.

Diese hier nicht interessierenden Widerstandsanteile dürfen für alle Messreihen als gleich angesehen werden, insofern beruht der Widerstandsunterschied nur auf dem unterschiedlichen Reibungswiderstand der jeweiligen Prüfbeschichtung. Dieser Reibungs-Widerstandsunterschied ΔW_{reib} relativ zum Gesamt-Reibungswiderstand ist in Abb. 10 über der Reynoldszahl dargestellt. Da der Gesamt-Reibungswiderstand einer Prüfbeschichtung nicht isoliert gemessen werden kann, wurde dieser nach der allgemein anerkannten TTCReibungslinie abgeschätzt. Der rechnerische Reibungswiderstand ist in Abb. 9 als gestrichelte Linie eingetragen.

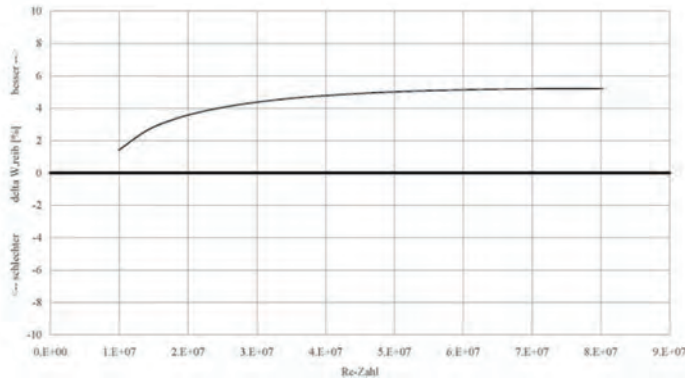


Abbildung 10: Reibungswiderstandsverringern

Abbildung 10 zeigt das Endergebnis der Untersuchung. Nach oben abgetragen ist die prozentuale Reibungswiderstandsverringern infolge der Riblet-Strukturierung. Man erkennt eine mit steigender Reynoldszahl größer werdende Widerstandsabnahme, die sich asymptotisch einem Grenzwert anzunähern scheint. Bei der maximal im HYKAT realisierten Reynoldszahl von $8 \cdot 10^7$ (entsprechend einer Wassergeschwindigkeit von 10,1 m/s) erreicht die reibungswiderstandsreduzierende Wirkung der Riblet-Strukturierung bereits 5,2 % des Gesamt-Reibungswiderstandes. Dieser Wert liegt weit oberhalb des Grenzwertes von 2 %, der für die Fortsetzung des Vorhabens gefordert worden war.

Auch Verschleißversuche haben gezeigt, dass der Gesamt-Reibungswiderstand erhalten bleibt. Es zeigte sich, dass der Effekt der Riblet-Strukturierung mit zunehmendem Verschleiß der Struktur etwas abnahm und bei Zerstörung der Riblet-Struktur die Eigenschaften nicht mehr vorliegen (siehe Abbildung 11)

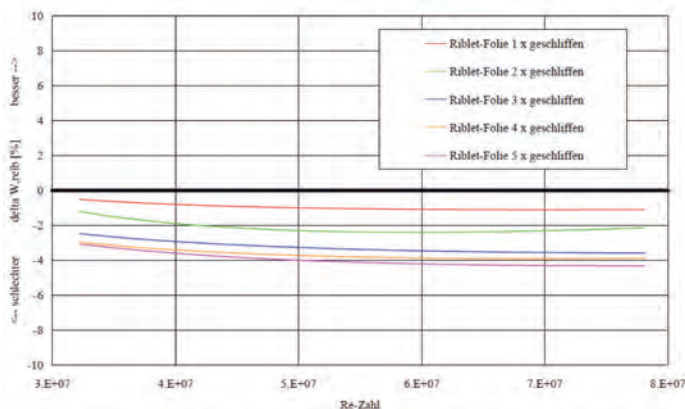


Abbildung 11: Reibungswiderstandsveränderung gegenüber einer neuwertigen Riblet-Oberfläche

Entwicklung eines UV Dual Cure Lacksystem mit Anti-Fouling Wirkung

Die Entwicklung eines Beschichtungssystems für Riblet-Strukturen für den maritimen Einsatz war Bestandteil des Projektes. Bisherige Versuche zur Erzeugung von Riblet-Strukturen im Labormaßstab beruhten auf einem Dual-Cure-System, das heißt einem Lackmaterial, welches sowohl strahlenhärtende (UV-Licht) Anteile als auch chemisch härtende Anteile aufweist. Diese Kombination war notwendig, da nur der chemisch härtende Anteil (z.B. Polyisocyanat/Polyol oder Epoxy-Polyamin) das Potenzial zur Erzeugung von Lackfilmen mit hoher Haftung, Zähigkeit und Abriebfestigkeit aufweist und der strahlenhärtende Anteil (z.B. Polyacrylat) dafür sorgt, dass der Lack nach der Bestrahlung seine Klebrigkeit verliert und die aufgeprägte Form behält. Die Beschichtung hat die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Applizierbarkeit unter Werftbedingungen
- Integration von Anti-Fouling Funktionalität (durch Absenkung der Oberflächenenergie und Einsatz von bioziden aber nicht toxischen Wirkstoffen)
- Hohe Abriebbeständigkeit und Langzeitbeständigkeit gegenüber See- und Süßwasser
- Erosionsfestigkeit der Riblet-Struktur

Das Lacksystem für die Ribletbeschichtung wurde auf Basis mehrerer Auslagerungsversuche weiterentwickelt. Dabei kristallisierten sich zwei unterschiedliche Ansätze als erfolgversprechend heraus. Zum einen konnte über den gesamten Bewuchszeitraum eine biozidhaltige Lackbeschichtung frei von Bewuchs gehalten werden, zum anderen zeigten abrasionsbeständige biozidfreie Beschichtungen, die Bürsten- und Hochdruckwasser (HDW)-Reinigungen unterzogen wurden, gute Ergebnisse. Auf dieser Grundlage wurden hauptsächlich zwei verschiedene Grundsysteme (biozidhaltig und biozidfrei) ausgewählt, die den Weg zu einem passenden Bewuchsschutz für diesen aus technischer Sicht höchst anspruchsvollen Ribletlack weiter eingrenzen sollten. Der Einsatz von Bioziden ist auf lange Sicht gesehen sicherlich nicht zukunftsfruchtig, um eine erste gute Einschätzung der Funktionsweise der Riblets am Schiff zu erhalten, sprich Verringerung des Reibungswiderstandes und dadurch Verringerung der Treibstoffkosten etc., war die Verwendung von Bioziden zunächst vertretbar.

Dabei muss bei der Wahl der Biozide auf deren Stabilität und Verarbeitbarkeit unter UV-Lichteinwirkung geachtet werden. Als passende Biozide wurden daher Kupferthiocyanat, Irgarol 1051, Zinkpyrithion und quartäre Ammoniumsalze identifiziert, die in verschiedenen Kombinationen getestet werden (Abb. 12).



Abbildung 12: Biozidhaltige Ribletbeschichtungen nach mehreren Monaten statischer Auslagerung

Im biozidfreien Ansatz wurden fünf Lacksysteme aufgestellt, die unterschiedliche Eigenschaften von abrasionsbeständigen, gut reinigbaren Beschichtungen bis zu weicheren, silikonhaltigen Antihaftbeschichtungen aufwiesen. Dabei wurde ein Grundsystem jeweils mehr oder weniger mit harten (stark vernetzende Bindemittel, Partikel) bzw. weichen Bestandteilen (wenig vernetzende Bindemittel, Silikone) modifiziert, so dass man optimale Beschichtungssysteme erhielt (Abb. 13).

Die Auslagerungsergebnisse zeigten, dass die weicheren Beschichtungen nach einem Monat weniger Bewuchs aufwiesen als die härteren. Durch Bürsten- bzw. HDW-Reinigung konnte dieser Bewuchs wieder beseitigt werden. Auch durch die dynamischen Auslagerungen konnte der Bewuchs wieder deutlich vermindert werden (Abb. 13).

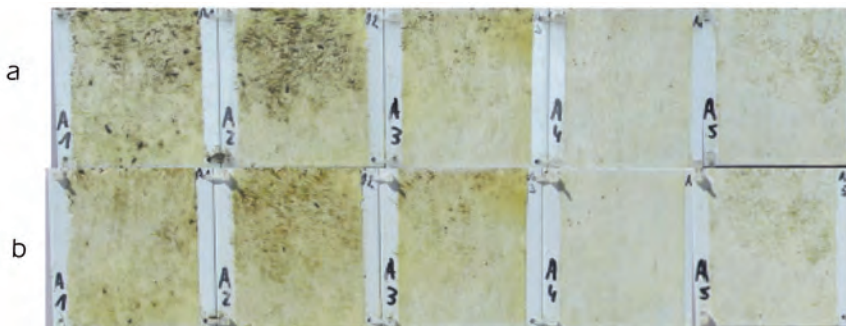


Abbildung 13 a) Biozidfreie Beschichtungen nach 12 Wochen statischer Auslagerung b) Biozidfreie Beschichtungen nach 12 Wochen statischer Auslagerung gefolgt von 30 min dynamischer Auslagerung bei einer Geschwindigkeit von 10 kn.

Zum anderen wurden beschichtete Platten an einem Versorgungsschiff Frisia VII angeklebt. Dieses Schiff fährt zwischen den Nordseeinseln und die Prüfplatten wurden unter realen Bedingungen ausgelagert. Dieser Auslagerungsversuch soll die dynamischen Versuche bei Limnmar unterstützen und zusätzliche Aussagen über die Abrasionsbeständigkeit der Beschichtung machen zu können. Die Auslagerungsergebnisse liegen erst April 2012 vor.

Applikationstechnik

Die Möglichkeit, Ribletstrukturen schnell, automatisiert und ausreichend präzise aufzutragen ist eine entscheidende Voraussetzung zur wirtschaftlichen Nutzung der Riblet-Technologie in der maritimen Wirtschaft. Die Anforderungen an die Auftragstechnik waren:

- Präzise Ausformung der Mikrostrukturen
- Kontinuierlicher und schneller Prozess
- Automatisierbarkeit
- Bearbeitung von doppelt gekrümmten Flächen

Im Rahmen des Projektes wurde ein weiterer Prototyp eines Applikationsgerätes für Ribletstrukturen auf Basis von teilweise strahlenhärtenden Lacken entwickelt. Das Handhabungssystem, bestehend aus Hardware und Steuerung, führt den Applikator über die Schiffswand. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Handhabungstechnik dient dazu, Testflächen an Schiffsrümpfen zu beschichten und Erfahrungen für den Einsatz der Auftragstechnik unter schiffbaulichen Bedingungen zu gewinnen.



Abbildung 14: Applikator und senkrechte Roboterapplikation unter Laborbedingungen

Die Strukturierung von typischen Schiffbauoberflächen durch Roboterapplikation konnte im Labormaßstab nachgewiesen werden und mittels Feldversuche abgeglichen werden. Abbildung 14 zeigt die Roboterapplikation unter Laborbedingungen.

Applikation unter Werftbedingungen

Die entwickelte Beschichtungsanlage wurde unter Werftbedingungen eingesetzt um große Testflächen zu beschichten. Die Applikationsversuche fanden im Schwimmdock der Emdor Werft und Dockbetriebe GmbH statt und haben gezeigt, dass unter Werftbedingungen eine einwandfreie Applikation des Lacksystems und Aushärtung unter UV-Bedingungen möglich ist.

Abbildung 15 zeigt das Schwimmdock, wo die Applikationsversuche stattgefunden haben.



Abbildung 15: Applikation unter Werftbedingungen im Schwimmdock in Emden

Die unter Laborbedingungen hergestellten Riblettstrukturen konnten unter Werftbedingungen reproduzierbar und nachhaltig hergestellt werden.

In Abbildung 16 ist die Applikation und die Riblet-Beschichtung im Schwimmdock dargestellt.



Abbildung 16: Applikation Riblet-Beschichtung unter Werftbedingungen

3. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von HAI-Tech ist es dem Projektkonsortium gelungen, eine erosionsbeständige Riblet-Beschichtung mit Antifoulingwirkung für den maritimen Bereich zu entwickeln und eine reproduzierbare und prozesssichere Applikationsmethode zu konstruieren, welche die derzeitigen technischen Marktanforderungen im vollen Umfang erfüllt.

Vergleichende Widerstandsmessungen (Simulationsberechnungen), um die reibungswiderstandsreduzierende Wirkung einer Ribletstrukturierten Oberfläche im Bereich schiffsrelevanter Reynoldszahlen zu untersuchen, wurden durchgeführt. Diese zeigten, dass mit steigender Reynoldszahl eine zunehmende Reibungswiderstandsabnahme zu beobachten war, die bei der maximal im Versuch realisierten Reynoldszahl von $8 \cdot 10^7$ einen Wert von 5.2 % erreichte. Aufgrund der außergewöhnlichen und sehr sorgfältigen Versuchsdurchführung stellen die Messungen für schiffsrelevante Reynoldszahlen eine in dieser Qualität nie dagewesene Bestätigung des widerstandsreduzierenden Effektes der Riblet-Strukturierung dar.

Die automatische Beschichtung von großen Bauteilen mit mikrostrukturierten Lacken war bislang nicht Stand der Technik in der Schifffahrtsindustrie. Diese Applikationstechnik stellt somit eine Innovation in der maritimen Technik dar.

4. Literatur

- [1] W. Hage, Dissertation, Berlin 2004
- [2] D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J.G.T. van der Hoeven, G. Hoppe, „Experiments on dragreducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry“, J. Fluid Mech. Vol. 338 (1997) 59-87
- [3] J. Muhle, T. Frey, M. Wulf: „Dauerhafter Glanz – UV-härtende Serienlackierung für komplette Karosserien“, Farbe und Lack 10/2003, S. 18-24
- [4] C. Roscher, C. Eger „SiO₂ –Nanokomposite, Neue Wege zu vielseitigen Hochleistungsbeschichtungen“, Tagungsband Nanotechnologie in der Lackpraxis, 29.06.2004, Stuttgart
- [5] J.-E.Lee, J.-W. Kim, J.-H. Jun, H.-H. Kang, S.-G. Oh, K.-D. Suh, Colloid Polym. Sci., 2004, 282-295
- [6] J. C. Tiller, „Nonreleasing Microbiocidal Coatings“, Proceedings European Coatings Conference Smart Coatings V, Berlin 2006

HYDROS – Lastgesteuerte hydrostatisch-hydrodynamische Radialgleitlager für Pod-Antriebe

Dipl.-Ing. P. von Bergen, Blohm + Voss Industries GmbH; Dr. L. Knippschild, Prof. Dr.-Ing. habil. K. Brökel, Universität Rostock; Dr.-Ing. R. Wegmann, Universität Rostock; Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach, TU Dresden; Prof. Dr.-Ing. J. Weber, TU Dresden; Dipl.-Ing. S. Gold, TU Dresden, Institut für Fluidtechnik

1. Einleitung

Azipod-Antriebe haben sich gegenüber konventionellen Antrieben im Schiffbau etablieren können, insbesondere bei Kreuzfahrtschiffen und Eisbrechern, wobei ein Trend auch in Richtung anderer Schiffstypen zu erkennen ist. So wurden bislang ca. 150 Azipod-Antriebe mit Antriebsleistungen bis 21 MW und Einzelgewichten von bis zu 350 t bei Kreuzfahrtschiffen und Eisbrechern eingesetzt (Bild 1). Pod-Antriebe haben eine sehr kompakte Bauweise und sind um 360° schwenkbar.



Bild 1: Pod-Antrieb der Firma ABB Marine, Helsinki

Ziel des Entwicklungsprojektes ist die Berechnung und die experimentelle Verifikation von statisch und dynamisch belasteten sowie turbulent und laminar durchströmten hydrostatischen und hydrodynamisch wirkenden Radialgleitlagern für schwere Schiffswellen in Pod-Antrieben. Im Kern des Vorhabens stehen folgende Zielsetzungen: Erhöhung der Dockungsintervalle von derzeit ca. 2,5 Jahre auf 5 Jahre bei 6.000 bis 7.000 jährlichen Betriebsstunden, Verbesserung der Schwingungs- und Vibrationseigenschaften, Reduzierung der Baugröße um ca. 10 % (von Wälzlagern zu hydrostatischen Lagern) sowie Verringerung der bewegten Massen. Diese Zielsetzungen sind bei unterschiedlichen Lastzuständen mit möglichst konstantem Lagerspiel im Bereich von 0,15 bis 0,3 mm zu erreichen. Derzeit werden diese Lager bei Pod-Antrieben weltweit ausschließlich als Pendelrollenlager (Wälzlager) ausgeführt.

Das klassische Stevenrohrlager, welches mit einem Breiten-Durchmesser-Verhältnis von ca. 2 traditionell als hydrodynamisch geschmiertes Gleitlager ausgelegt ist, und sonst sehr zuverlässig arbeitet, ist aus Platzgründen hier nicht einsetzbar. Deshalb werden bisher große Wälzlager genutzt, welche jedoch an die Grenze ihrer Belastbarkeit gelangen. Daraus resultierte die Idee des Einsatzes kombiniert hydrostatisch-hydrodynamischer Gleitlager aufgrund ihrer kompakten Bauweise und ihrer Fähigkeit, auch bei kleinen Drehzahlen hohe Lasten aufzunehmen.

Diese Aufgabe wird im Rahmen des Projekts HYDROS realisiert. Daran beteiligt sind die Firmen Blohm + Voss Industries in Hamburg (BVI) und ABB Marine in Helsinki, das Institut für Fluidtechnik (IFD) und das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden sowie der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD (KTCAD) der Universität Rostock.

2. Anforderungen an ein Propellerwellenlager für große Schiffe mit Pod-Antrieb

Die wichtigsten Forderungen an die Wellenlagerung in Pod-Antrieben sind eine robuste Betriebsweise bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und eine hohe Lebensdauer. Entscheidend ist die Vermeidung von Kontakt zwischen Welle und Lagerschale und damit von Verschleiß.

Für die Entwicklung von hydrostatisch-hydrodynamischen Gleitlagern zum Einsatz in der Schiffstechnik ergeben sich folgende charakteristische Eckdaten:

Wellendurchmesser	> 710 mm	Lebensdauer	≥ 80.000 h
Statische Lagerkraft	875 kN	Lagerbreite	ca. 200 mm
Kurzzeitige Lagerkräfte	2.400 kN	Antriebsleistung	20 MW
Umgebungstemperatur	ca. 65°C	Wellendrehzahl	137 min ⁻¹

Hohe Zuverlässigkeit des Gleitlagers schließt gute Notlaufeigenschaften ein. Das bedeutet, dass auch bei einem Ausfall der Hochdruck-Ölversorgung das Lager funktionsfähig bleiben muss, um Verschleiß und somit eventuelle Lagerschäden zu vermeiden. Ein rein hydrostatisches Lager kann diese Bedingung nicht erfüllen. Dessen große Lagertaschen führen zu kleinen Restflächen der Lagerschale, auf denen sich kein ausreichender hydrodynamischer Schmierfilm aufbauen kann. Um die Vorteile des hydrostatischen Lagerprinzips wie hohe Tragfähigkeit und Dämpfung mit den guten Notlaufeigenschaften eines hydrodynamischen Lagers zu verbinden, entstand die Idee eines Hybridlagers.

Im Vordergrund der Entwicklung steht die Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer derartiger kombinierter Lager, wobei die dadurch erreichbaren Notlaufeigenschaften für den Schiffsbetrieb ein Novum darstellen. Hydrostatische und hydrodynamische Lager haben in ihrer üblichen Gestaltung gegenläufige Gestaltungsmerkmale und dementsprechend auch speziell darauf abgestimmte Berechnungsmethoden. Daher war es notwendig, neue Simulationsverfahren für Hybridlager zu entwickeln, so dass die physikalischen Merkmale beider Lagertypen hinreichend genau abgebildet werden können.

3. Konzept eines kombinierten hydrostatisch-hydrodynamischen Gleitlagers

Das Hybridlager ist durch eine durchgehende zylindrische Lagerfläche gekennzeichnet, auf der über den Lagerumfang verteilt schmale axial ausgerichtete Schmiernuten angeordnet sind. Das CAD-Modell des ersten Versuchsträgers ist im Bild 2 dargestellt. Die Schmiernuten versorgen den Schmierspalt sowohl im hydrostatischen als auch im hydrodynamischen Betrieb mit Öl. Da sie immer annähernd auf einer Isobaren des Schmierfilmdrucks liegen, wird verhindert, dass sie als Kurzschlussleitung zwischen verschiedenen Druckniveaus innerhalb des Druckbergs wirken. Die Zuleitungen zu den Schmiernuten sind mit Rückschlagventilen versehen. Somit wird im hydrodynamischen Betrieb trotz der Nuten ein geschlossener Druckberg ausgebildet, da das Öl nicht in die Versorgungsleitungen zurückfließen kann. Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Schmiermittelversorgung eines Hybridlagers. In [1] ist das Konzept des Hybridlagers ausführlich beschrieben.

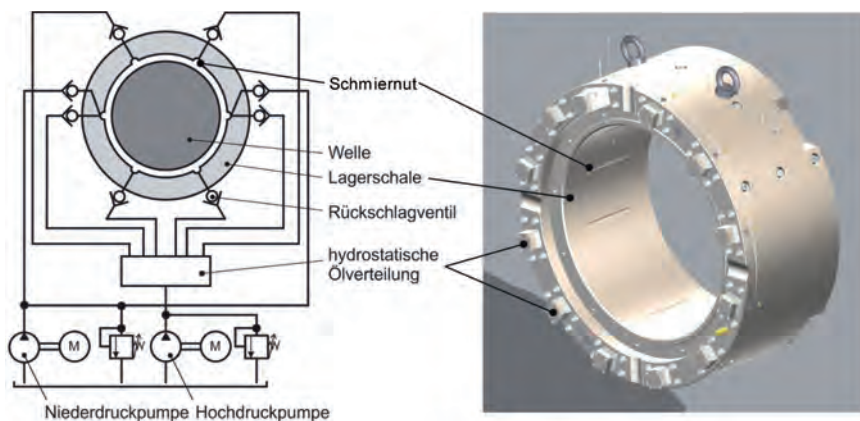


Bild 2: Hybridlager - Prinzip der Schmiermittelversorgung und CAD-Modell des ersten Prototyps

Entsprechend der zwei Betriebsmodi wird das Lager mit zwei verschiedenen Druckniveaus betrieben. Eine Hochdruckpumpe sorgt bei stehender oder langsam drehender Welle dafür, dass der hydrostatische Tragdruck zur Verfügung steht. Bei hinreichend hoher Wellendrehzahl ist eine Niederdruckversorgung ausreichend, um die Leckage im Lager zu ersetzen, was einen energieeffizienten Betrieb ermöglicht.

Im hydrostatischen Betrieb ist eine geregelte Verteilung des Ölstroms auf die einzelnen Schmiernuten in Abhängigkeit von Größe und Richtung der Lagerbelastung erforderlich. Die klassische Variante - konstante Strömungswiderstände, z.B. Kapillaren, vor jeder Lagertasche - ist jedoch aufgrund des hohen Volumenstrombedarfs energetisch sehr ungünstig. Bei einem Lager dieser Größenordnung können dabei Ölströme von einigen hundert Litern pro Minute erforderlich werden. Deshalb gibt es Bestrebungen, den Volumenstrom gezielt zu steuern und somit deutlich zu senken, um eine energiesparende Lagervariante zu entwickeln. Zur lastabhängigen Ölversorgung der Schmiernuten können verschiedene Strömungswiderstände bzw. Steuerungskonzepte genutzt werden. Drei Varianten wurden aus einer Vielzahl an Lösungsvorschlägen ausgewählt, um sie simulationstechnisch zu untersuchen, weiterzuentwickeln und am Prüfstand zu erproben:

- Ein kombiniert hydrostatisch-hydrodynamisches Lager mit vom Taschen- druck gesteuerten Membrandrosseln („Progressiv-Mengen-Reglern“) im Zulauf jeder Lagertasche.
- Ein nur über den unteren Bereich der Lagerschale mit hydrostatisch versorgten Schmiernuten ausgerüstetes Lager, ähnlich einer qualifizierten Anfahrhilfe.

- Ein kombiniert hydrostatisch-hydrodynamisches Lager mit vom Taschen-
druck gesteuerten mechanischen Schieberventilen („Druckwaagen“) im
Zulauf jeder Lagertasche.

Wegen der Baugröße des Lagers wurden im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen umfangreiche theoretische Betrachtungen durchgeführt, um das Entwicklungsrisiko und den Erprobungsaufwand am Prüfstand so gering wie möglich zu halten. Dies erfordert die zuverlässige Berechnung der Strömung in einem kombinierten hydrostatisch-hydrodynamischen Lager, wofür die Entwicklung neuer Modellierungsansätze notwendig wurde. Um bei der Voraussage des Lagerverhaltens ein hohes Maß an Sicherheit zu erzielen, kommen verschiedene Simulationswerkzeuge zum Einsatz, die sich gegenseitig ergänzen und absichern. Die mathematische Modellierung der Strömungsvorgänge im Lager erfolgt in Zusammenarbeit der Projektpartner KT-CAD, BVI (Frau Prof. Bordag, Dr. Knippschild) und IFD. Die numerische Analyse der komplexen Lagerströmung wird unter Verwendung der drei Simulationswerkzeuge SIRIUS, ANSYS FLUENT und SimulationX durchgeführt. Zusätzlich wurden die Strömungen in den Schmiermittelkanälen mit vereinfachten mathematischen Ansätzen beschrieben. Dies dient der Generierung qualitativer Informationen über das prinzipielle Strömungsverhalten.

In CFD-Programmen erfolgt die Abbildung dreidimensionaler Strömungen anhand der Navier-Stokes-Gleichungen (Impulserhaltung), der Kontinuitätsgleichung (Masseerhaltung) sowie der Energieerhaltungsgleichung mit den entsprechenden Randbedingungen. Die Erhaltungsgleichungen können wie folgt aufgeschrieben werden:

$$\text{Masseerhaltung} \quad 0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j)$$

$$\text{Impulserhaltung} \quad 0 = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_i \cdot u_j - \tau_{ij}) + \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$\text{Energieerhaltung} \quad 0 = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot h) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \cdot \tau_{ij}) - S$$

In der klassischen Gleitlagertheorie nach Reynolds gelten eine Vielzahl von Einschränkungen, die speziell auf die Verhältnisse im Schmier-spalt abgestimmt sind. Sie sind die Basis für die Reynoldssche Differenzialgleichung zur zweidimensionalen Beschreibung des Schmier-spalts, die in einer erweiterten und leistungsfähigeren DGL-Version in das Programm SIRIUS eingebaut wurde:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \left[(U_1 + U_z) \frac{\partial h}{\partial x} + 2 \frac{\partial h}{\partial t} \right]$$

Wesentliche Zielstellung der Modellierungsarbeiten ist die Bereitstellung geeigneter Werkzeuge zur Auslegung und Gestaltung der neuen Lagerungs-

arianten ([2], [3]). Mit ANSYS FLUENT z.B. wird die dreidimensionale Lagerströmung simuliert. Das speziell für die Berechnung von Gleitlagern entwickelte Programm SIRIUS dient der zweidimensionalen Modellierung des Lagerspalts. Beide Programme ergänzen sich und sichern sich gegenseitig ab. SIRIUS als spezialisiertes Gleitlagerberechnungsprogramm bietet Schnelligkeit und Flexibilität, während berechenbaren Details mit ANSYS FLUENT nicht erzielbar sind. Die Kombination beider ermöglicht eine verlässliche Untersuchung des hydrostatisch-hydrodynamischen Hybridlagers. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Programme wird im Bild 3 verdeutlicht. Dort ist exemplarisch die Druckverteilung im Lagerspalt eines Hybridlagers mit Progressiv-Mengen-Reglern dargestellt.

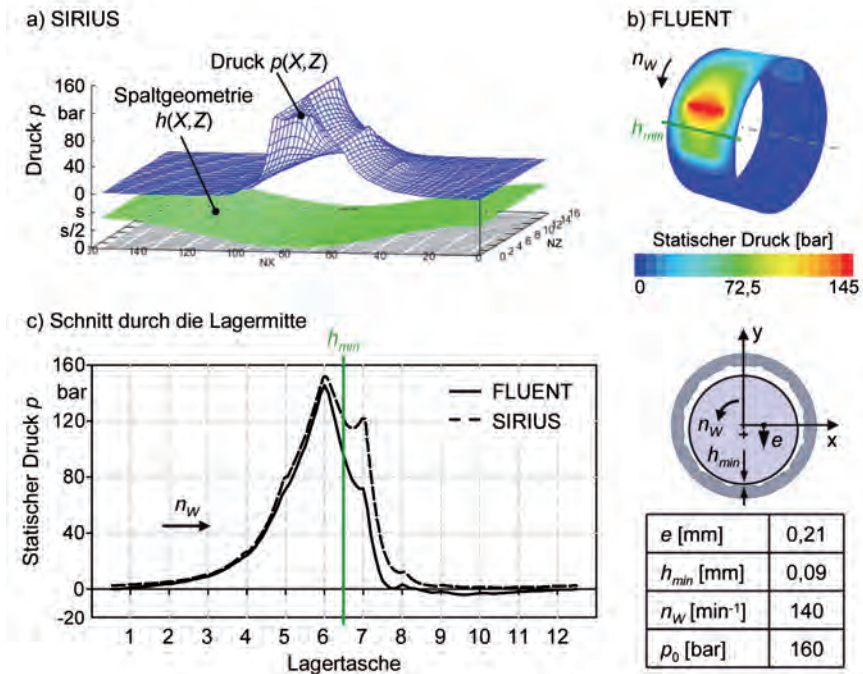


Bild 3: Druckverteilung entlang des Lagerumfangs im hydrostatisch-hydrodynamischen Hybridlager mit PM-Reglern

Aus dem Druckverlauf im Schmierpalt werden das Betriebsverhalten des Lagers charakterisierende Größen wie Tragfähigkeit, Ölverbrauch und Leistungsbedarf berechnet. Dies sind wichtige Kriterien für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Lagerentwürfe und somit für die erfolgreiche Entwicklung eines neuen Gleitlagerkonzepts.

4. Entwicklung und Realisierung eines Schwerlast-Prüfstandes für Schiffswellenlager

Zur Verifizierung der analytischen und numerischen Berechnungsergebnisse dienen umfangreiche experimentelle Untersuchungen an prototypischen Hybridlagern für Wellendurchmesser von bis zu 770 mm, die in Pod-Antrieben der Schifffahrt gängig sind. Erst diese maßstabsgetreuen Versuche ermöglichen eine realitätsnahe Nachbildung der Lagerdeformationen und der Druckverhältnisse im Schmierpalt unter betriebsnahen Belastungsbedingungen. Für die Durchführung dieser Versuche wurde am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Verbundpartnern ein Schwerlast-Prüfstand für Schiffswellenlager konzipiert, entwickelt und gebaut.

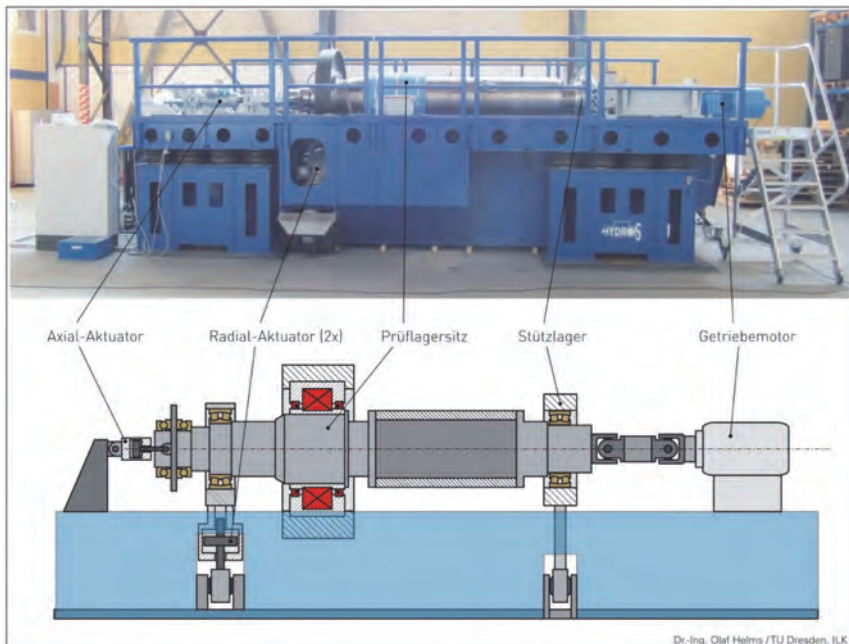


Bild 4: Ansicht und prinzipieller Aufbau des Schwerlast-Prüfstandes

Der realisierte Schwerlast-Prüfstand für Schiffswellenlager sowie dessen prinzipielle Funktionsweise sind in Bild 4 dargestellt. Die Lagerung der umlaufenden Prüfstandswelle erfolgt dabei analog zu den realen Lagerungsbedingungen im Pod-Antrieb an zwei Positionen – am Stützlager und am Prüflager, deren Lagergehäuse jeweils fest mit dem Prüfgestell der Versuchseinrichtung verbunden sind. An der Position des Propellers im Pod-Antrieb befinden sich im Prüfstand zwei senkrecht zur Wellenachse angeordnete Hydraulikaktuatoren, die zur Erzeugung von umlaufenden Radiallasten

dienen. Diese Aktuatoren sind über sphärische Lager mit dem Prüfgestell verbunden. Darüber hinaus greift an der Stirnseite der Welle ein parallel zur Wellenachse angeordneter Hydraulikaktuator an, der die Welle zu Axial-schwingungen anregen kann. Damit können am Prüflager sowohl Radiallas-ten von bis zu 2400 kN als auch Axialschwingungen der Welle erzeugt werden. Des Weiteren kann durch eine vertikale Verschiebung des Stützlagergehäuses eine definierte Schiefstellung der Welle im Bereich des Prüflagers erreicht werden, um das Verhalten des Prüflagers bei einer Ver-kantung zu untersuchen. Eine thermische Belastung der Welle im Bereich des Prüflagers, wie sie in Pod-Antrieben durch die Abwärme des Elektromo-tors an der Welle auftritt, kann an der Prüfstandswelle mithilfe einer elektri-schen Heizung realisiert werden.

Für die Dimensionierung der hochbeanspruchten Hauptkomponenten des Prüfstandes wurden am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik umfang-reiche numerische Finite-Elemente-(FE)-Berechnungen durchgeführt. Die Festigkeitsanalyse für die zahlreichen hochbeanspruchten Schraubenver-bindungen stellte dabei eine besondere Herausforderung dar, da die kom-plexe Gestalt der Fügepartner meist keine analytische Auslegung der Schrau-benverbindung nach der VDI-Richtlinie 2230 erlaubte. Ein Beispiel bil-det die Auslegung der Schraubverbindung des zweiteiligen Prüflagergehäu-ses, die mithilfe aufwändiger FE-Modelle erfolgte (vgl. Bild 5).

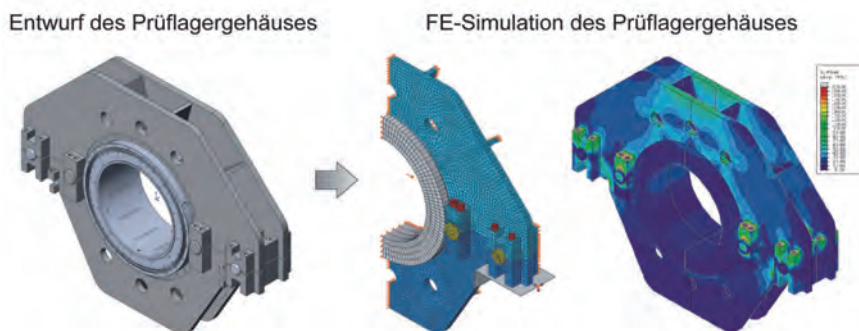


Bild 5: FE-Simulation des Prüflagergehäuses

Die Auslegung der hydraulischen Komponenten sowie die Programmierung der elektrischen/elektronischen Steuerung und Messtechnik des Prüfstandes erfolgten maßgeblich durch das Institut für Fluidtechnik (IFD) in enger Zu-sammenarbeit mit den Verbundpartnern [4]. Zur messtechnischen Ausrüs-tung gehören unter anderem Wegsensoren am Prüflagergehäuse zur Ver-messung der Schmierpaltdicke über den Umfang des Prüflagers sowie Drucksensoren zur Überprüfung der Drücke in den Schmiernuten des Prüfla-gers als auch deren Zu- und Abläufen. Darüber hinaus dienen zahlreiche

Temperatursensoren wie etwa in den Schmieraschen des Prüflagers sowie im Prüflagerbereich an der Welle zur Erfassung der Temperaturen. Auch die Öltemperaturen in den Zu- und Abläufen als auch im Ölbehälter können mithilfe von Sensoren gemessen werden. Für die Messung des Gesamtölstroms und eines Teilstroms, z.B. in eine Schmiernut, stehen zwei Volumenstromsensoren zur Verfügung. Die Steuerung zum Betrieb des Versuchsstandes liefert neben weiteren internen Messdaten die aufgebrachte Lagerbelastung, die Wellendrehzahl und das Wellenantriebsmoment.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den wesentlichen Abmessungen und Leistungsparametern des entwickelten Schwerlast-Prüfstandes für Schiffswellenlager.

Abmessungen und Masse		
Aufstellfläche (ohne Schaltschränke und Hydraulikaggregate)	9,0 x 3,6	m ²
Durchmesser der Welle im Bereich des Versuchslagers	770	mm
Masse	45	t
Leistungsparameter		
Max. Radialkraft am Prüflager	2.400	kN
Max. Ölstrom zur Versorgung des Prüflagers	60	l/min
Max. Ölversorgungsdruck des Prüflagers	220	bar
Installierte Pumpenleistung der Ölversorgung des Prüflagers	25	kW
Max. Wellendrehzahl	140	U/min
Antriebsleistung des Drehantriebs	45	kW
Antriebsleistung der hydraulischen Krafterzeugung	2 x 55	kW
Wellenheizleistung	5	kW

Tabelle 1 : Abmessungen und Leistungsparameter des Prüfstandes

5. Stand der Arbeiten und Ausblick

Ausgangspunkt der Arbeiten war der Entwurf eines lastgesteuerten hydrostatischen Lagers mit einem Steuerring zur Volumenstromsteuerung [5]. Der Entwurf wurde im Rahmen des Projekts HYDROS ausführlich simulationstechnisch untersucht und seine prinzipielle Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Die Berechnungen zeigten jedoch auch, dass das Konzept fertigungstechnisch nicht realisierbar ist. Daraufhin wurden verschiedene Lösungsalternativen entwickelt und anhand gemeinsam erarbeiteter Kriterien auf ihre Umsetzbarkeit hin bewertet. Aus den Lager- und Steuerungsvarianten wurde eine Systematisierung für die Umsetzung von hydrostatischen und hydrodynamischen Gleitlagerungen erarbeitet, welche als Grundlage für

die Ausarbeitung neuer Lösungsideen diene. Die Idee des Hybridlagers wurde zum Patent angemeldet [6]. Ausgewählte Steuerungskonzepte wurden detailliert sowohl mittels der vorliegenden Berechnungswerkzeuge als auch an einem Laborprüfstand analysiert und bewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgte die Konzeption und Konstruktion eines modularen Prüfagers, welches die Erprobung der drei zu untersuchenden Steuerungskonzepte am Lagerprüfstand erlaubt. Zwei weitere Versuchsträger sind geplant.

Der für die messtechnische Untersuchung der neuen Lagerlösungen konzipierte Prüfstand wurde gefertigt und montiert, ebenso der erste Lagerprototyp. Die Konzepte für die Prüfstandssteuerung sowie die Messwerterfassung wurden erarbeitet, umgesetzt und im Rahmen der Inbetriebnahme des Prüfstands erfolgreich getestet. Weiterhin wurden Vorversuche durchgeführt, welche die Leistungsfähigkeit der Versuchseinrichtung bestätigt haben.

Während der verbleibenden Projektlaufzeit von zehn Monaten sind die folgenden Arbeiten durchzuführen:

- experimentelle Erprobung des ersten Prototypen in Verbindung mit den drei ausgewählten Steuerungsvarianten
- Erarbeitung von Änderungsvorschläge für die Konstruktion der folgenden Prototypen
- Vergleich von Simulations- und Messergebnissen, Bewertung und Validierung der Simulationsmodelle
- Weiterentwicklung der Berechnungswerkzeuge auf Basis der Versuchsergebnisse, Durchführung weiterer Berechnungen
- Ableitung von Konstruktions- und Auslegungshinweisen für Radialgleitlager

Mit dem Nachweis der Einsatzfähigkeit der lastgesteuerten hydrostatisch-hydrodynamischen Radialgleitlager werden die Voraussetzungen für eine breite Etablierung dieser Antriebe im Schwerlastbereich geschaffen. So bietet der entwickelte Lösungsansatz einen erfolgversprechenden Einstieg bei der bekannten Lagerproblematik an bestehenden und in Planung befindlichen ≥ 8 MW Windenergieanlagen im Offshore-Betrieb.

6. Danksagung

Das Forschungsvorhaben HYDROS wird im Verbund mit den Projektpartnern Universität Rostock, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD (Prof. Brökel) und der Technischen Universität Dresden mit den Instituten ILK (Prof. Hufenbach) und IFD (Prof. Weber) durchgeführt. Die beteiligten Institutionen danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung und dem Projektträger Jülich für die konstruktive Zusammenarbeit.

7. Literatur

- [1] Brökel, K.; Weber, J.; Hufenbach, W.; von Bergen, E.-P.: Hydrostatisch-hydrodynamisches Gleitlagerkonzept für die Propellerlagerung in Pod-Antrieben großer Schiffe. Tagungsbeitrag. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen. Schweinfurt 2011. VDI-Berichte 2147.
- [2] Gold, S.; Weber, J.; Wegmann, R.: New hydrostatic/hydrodynamic plain bearing concept for heavy duty applications. Tagungsbeitrag. SICPF'11. Tampere 2011.
- [3] Gold, S.; Weber, J.; Wegmann, R.; Brökel, K.: Auslegungs- und Simulationsstrategien für hydrostatisch-hydrodynamische Hybridlager im Schwerlastbereich. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen. Schweinfurt 2011. VDI-Berichte 2147.
- [4] Schneider, M.; Weber, J.: Simulationsgestützte Konzeption und Auslegung eines Prüfstandes für Schwerlastlagerungen. Tagungsbeitrag. 13. ITI Symposium. Dresden 2010.
- [5] Offenlegungsschrift DE 100 30 051 A1. Hydrostatisches Radiallager für Wellen-, Schaft- und Achslagerungen. Deutsches Patent- und Markenamt.
- [6] Offenlegungsschrift DE 10 2009 012 398 A1. Radialgleitlager. Deutsches Patent- und Markenamt.

CFK Prop 6m – Entwicklung von Konstruktions-, Simulations- und Prüfverfahren für 3-D verstärkte CFK-Propellerstrukturen bis 6 m Durchmesser

Hannes Kröger, Voith Advanced Propeller Technologies GmbH & Co KG; Siegfried Bludszweit, Werner Frühlingsdorf, MET Motoren- und Energietechnik GmbH; Olaf Grewe, Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik; Steffen Bartke, Christian Kliewe, Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau

Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe haben bereits bei einer Vielzahl von Anwendungsfällen z.B. in der Luft- und Raumfahrt oder im Fahrzeugbau ihre Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen unter Beweis gestellt. Seit 1993 werden auch innovative maritime Propeller auf Basis von kohlefaserverstärkten Kunststoffen am Markt angeboten. Diese Schiffspropeller bestehen aus einer Metallnabe und „intelligenten“ CFK-Propellerflügeln. „Intelligent“ bezieht sich auf die Fähigkeit der Flügel auf Belastung mit einer sich selbst einstellenden Steigung zu reagieren, was zu besser angepassten Leistungskennlinien, höheren Gesamtwirkungsgraden und damit zu Treibstoffeinsparungen von bis zu 15 Prozent sowie einem besseren Schwingungs- und Geräuschverhalten führt.

CFK-Propellerflügel werden als Voll laminate ohne Schaumkern o.ä. hergestellt. Bis 2m Durchmesser verfügen sie über eine eher geringe Wandstärke. Bereits bei 4m Propellerdurchmesser ist im Flügelbereich von einer Wandstärke größer 120 mm auszugehen. Bei Propellern ab 6m Durchmesser wird sich diese noch einmal verdoppeln.

Bei der Fertigung von derartig dickwandigen Faserverbundstrukturen gewinnen besonders die thermischen Einflüsse im Aushärtungsprozess an Bedeutung, weil der Temperaturgradient Eigenspannungen in den Bauteilquerschnitt induziert, die zu Schäden führen können. Im Rahmen des vorliegenden Projektes war daher ein Ziel, die Exothermie während des Aushärtungsprozesses theoretisch richtig vorauszusagen und auch Maßnahmen zu entwickeln, um diese im Fertigungsprozess zu beherrschen.

Weitere Problemstellungen ergeben sich aus der Tatsache, dass an große Propeller auch hohe Anforderungen bzgl. Auslegungssicherheit, Maßhaltigkeit und Lebensdauer gestellt werden.

Die Berechnung flexibler Propeller ist durch die Wechselwirkung von Strömung und Struktur besonders anspruchsvoll und erfordert sorgfältig abgestimmte Nachrechnungsverfahren. Bisher erfolgte die Strömungsberechnung mittels reibungsfreier Verfahren. Im Rahmen dieses Projektes sollte nun eine Kopplung von viskosen RANSE-Verfahren (RANSE: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) mit der FEM-Strukturberechnung entwickelt und validiert werden, um auch komplexe instationäre Phänomene, wie z.B. Schwingungen oder das Verhalten der Flügel im Nachstromfeld detaillierter untersuchen zu können.

Die in diesem Vorhaben zu untersuchenden CFK-Propeller unterscheiden sich in zwei Punkten wesentlich von herkömmlichen Gußpropellern. Zum einen ist die Fertigungsmethodik eine andere. Es werden die Einzelflügel in Flügelformen manuell laminiert, anschließend ausgehärtet und an einer Nabe zu einem Propeller montiert. Dies bedeutet, dass die abgeformten Einzelflügel direkt die Endform besitzen und nicht durch Fräsen oder Schleifen eines Rohlings nachgearbeitet werden. Es ergibt sich also ein hoher Anspruch an die geometrische Güte der Flügelformen und der Überprüfung des Abformprozesses. Zum anderen kann der Betriebszustand nur dann erreicht werden, wenn Geometrie und Lagenaufbau den Vorgaben entsprechen und die engen Toleranzen eingehalten werden. Um diese zu überprüfen, ist daher ein weiteres Ziel, Grundlagen für ein Verfahren zur geometrischen Prüfung von CFK-Propellern und deren Komponenten auf Basis von 3D-Messtechnik und einer teilautomatisierten Datenauswertung zu entwickeln.

Die Lebensdauer der Flügel wird hauptsächlich durch Desintegration des Laminats ausgehend von den Ein- und Austrittskanten limitiert. Durch eine 3D-Verstärkung in diesen Bereichen können entscheidende Beiträge zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Laminats in z-Richtung erzielt werden. Diese Eigenschaftsverbesserungen führen zu einer effektiveren Werkstoffausnutzung wodurch sich auch das Impactverhalten verbessert. Dies schlägt sich in einer längeren Lebensdauer der Bauteile und größeren Wartungsintervallen nieder. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass 3D-Verstärkungen wirtschaftlich eingesetzt werden können, weshalb entsprechende Fertigungsverfahren zu entwickeln sind. Es war daher ein weiteres Projektziel, ein Verfahren zu entwerfen und prototypisch umzusetzen.

Simulation des Aushärtevorgangs

Zielstellung war die Entwicklung von Simulationsmodellen zur Analyse des Formpressprozesses zur Fertigung eines dickwandigen Propellerblattes aus Faserverbundwerkstoffen. Das von der MET GmbH entwickelte Simulationsmodell ermöglicht eine Berechnung der zeitabhängigen Temperatur- und

Vernetzungsgradfelder im Bauteil bei unterschiedlichen thermischen Randbedingungen. Das Simulationsmodell beinhaltet geeignete CFK und GFK Werkstoffmodelle, welche die thermischen Eigenschaften und den temperaturabhängigen Harzaushärtprozess erfassen.

Eine wesentliche Grundlage für alle durchzuführenden Simulationen ist die Kenntnis der thermischen Stoffwerte der zu verwendenden Faserverbundwerkstoffe sowie die Reaktionswärme und Reaktionskinetik des Harzaushärtprozesses (Polymerisation). Um diese zu ermitteln wurden zunächst Versuche durchgeführt.

Mit den identifizierten Materialmodellen wurde dann der Standard-Formpressprozess simuliert. Zur Prozessverbesserung wurde mit Hilfe der erstellten Simulationsmodelle der Einfluss einer inneren und äußeren Temperierung auf das zeitabhängige Temperatur- und Vernetzungsgradfeld untersucht. Es wurde dazu der Wassertemperaturzyklus optimiert. Die Ergebnisse zeigen die technischen Möglichkeiten einer Erhöhung der Bauteilqualität durch eine deutliche Reduzierung der maximalen Temperaturen und der Vernetzungsgraddifferenz im Propellerblatt auf.

Entwicklung von CFK und GFK Werkstoffmodellen

Ausgehend von der Auswahl des Harzsystems konnte dieses in Zusammenarbeit mit der Voith Turbo Advanced Propeller Technologies GmbH & Co. KG analysiert werden. Es wurden dazu 2 Versuche durchgeführt, bei welchen von der MET GmbH dünne Thermoelemente in eine GFK bzw. CFK Platte von relativ großer Dicke eingelegt und die Temperaturverläufe während des Formpressprozesses aufgenommen wurden. Diese gemessenen Temperaturverläufe bildeten die Grundlage für die Analyse des Werkstoffverhaltens und die Entwicklung von GFK und CFK Materialmodellen. Ergänzend wurde vom Harzhersteller ein DSC Diagramm zur Verfügung gestellt. Aus dem DSC Diagramm konnte insbesondere die Reaktionswärme abgelesen und für die Materialmodelle verwendet werden. Die Simulation der beiden Versuche ermöglichte eine Validierung der GFK und CFK Materialmodelle (Reaktionskinetik und Stoffwerte) durch Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturverläufe (siehe Abbildung 1).

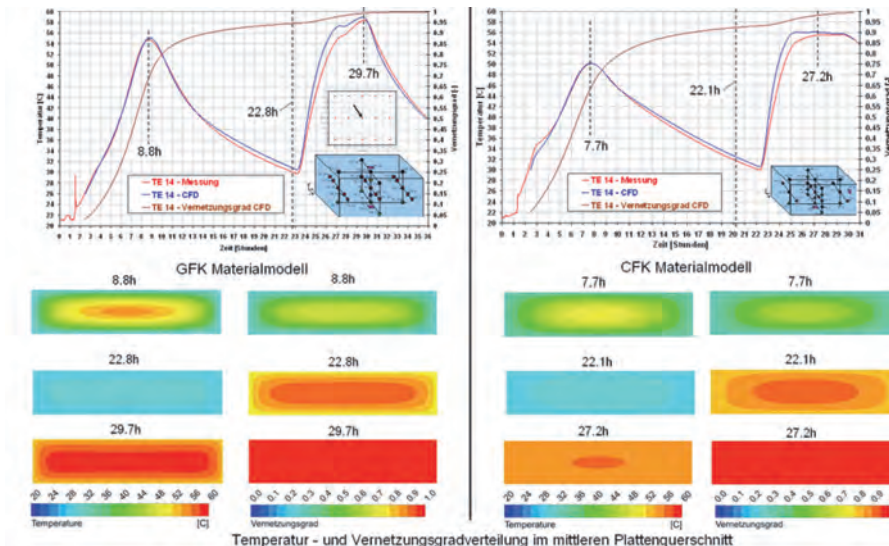


Abbildung 1: Beispiel für den Vergleich von gemessenen und simulierten Temperaturverläufen zur Validierung der GFK und CFK Materialmodelle (oben) und simulierte Temperatur- und Vernetzungsgradverteilungen im mittleren Plattenquerschnitt (unten)

Simulation des Formpressprozesses

Bei der Modellbildung des Formpressprozesses für einen Demonstratorpropellerflügel wurde der reale Schichtenaufbau von Kohle- und Glasfasern berücksichtigt. Ergänzend wurde in die Simulation des Formpressprozesses der Legevorgang in 10 Schritten integriert. Bei der Simulation des Formpressprozesses wird nach dem Legevorgang die Form geschlossen und das System sich selbst überlassen. Es erfolgt eine Selbstaufheizung und Wärmeübertragung an die geschlossene Form, welche Wärme teilweise durch freie Konvektion an die Umgebung abführt. Nach einer bestimmten Prozesszeit wurde die Form konvektiv mit warmem Wasser beheizt. Es wurde dazu auf der Bauteiloberfläche auf der Grundlage des bekannten Formenaufbaus bzw. thermischen Widerstandes zwischen den Kühlrohren und der Forminnenseite eine Wärmeübergangszahl vorgegeben.

Zur weiteren Verbesserung des Formpressprozesses wurde von der MET GmbH untersucht, wie groß die Prozessverbesserung bei einer konvektiven, äußeren Temperierung der Bauteiloberfläche direkt nach dem Legevorgang ist. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch eine Wasserkühlung der Forminnenseite direkt nach dem Legevorgang die Maximaltemperatur reduzieren lässt. Bei näherungsweise gleicher Prozessdauer, wie bei dem Formpressprozess ohne direkte Temperierung nach dem Legevorgang kann die maxi-

male Vernetzungsgraddifferenz reduziert werden. Es ist durch eine direkte äußere Temperierung eine Prozessverbesserung möglich.

Eine weitere Prozessverbesserung kann durch eine innere, effektive Temperierung des Bauteils erreicht werden. Diese innere Temperierung wurde als Wand in der Mittelfläche des Gebietes mit E Glasfasern modelliert. Es wurde an dieser Wand eine Ersatzwärmeübergangszahl angenommen. Es ist aus den Simulationsergebnissen insgesamt zu erkennen, dass eine innere Temperierung des dickwandigen Propellerblattes eine deutliche Erhöhung der Produktivität und Bauteilqualität bewirkt. Weiterhin ist zu erkennen, dass auch beim Einsatz einer Rohrschlange zur inneren Kühlung, bei einer ausreichend langen Prozess- bzw. Kühlzeit eine positive Prozessbeeinflussung möglich ist.

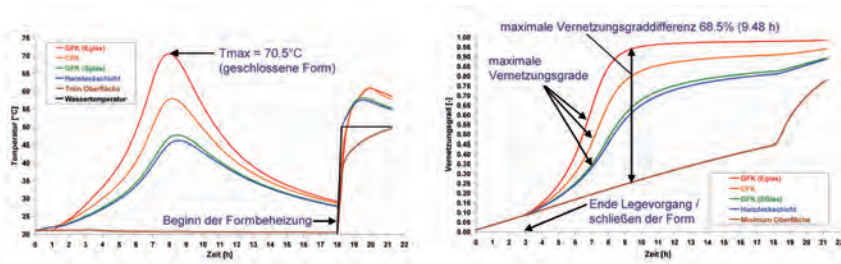


Abbildung 2: Formpressprozess des Propellerflügels mit äußerer Temperierung - simulierte zeitabhängige Verläufe der Maximaltemperatur (links) und des maximalen Vernetzungsgrades (rechts)

RTM Prozess

Neben der Untersuchung des Formpressprozesses war ein weiteres Ziel, das Fließverhalten des Harzes während eines RTM-Prozess zur Herstellung des Propellerflügels zu simulieren, um mögliche grundsätzliche Probleme im Vorfeld von Versuchen zu erkennen.

Beispiele für im Projekt von der MET GmbH erstellte Modelle zur Simulation der Harzinjektion sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Lage, Anzahl und Größe der Ein- und Auslassöffnungen wurde in mehreren Zyklen optimiert. Die in Abbildung 3 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen die Möglichkeit der simulationsgestützten Optimierung des RTM Prozesses durch die Optimierung der Anzahl, Lage und Größe von Ein- und Auslassöffnungen für die Harzinjektion. Für diesen Prozess sind weitere Optimierungen möglich, z.B. wenn eine innere Temperiereinheit (s. Formpressprozess) verwendet werden soll.

Für die Einführung des RTM Prozesses zur Propellerflügelherstellung sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere ist eine Validierung mit Harzinjektionsversuchen sinnvoll, um relevante Modellparameter, wie z.B. die Permeabilität der Preform oder die Harzviskosität genauer bestimmen zu können. Nach dieser Modellvalidierung kann eine gezielte Optimierung des Harzinjektionsprozesses erfolgen.

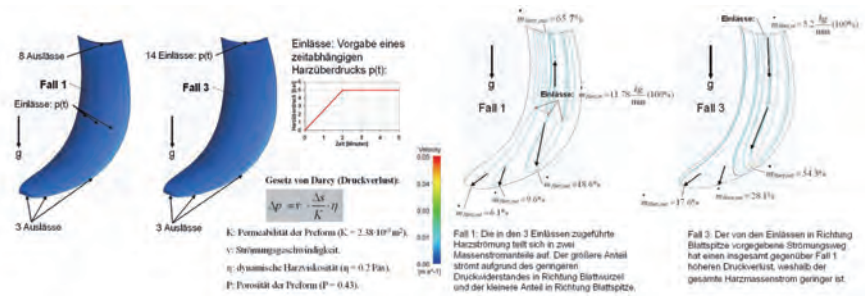


Abbildung 3: Links: Definition von Fall 1 und Fall 3, sowie des zeitabhängigen Harzdruckverlaufs an den Einlässen und des verwendeten Druckverlustmodells, Rechts: Stromlinien der Harzströmung für Fall 1 und Fall 3, einschließlich der sich nach 5 Minuten Füllzeit einstellenden Harzmassenströme

Viskose Berechnungsverfahren mit Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Kopplung

Die Flügel von Compositepropellern sind flexibel und reagieren auf Belastung neben einer Durchbiegung mit einer merklichen Änderung ihrer Steigung. Dies wird zur besseren Anpassung des Propellers an die Motorkennlinie ausgenutzt. Allerdings wird dadurch auch eine treffsichere Auslegung erschwert und kann nur bei richtiger Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung erfolgreich sein. Voraussetzung ist, dass möglichst genaue Berechnungsverfahren für die Strömung und die Struktur zum Einsatz kommen.

Etabliert ist dafür aktuell ein Potenzialverfahren für die Strömungsberechnung und eine Finite-Elemente-Modellierung der Struktur. Damit waren bisher nur stationäre Probleme behandelbar. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde nun die Strömungsberechnung mittels RANSE-Verfahren mit der Strukturberechnung gekoppelt und an Beispielen validiert.

Für die Lösung des Berechnungsproblems wurde der Finite-Volumen-Code (FVM) OpenFOAM mit dem Finite-Elemente-Löser NX-Nastran (FEM) gekoppelt. Es handelt sich um eine starke Kopplung, die iterativ gelöst wurde. Dabei waren folgende Teilprobleme zu lösen:

- a) Interpolation der Drucklasten aus der Strömungsrechnung auf das FEM-Modell.
- b) Interpolation der Verschiebungen aus der FEM-Lösung auf das CFD-Gitter
- c) Verzerrung des CFD-Gitters auf die verformte Flügelgeometrie
- d) Implementierung des iterativen Kopplungsalgorithmus

Sowohl FVM als auch FEM-Verfahren verwenden Volumengitter für die Berechnung. Für die Strömungsrechnung mit dem FVM-Verfahren sind die Anforderungen an die Gitterauflösung jedoch um ein Vielfaches höher als an ein FEM-Gitter. Diese stark unterschiedlichen Detaillierungsgrade machen die Punkte a) und b) besonders schwierig. Bei der Interpolation der Lasten muss sichergestellt sein, dass die Gesamtkräfte und -momente auf beiden Modellen gleich groß sind. Dazu wurde ein Algorithmus nach [1] umgesetzt, der dies garantiert.

Die Propelleroberflächen sind zweiachsig gekrümmte Freiformflächen mit starken Krümmungsgradienten im Kantenbereich. Während die Kantenbereiche für die Strömungsrechnung möglichst gut aufgelöst werden müssen, ist für die strukturelle Berechnung die Auflösung hier eher grob. Daher ist in diesem Bereich keine saubere Überdeckung beider Modelle gegeben. Es ergibt sich speziell bei der Interpolation der Verschiebungen auf das CFD-Modell das Problem, dass nicht für alle Punkte Verschiebungswerte direkt aus der FEM-Lösung bestimmt werden können. Für die Behandlung dieses Problems wurde eine Kombination von Extrapolation und geeigneten Glättungsverfahren entwickelt.

So kann auf der Flügelfläche ein Verschiebungsfeld ohne Sprungstellen und Überschneidungen bestimmt werden. Anschließend erfolgt die Berechnung der Verschiebung aller inneren Knoten des FVM-Gitters. Dafür wird eine bereits in OpenFOAM implementierte Methode verwendet.[2]

Zur Erprobung des entwickelten Verfahrens wurde ein Modellpropeller aus Faserverbundmaterial simuliert. Für diesen Propeller stehen auch Messwerte zur Verfügung, sodass ein Vergleich mit den Berechnungsergebnissen erfolgen konnte. Die Propellercharakteristik beim flexiblen Propeller ist von der Drehzahl abhängig. In Abbildung 4 sind die experimentellen und berechneten Freifahrtkurven für zwei Drehzahlen gegenübergestellt. Es zeigt sich über einen weiten Fortschrittsgradbereich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung.

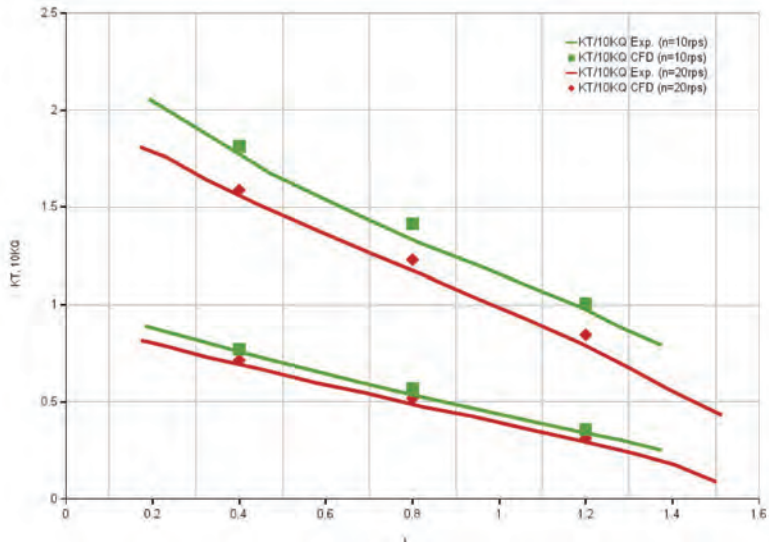


Abbildung 4: Vergleich zwischen experimentell bestimmter und berechneter Freifahrtkurve für zwei unterschiedliche Drehzahlen

Die Verformung des Flügels für einen Betriebspunkt ist in Abbildung 5 dargestellt. Die großen Verschiebungen im Bereich der Spitze sind deutlich erkennbar.

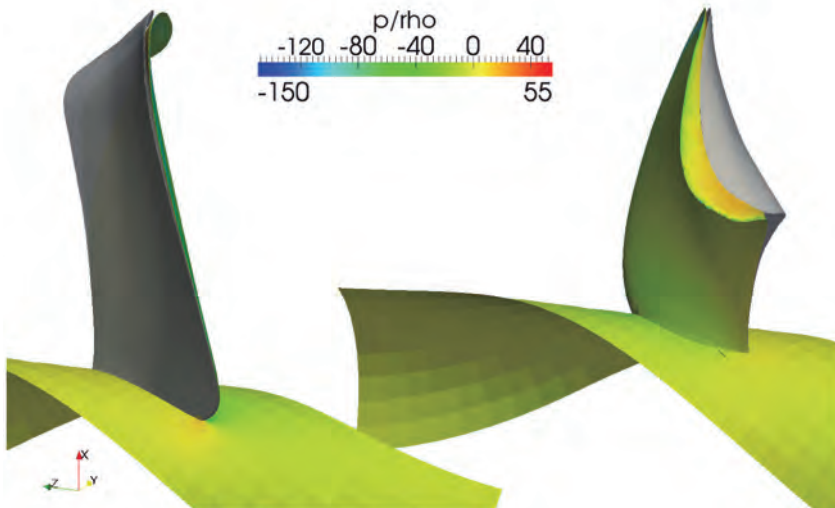


Abbildung 5: Verformung des Propellerflügels (ohne Überhöhungsfaktor)

3D-Prüfverfahren

Durch das Fraunhofer AGP wird das Teilprojekt „Auswerteverfahren und Messkonzepte für die geometrische Prüfung von CFK-Propellerstrukturen und deren Komponenten“ bearbeitet. Ziel des Teilprojektes ist es, Grundlagen für ein Verfahren zur geometrischen Prüfung von CFK-Propellern und deren Komponenten auf Basis von 3D-Messtechnik und einer teilautomatisierten Datenauswertung zu entwickeln. Damit soll erreicht werden, dass die Prüfung von CFK-Propellern zum einen den Ansprüchen der Fertigungsmethode gerecht wird und zum anderen, dass die Kontrolle der Propeller im Vergleich zur herkömmlichen punktuellen Prüfung wesentlich schneller und effektiver ausgeführt werden kann.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen für folgende Arbeitsbereiche effiziente Lösungen erforscht werden:

- **Messaufbauten**
Ziel ist die Konfiguration von experimentellen Messaufbauten zur flächenhaften 3D-Vermessung von CFK-Propellern und deren Komponenten. Durch die Entwicklung neuartiger Mess- und Prüfverfahren lassen sich die Ursachen und Auswirkungen für die zunehmenden Probleme durch Schwindungen und Temperaturverzüge bei dickwandigen CFK-Bauteilen ermitteln. Darüber hinaus soll eine deutliche Reduktion der Dauer einer Prüfung erreicht werden.
- **Softwareumsetzung**
Es sollen softwareseitige Verfahrenswege und Softwarefunktionsmuster entwickelt werden. Dazu werden die Anforderungen der verschiedenen Zielstellungen nach Möglichkeit vereinheitlicht und automatisiert, um eine einfache und schnelle Datenverarbeitung zu gewährleisten.

Messaufbauten

Eine flächenhafte Vermessung von Propellern kann mittels verschiedener Messsysteme realisiert werden. Daher wurde im ersten Schritt eine Aufgabenanalyse (Anforderungen, Produktionsschema, Bauteilanzahl) durchgeführt. Auf dieser Basis konnte ein gewichteter Vergleich verschiedener Messsystem durchgeführt werden. Ergebnis ist, dass zur Aufnahme der Propeller Streifenlichtprojektoren mit Messfeldern von 0,5x0,5 bis 1,5x1,5m am besten geeignet sind.

Auf Basis dieser Geräteauswahl konnten Probemessungen durchgeführt und die Messaufbauten konfiguriert werden (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Messaufbau und -system für die Propellerprüfung

Mit dem Streifenlichtprojektor werden innerhalb weniger Sekunden vier Millionen 3D-Messpunkte aufgenommen. Um den gesamten Propeller auf diese Weise zu erfassen, werden mehrere Aufnahmen benötigt. Dazu wurde ein System entwickelt, welches auf kalibrierten Verknüpfungssäulen basiert. Diese Säulen mit bekannter Referenzpunktkonfiguration werden in die Aufnahmen eingebracht und ermöglichen es, den Propeller sehr schnell zu vermessen. Ergebnis der Digitalisierung mit dem Streifenlichtprojektor ist ein Flächenmodell der realen Ist-Oberflächen (siehe Abbildung 7).

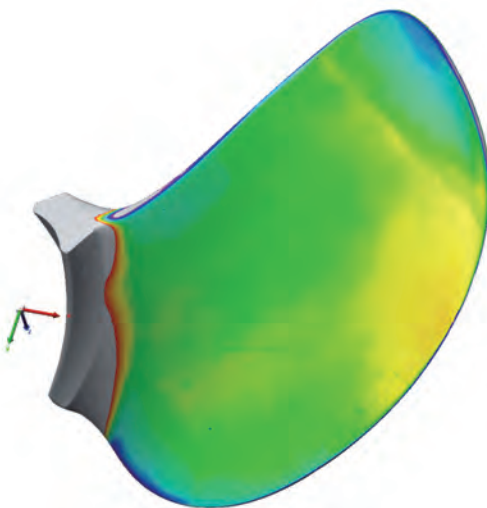


Abbildung 7: Soll-Ist-Vergleich in Falschfarbendarstellung

Softwareumsetzung

Die Auswertesoftware soll die Möglichkeit bieten, die erfassten Flächendaten nach vorgegebenen Kriterien automatisch auszuwerten. Dazu mussten Algorithmen für die Auswertung der flächenhaften Messdaten neu entwickelt werden. Mit der Software ist die Prüfung der Kriterien wie Steigung, Profillänge, Profildicke, etc, möglich.

Zur Umsetzung wurde die Software in folgende Hauptmodule gegliedert:

1. Geometrie und CAD-Modul

Möglichkeiten Geometriedaten zu importieren und zu interpretieren, geometrische Operationen (z.B. Boolesche Operation, Vernetzung) durchzuführen

2. Interaktives Testmodul für globale oder selektive Durchführung der Prüfverfahren

Möglichkeit der Prüfung aller oder ausgewählter Kriterien, Darstellung und Protokollierung der Ergebnisse

3. Berechnungsmodul für die Überprüfung der Kriterien

Softwareimplementierung der Prüfverfahren und der einzelnen Kriterien

Die Software bietet die Möglichkeit die Auswertungen nach erfolgtem Durchlauf textuell und grafisch zu dokumentieren (siehe Abbildung 8).

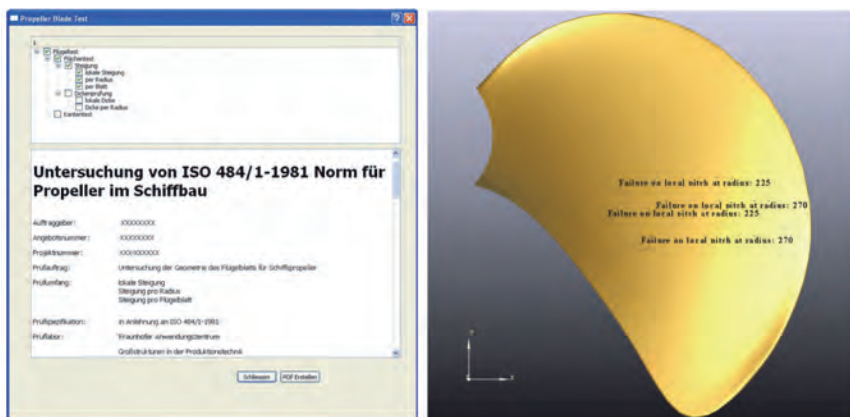


Abbildung 8: Textuelle und grafische Ausgabe der Prüfergebnisse nach ISO 484

3D-Verstärkung der Propellerkanten durch Z-Pins

Am Propeller treten neben den hydrodynamischen Lasten auch Schlagbelastungen an der Flügelkante bei Kollisionen mit Treibgut oder bei Grundberührung auf. Diese Schlagbelastungen führen zu einem lokal begrenzten, räumlichen Spannungszustand. Die hier untersuchten CFK-Propeller weisen auslegungsbedingt eine vorwiegend radiale Faserorientierung auf, woraus bei Schlagbelastungen auch hohe Beanspruchungen in Laminatdickenrichtung resultieren. In dieser Richtung sind durch den schichtweisen Aufbau keine Fasern angeordnet, wodurch die mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen vom Harz bestimmt werden. Diese sind deutlich schlechter als in Faserrichtung, weshalb bereits geringe Schlagbelastungen zu Faserbruch und Delaminationen führen.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Konzepte zur Verbesserung der interlaminaren Eigenschaften entwickelt wie das Vernähen oder das Vernadeln von Laminaten. Beim Vernadeln werden stiftförmige Elemente in das noch nicht ausgehärtete Laminat eingebracht und sorgen dadurch für einen zusätzlichen Stoffschluss in Dickenrichtung (Z-Richtung). Für die mit Z-Pins aus CFK vernadelten Bauteile konnte nachgewiesen werden, dass der Risswiderstand erhöht und die Delaminationsneigung reduziert ist, was auch zu verbesserten Impact-Eigenschaften führt. [3]

Die bisher eingesetzte Technologie zum Vernadeln von Laminaten beschränkt sich auf ebene Bauteile mit einer maximalen Dicke von 8 mm, die im Prepregverfahren hergestellt werden. Die hinsichtlich des Impactverhaltens zu optimierenden zweidimensional gekrümmten Propellerflügel werden dagegen im Nassverfahren gefertigt und erreichen Bauteildicken bis zu 120 mm. Um einen wirksamen Verstärkungseffekt mit Hilfe der Z-Pins zu erzielen, sind entsprechend lange Pins orthogonal zur Oberfläche einzubringen.

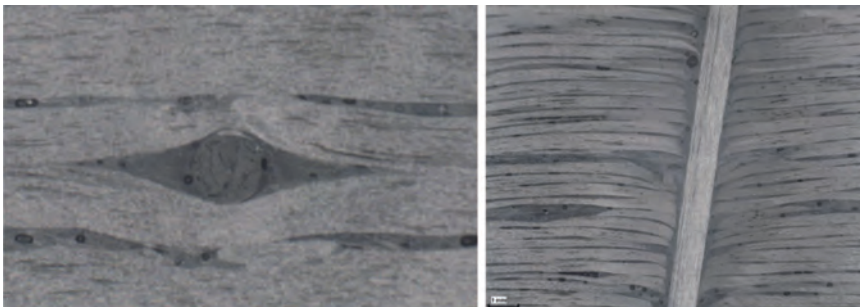
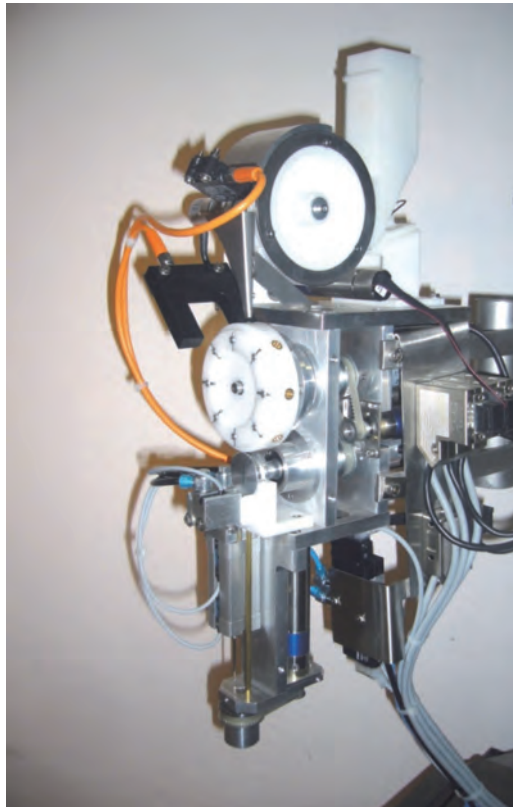


Abbildung 9: Schliffbilder parallel zur Laminebene (links) und senkrecht zur Laminebene (rechts)

Die Schliffbilder zeigen, dass mit dem Einbringen der Z-Pins die optimale Faserausrichtung gestört wird. Die Fasern weichen dem Pin aus, so dass sich um den Pin Harzinseln bilden. Weiterhin werden beim Eindrücken des Pins die Fasern mit eingezogen. Die daraus resultierende Faserwelligkeit führt zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Laminates in Faserlängsrichtung.

Aus den genannten Fragenstellungen haben sich zwei Bearbeitungsschwerpunkte herauskristallisiert, die im Rahmen des geförderten Teilprojektes bearbeitet wurden. Einerseits bestand die Forderung, ein Fertigungswerkzeug zum automatischen Vernadeln dickwandiger, gekrümmter Laminare zu entwickeln. Andererseits sind die Materialkennwerte der vernadelten Laminare zu bestimmen und Empfehlungen für Verstärkungsmuster abzuleiten.

Für dicke Laminare sind zwei neuartige Vernadelungsverfahren entwickelt worden. Im Gegensatz zu dem bekannten Preform-Verfahren werden hierbei die Z-Pins mit einem Durchmesser bis zu 2 mm und bis zu einer Länge von 25 mm mit wiederverwendbarem Pinträger gesetzt. Für die Propellerfertigung ist ein spezielles Setzwerkzeug entwickelt worden, welches die Pins einzeln verarbeitet.



*Abbildung 10:
Vernadelungswerkzeug*

Die mit einer konischen Spitze versehenen Pins werden in einem Magazin vorgehalten. Ein Vereinzelmechanismus fördert die CFK-Stifte in eine Ausrichteeinheit, welche die Pins so ausrichtet, dass die Pinspitze in Förderrichtung gelangt. Die so ausgerichteten Pins werden in der sich anschließenden Eindrückvorrichtung in das nasse Laminat einzeln eingebracht. Das Vernadelungswerkzeug wird mit Hilfe eines Handlingsystems konturnah über die Laminatoberfläche geführt, so dass ein automatisches Einbringen der Pins in einem definierten Muster möglich ist. Mit diesem Vernadelungswerkzeug werden Taktzeiten von einem Pin/ Sekunde erreicht, sodass in der Zeitspanne von einer ½ Stunde das Vernadeln der Eintrittskante eines großen Propellerblattes möglich ist.

Um den Einfluss der Z-Pins auf die Materialkennwerte einschätzen zu können, wurden umfangreiche Versuchsreihen an vernadelten und unvernadelten Probekörpern durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Z-Pin-Konfigurationen auf die interlaminare Festigkeit und die inplane-Eigenschaften bestimmt.

Eine Gegenüberstellung der inplane-Eigenschaften sowie der Rissenergiefreisetzungsrates als Maß für die interlaminare Festigkeit zeigt, dass die Vorteile der 3D-Verstärkung mit Z-Pins dominieren. Für alle Pin-Konfigurationen wurde festgestellt, dass mit zunehmender Pindichte der E-Modul abfällt und die interlaminare Festigkeit erhöht ist. Der Abfall des E-Moduls beträgt jedoch 18 % bei der hier untersuchten maximalen Pindichte von 3,14 % mit Pindurchmesser 2 mm. Bei einer Pindichte von 1,4 % wurde eine Verschlechterung des E-Moduls von 8 % ermittelt. Dem steht eine Erhöhung der Rissenergie von 68 % gegenüber. Bei den GIC-Versuchen versagten die Probekörper mit einer Pindichte von 3,14 % und 2 mm Pindurchmesser durch Bruch, sodass das Risswachstum nur begrenzt erfasst werden konnte. Für den im Plate-Twist-Test ermittelten Schubmodul konnte für sämtliche Pin-Konfigurationen kein signifikanter Unterschied zur unverpinten Referenzprobe festgestellt werden.[4]

Die durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Rissenergiefreisetzungsrates nach Mode I zeigen das Verhalten vorgeschädigter Lamine hinsichtlich der Rissausbreitung. Ein weiterer Aspekt ist in diesem Zusammenhang das Verhalten des Laminates bei Eintreten des Erstschadens z.B. durch Stoßbelastungen auf die Laminatkante, was durch weitere Untersuchungen herausgearbeitet werden soll. Dazu ist ein spezieller Impactprüfstand aufgebaut worden, bei dem Auftreffgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s und Impactenergien von bis zu 350 J realisiert werden können.

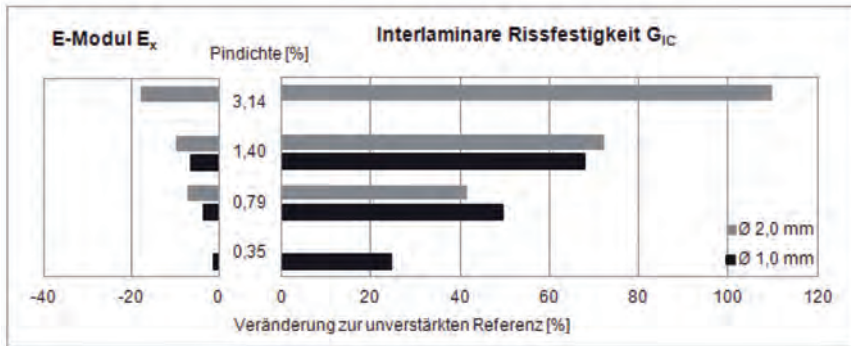


Abbildung 11: Gegenüberstellung mechanischer Eigenschaften verstärkter und unverstärkter Lamine

Bei der Verarbeitung der Z-Pins zeigte sich, dass sich die Pins im Durchmesser von 1,0 und 1,5 mm problemlos in das Laminat eindrücken lassen. Bei den Pins im Durchmesser 2 mm traten Probleme auf, weil sich die Pins zum Teil aufspalten und damit erhebliche Schäden im Laminat verursachen. Die Verarbeitung der Pins mit dem Vernadelungswerkzeug ist ab einem Durchmesser von 1,5 mm funktionssicher. Die 3D-Verstärkung mit Z-Pins im Durchmesser von 1,5 mm weist schon eine deutliche Verbesserung der interlaminaren Festigkeit bei gleichzeitiger kalkulierbarer Verschlechterung der inplane-Eigenschaften auf, sodass für die 3D-Verstärkung der Propellerblätter unter Berücksichtigung der technologischen Parameter Pins mit einem Durchmesser von 1,5 mm und einer Pindichte von 1-1,5 % empfohlen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Vorhabens „Entwicklung von Konstruktions-, Simulations- und Prüfverfahren für 3-D verstärkte CFK-Propellerstrukturen bis 6 m Durchmesser“ konnten wertvolle Ansätze zur Verbesserung der Berechnung und Herstellung von Faserverbund-Propellern untersucht werden.

Mit Hilfe von Simulationen des Fertigungs- und Aushärtprozesses konnten Möglichkeiten zur Verringerung der Temperaturgradienten während des Aushärtens und der damit verbundenen Eigenspannungen identifiziert werden. Die Realisierung einer inneren Kühlung während des Aushärtvorgangs ist konstruktiv erarbeitet und wird derzeit umgesetzt und erprobt.

Erste Simulationen eines RTM-Verfahrens zeigen keine prinzipiellen Hindernisse bei der Anwendung dieser Technologie auf Propeller. Allerdings besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf, bis dieses Verfahren in die Fertigung eingeführt werden könnte.

Die Implementierung und Validierung verbesserter Berechnungsverfahren konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Verfahren fanden schon Einsatz bei laufenden Projekten und haben sich bereits bewährt.

Es wurden die Grundlagen für eine schnelle flächenhafte Prüfung von Propellerstrukturen gelegt. Die Messaufnahme und Prüfung eines Propellers mit 3m Durchmesser wird mit dem neuen Verfahren auf 60 Minuten kalkuliert. Damit ist die Prüfung mindestens um den Faktor 5 schneller als bisher. Es kann also wesentlich schneller mit erhöhter Informationsdichte geprüft werden. Dies wird einen Beitrag dazu leisten, die Qualität und Effektivität bei der Herstellung zu erhöhen.

Die Z-Pin-Verstärkung hat sich als eine vielversprechende Technologie zur Verbesserung der Schadenstoleranz von schlagbeanspruchten CFK-Propellern erwiesen. Im Rahmen dieses Projekts wurden umfangreiche systematische Untersuchungen zur Verstärkungswirkung und zum Einfluss der Pins auf die inplane-Eigenschaften des Laminats durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten standen in diesem Umfang bisher nur für Prepreg-Werkstoffe zur Verfügung. Weiterhin wurden wichtige Erfahrungen zur Verarbeitung der Pins in der Fertigung gesammelt.

Literatur

- [1] Farhat et al., „Load and motion transfer algorithms for fluid/structure interaction problems with non-matching discrete interfaces: Momentum and energy conservation, optimal discretization and application to aeroelasticity“, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol. 157, pp. 95-114, 1998
- [2] H. Jasak, Z. Tukovic, „Automatic Mesh Motion for the Unstructured Finite Volume Method“, Transactions of FAMENA, Vol. 30 (2), 2006
- [3] A. P. Mouritz, „Review of z-pinned composite laminates“, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38 (12), pp. 2383-2397, 2007
- [4] S. Bartke, C. Kliewe, „3D-Verstärkung von Schiffspropellern in Carbon-Faser-Verbundbauweise durch Z-Pins“, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, Rostock, Deutschland, 2011

HYDROFERT – Auswirkungen fertigungsbedingten Oberflächen-imperfektionen auf das hydrodynamische Verhalten ausgewählter Schiffsstrukturen

Dr. Uwe Hollenbach, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

Das Gesamtziel des Vorhabens HYDROFERT bestand darin, fertigungsbedingte Oberflächenimperfektionen an Bord von gebauten Schiffen messtechnisch zu erfassen und die Auswirkungen dieser Imperfektionen auf das hydrodynamische Verhalten des Schiffes experimentell und numerisch zu untersuchen. Dabei stand der Einfluss der Imperfektionen auf den Schiffswiderstand, auf die Wirksamkeit des Ruders und das Auftreten von erosiver Kavitation im Vordergrund der Untersuchungen. Darauf aufbauend sollten Vorschläge für eine konstruktive und fertigungstechnologische Optimierung des Schiffskörpers und seiner Anhänge entwickelt werden, die auf eine Minderung oder gar Vermeidung dieser Auswirkungen zielen. Diese Vorschläge sollten einer technischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung unterzogen werden und zukünftige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte definieren.

Damit zielte das Vorhaben auf eine globale Verbesserung des Systemproduktes Schiff einschließlich seiner für den Vortrieb und das Manövrierverhalten wesentlichen Zulieferprodukte, wie Ruder, Wellenböcke, Anströmdüsen etc. Diese Qualitätsverbesserung sollte in erster Linie zu einer Reduzierung der Betriebs- und Instandhaltungskosten im Schiffsbetrieb führen.

Mit diesem Vorhaben wurde ein grundsätzlicher Erkenntnisgewinn bezüglich der kausalen Zusammenhänge zwischen dem hydrodynamischen Verhalten von Schiffen und den fertigungsbedingten Oberflächenimperfektionen an Schiffsstrukturen angestrebt.

Ziele des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens „Untersuchung des hydrodynamischen Verhaltens ausgewählter Schiffsstrukturen mit Oberflächenimperfektionen“ wurden die Auswirkungen von fertigungsbedingten Oberflächenimperfektionen auf das hydrodynamische Verhalten des Schiffes und seiner Anhänge untersucht. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von numerischen und experimentellen Methoden für verschiedene Ausprägungen der Imperfektionen durchgeführt.

Längs und quer zur Strömungsrichtung verlaufende Schweissnähte und/oder Beulen in den Plattenfeldern beeinflussen die lokale Strömung am Schiffsrumpf. Schweissnähte und/oder Feldbeulen in kritischen Bereichen können die Strömungs- und Druckverhältnisse so verändern, dass es lokal zu Ablösungen kommen kann, die eine Vergrößerung des Schiffswiderstandes und damit einen erhöhten Brennstoffverbrauch zur Folge haben.

Abweichungen der Rudergeometrie von der idealen Form und der idealen Ausrichtung können die Ruderwirksamkeit verändern und/oder das Auftreten von Kavitation begünstigen. Erosive Kavitation an Rudern kann zu erheblichen Schäden am Ruder bis hin zum Totalverlust des Ruders führen.

Lokale Imperfektionen der Ruderoberfläche (z.B. Durchschweislöcher, verschraubte Öffnungen, Anoden) können ebenfalls die Ruderwirksamkeit verändern und/oder das Auftreten von Kavitation begünstigen.

Stand der Wissenschaft und Technik

Imperfektionen am Schiffsruder

Schiffsruder, wie auch zahlreiche andere Anhänge am Hinterschiff werden heute nach wie vor „konventionell“ gebaut. Dabei werden Fragen der Ausformung und Orientierung von Schweißnähten oftmals nicht berücksichtigt. In der Praxis ist eine Reihe von Schadensfällen, bedingt durch Strömungsablösung und dadurch hervorgerufene Kavitationserscheinungen, bekannt.



Halbschweberuder mit Kavitationsschäden im Pintle-Bereich

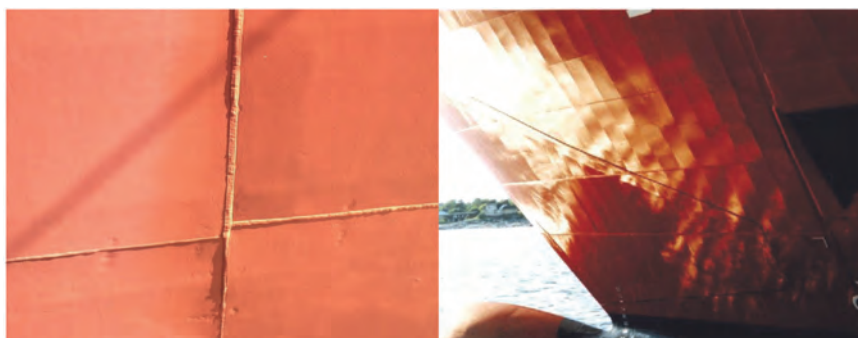
In der nachfolgenden Abbildung ist ein neues Halbschweberuder mit einer unvorteilhaften Ausführung der Plattenstöße auf der Ruderaußenhaut dargestellt. Man erkennt an dem Farbabrieb deutlich die Stellen hoher Belastung, vor allem durch Kavitation an der Oberfläche. Neben den durch den Propellerspitzenwirbel bedingten Erosionen an der Unterkante sind das auch gerade Stellen hinter dem Ruderpintle, die auch durch die unsaubere Ausführung der Außenhaut bzw. der Schweißnähte hervorgerufen wird. In den Bildern sind ebenfalls die sehr einfach ausgeführten Opferanoden auf der Oberfläche zu erkennen. Zwar ist hier kein unmittelbarer Einfluss der Anoden auf die Kavitation zu erkennen, es erscheint aber doch plausibel, dass die unförmigen Zinkanoden die Strömung nachteilig beeinflussen können.

Imperfektionen an der Außenhaut

Hinsichtlich des Einflusses von Imperfektionen an der Außenhautoberfläche im Unterwasserbereich, hervorgerufen durch

- Schweißnähte (Nahtüberhöhungen, Nahtschuppung) längs und quer zur Strömungsrichtung;
- von Beulen in Plattenfeldern (Feldbeulen) sowie
- unterschiedliche Oberflächenbehandlung und Beschichtungssysteme

waren keine detaillierten Untersuchungen bekannt. Es erschien daher notwendig, die hauptsächlichen Einflussfaktoren zu analysieren und mögliche Auswirkungen zu untersuchen. Die folgende Abbildung zeigt Beispiele für charakteristische fertigungsbedingte Imperfektionen an der Außenhaut.



*Fertigungsbedingte Oberflächenimperfektionen an der Schiffsaußenhaut
(links: Schweißnähte; rechts: Feldbeulen – Foto SLV M-V)*

Imperfektionen an Anbauten (Beispiel: Wellenböcke)

Im Falle von Wellenbockarmen kommt es immer wieder zu kavitationsbedingten Erosionserscheinungen, die insbesondere durch eine mangelhafte Ausrichtung hervorgerufen werden. Diese wären durch eine verbesserte Messtechnologie und mehr Sorgfalt bei der Montage zu vermeiden. Die Qualität der Oberfläche spielt bei den hier oftmals verwendeten Gussteilen nur eine untergeordnete Rolle. Wenn auf den Wellenbockarmen zusätzlich noch Operanoden angeordnet werden, kann es zu einer weiteren ungünstigen Beeinflussung der Strömung mit negativen Einflüssen auf das Kavitationsverhalten kommen.



Wellenbockarme Zweischauber

Untersuchungen zum hydrodynamischen Verhalten von Schiffen

Die Auswirkungen fertigungsbedingter Imperfektionen auf die hydrodynamischen Eigenschaften eines Schiffes sind bisher kaum Gegenstand von allgemein bekannten Forschungsaktivitäten gewesen. Die Modellversuchstechnik zur Untersuchung des Widerstands- und Propulsionsverhaltens von Schiffen erfährt zwar auch heute noch geringfügige Verbesserungen hinsichtlich der Maßstabs Korrekturen sowie der Messtechnik, das Grundprinzip der Versuchsdurchführung in großen Schlepptanks ist jedoch seit Jahrzehnten mehr oder weniger ausgereift. Die Kavitationsversuchstechnik hat dagegen in den vergangenen 15 Jahren starke Fortschritte durch den Bau großer Kavitati-

onstunnel erfahren, die den Einbau ganzer Schiffsmodelle und damit die Untersuchung des kompletten Systems Rumpf - Propeller - Ruder erlauben. Der teilweise aus Bundesforschungsmitteln finanzierte Hydrodynamik- und Kavitationstunnel (HYKAT) der HSVA hat dabei eine Vorreiterrolle gespielt.

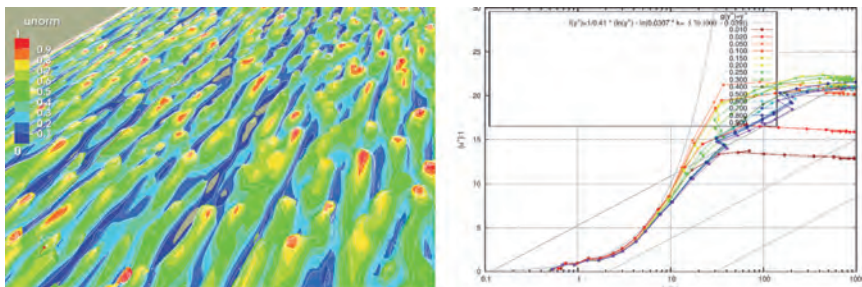
Dennoch zielten Modellversuche bislang stets auf die Untersuchung des Idealzustandes ab. Oberflächen- oder Geometrieimperfectionen treten allenfalls ungewollt bei der Modellherstellung auf. Die Oberflächen von Modellpropellern, Rudern und Rümpfen sind hydraulisch glatt, Rauigkeiten werden nur pauschal durch Zuschläge berücksichtigt. Ein vollständig theoretischer Zugang der Problemlösung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Andererseits sind Lösungen ausschließlich auf der Basis von Modellversuchen durch Maßstabseffekte stark beeinflusst. Aus diesem Grunde wird zur Problemlösung eine Kombination aus experimentellen und numerischen Methoden vorgesehen, die eine Validierung der CFD Ergebnisse durch eine ausreichende Detaillichte an Versuchsergebnissen ermöglicht.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilprojekte

Grundlagenuntersuchungen an Plattenmodellen

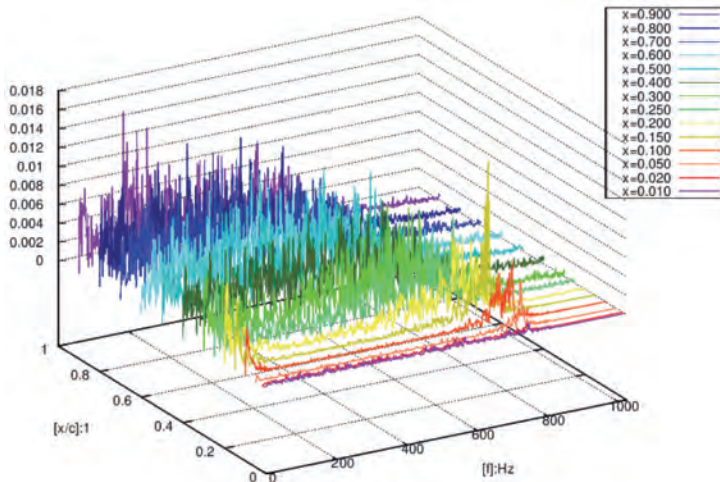
Im Rahmen der numerischen Grundlagenuntersuchungen an den Plattenmodellen (eben Platte, Platte mit Schweißnaht, Platte mit Feldbeule) wurden verschiedene Rechenverfahren und unterschiedlich feine Auflösungen des Berechnungsgebietes untersucht.

Ausgehend von der klassischen Grenzschichttheorie ist ein numerisches Modell entwickelt worden, mit dem die Strömung entlang der Wand einer ebenen Platte und der laminarturbulente Übergang berechnet werden kann.



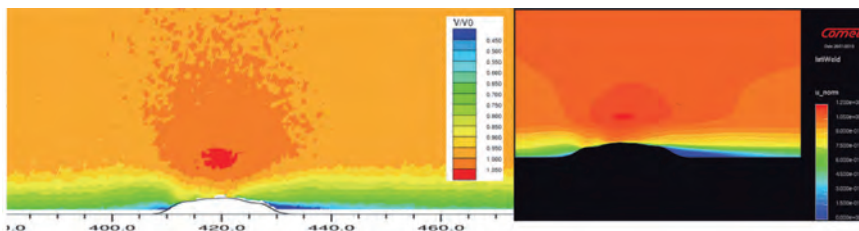
Turbulente Strukturen in der Grenzschicht (links) und Geschwindigkeitsprofile an der Wand in dimensionsloser Darstellung

Unter Verwendung der Large Eddy Simulation sind Zeitreihen der Geschwindigkeitsprofile in der Grenzschicht aufgenommen worden, die daraufhin einer Spektralanalyse unterzogen wurden. Charakteristische Frequenzen der Turbulenzentstehung konnten identifiziert werden.



Frequenzspektren entlang der Lauflänge nahe der Wand – Identifikation der Tollmien-Schlichting-Wellen

Zur Untersuchung der Einflüsse von Oberflächenstörungen im kleinskaligen Bereich sind plattenförmige Versuchskörper modelliert und gebaut worden, die als Träger dieser Störungen (Beulen / Schweißnähte) im Kavitationstunnel vermessen und zum Vergleich mit einem RaNS- und einem LES-Verfahren simuliert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Simulation brauchbare Ergebnisse liefern, aber die Messung noch lange nicht ersetzen kann. Zur Ermittlung der Oberflächenkräfte eignet sich das stationäre RaNS-Verfahren, zur Berechnung der Grenzschichtprofile das LES-Verfahren besser. Jedoch erwies sich keines der beiden Modelle geeignet für beide Aufgaben gleichermaßen.



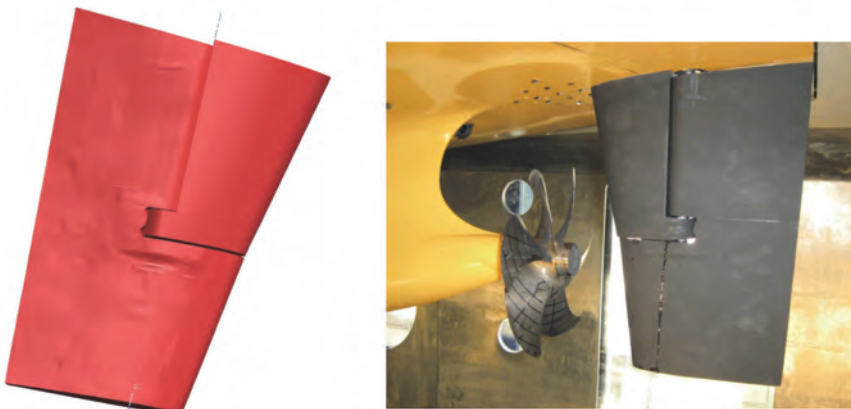
Umströmung der Schweißnaht, PIV Messung (links), numerische Simulation mit COMET (rechts)

Experimentelle Untersuchungen an einem idealen und einem imperfektionsbehafteten Ruder im HYKAT (Vollmodell in Zuströmung mit Rumpfeinfluss)

Vergleichende Rudermodellversuche mit einem idealen und einem imperfektionsbehafteten Ruder im HYKAT-üblichen kleinen Maßstab wurden im HYKAT der HSVA durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Ruderkräfte und das Kavitationsverhalten eines mit geometrischen Imperfektionen versehenen Ruders und eines idealen Vergleichsruders im Nachstrom eines typischen Containerschiffsrumpfes untersucht.

Als Versuchsträger für die beiden Halbschweberuder diente ein an der HSVA bereits verfügbares Modell eines heutzutage typischen großen Containerschiffes mit dem zugehörigen Designpropeller.

Anhand der Kraftmessungen am Ruderblatt lässt sich kein nachteiliges Verhalten der imperfektionsbehafteten Rudergeometrie erkennen. Im Gegenteil war bei allen Ruderwinkeln ein geringerer Strömungswiderstand C_x des Ruders bei vergleichbarer Ruderwirkung C_y zu beobachten.

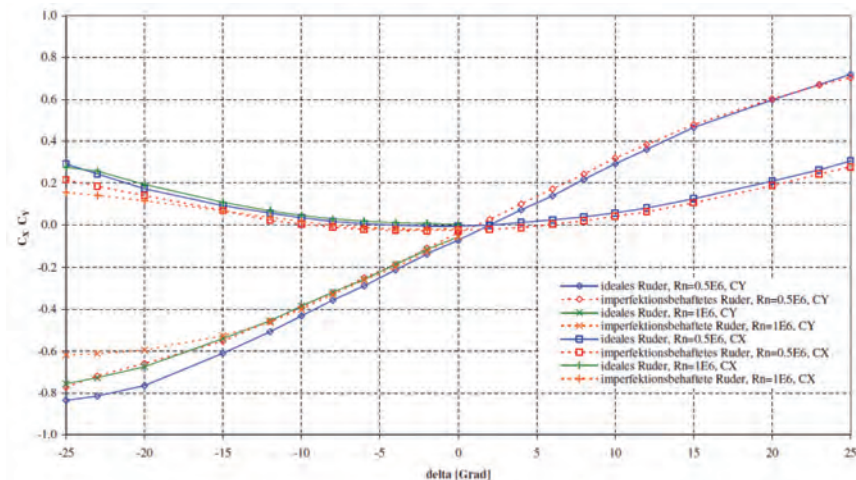


Gemessene Ruderoberfläche und Einbau des Modellruders im HYKAT

Technisch ist die vollkommen steife Einspannung der Messapparatur nicht möglich, so dass geringe Relativbewegungen zwischen dem, mit dem Modellrumpf verbundenen Ruderhorn und dem beweglichen Ruderblatt, in Abhängigkeit mit der auf die Messapparatur einwirkenden Kräfte, zu beobachten waren. Diese Relativbewegungen haben, neben den geometrischen Abweichungen der untersuchten Ruder, einen Einfluss auf die Größe des Spaltes. Der Abstand zwischen zwei umströmten Profilen wirkt sich aufgrund dynamischer Effekte auf den Auftrieb des Ruderprofils aus und somit wiederum auf die gemessene Kraft. Da die anteilige Größe dieser Kräfte an den

Gesamtkräften nicht bestimmt werden kann, ist von der Skalierung der Ergebnisse auf die Großausführung abzurufen.

Die Ruderkavitationsbeobachtung der idealen Ruder und der imperfektionsbehafteten Rudergeometrie zeigt im Vergleich einen deutlichen Einfluss geometrischer Änderungen, insbesondere in sensiblen Bereichen wie umströmten Kanten, Absätzen und Fugen (Spalte). An tangential umströmten imperfektionsbehafteten Flächen wurde kein derartig geändertes Kavitationsverhalten festgestellt. Erfahrungsgemäß zeigen Halbschweberuder im Bereich des Spaltes zwischen Ruderhorn und Ruderblatt die meisten Kavitationsschäden. Diese Kavitationsschäden werden durch die Spaltgeometrie oder durch den eventuell vorhandenen und kavitierenden Propellernabenwirbel verursacht und kann durch entsprechende Entwurfsänderungen vermieden werden. Daher ist die Untersuchung der Propeller-Ruder Konfiguration auf Kavitationsgefährdung vor der Bauphase besonders wichtig. Die Untersuchung des durch Fertigungsabweichungen tatsächlich gefertigten Ruders ist nach dem Bau sinnvoll, jedoch aus Kostengründen in der Praxis in Form einer Großausführungsuntersuchung kaum durchführbar.



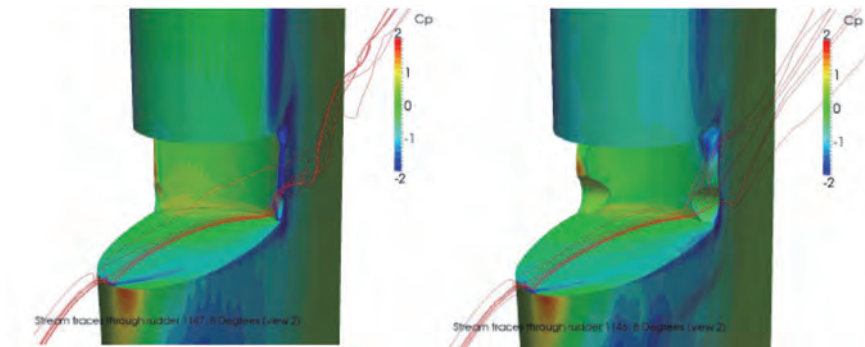
Beiwerte der Ruderkraftmessung von idealer und imperfekter Rudergeometrie

Numerische Untersuchungen an einem idealen und einem imperfektionsbehafteten Ruder

Die beiden im HYKAT untersuchten Rudermodelle wurden ebenfalls auf numerischem Wege untersucht. Die erste Rudervariante entsprach einer idealen Ausgangsgeometrie, bei der zweiten Variante entsprach die Geometrie in allen Details dem tatsächlich gebauten Ruder.

Die hier durchgeführten Rechnungen konzentrieren sich auf ausgewählte Ruderblatt-Stellungen, nämlich 0° und 8° (Hinterkante nach Stb).

Die zwecks Realisierung der Berechnungen im Vergleich zum Versuch vorgenommenen Vereinfachungen betreffen den Rumpf und den rotierenden Propeller. Der Rumpfeinfluss wurde durch eine verlangsamte aber ansonsten homogene Zuströmung am Einlass berücksichtigt. Der rotierende Propeller wurde in mit der 'Body Force'-Methode nachgebildet, wobei die benutzte Variante eine Umfangsmittelung der Lastverteilung auf den Propellerflügeln einschloss.



Im unteren Bereich des vertikalen Spalts austretende Stromlinien beim idealen (links) und beim realen Ruder (rechts)

Mit diesen Näherungen wurden mit Hilfe des RaNS Löser 'FreSCO' die Druckverhältnisse auf dem in allen Details nachgebildeten (d. h. vernetzten) Halbschweberudern berechnet. Zusätzlich wurde der Charakter der Spaltströmung mittels Stromlinien-Verfolgung untersucht. Die Stromlinien gaben Aufschluss über Ein- und Austrittsorte der Spaltströmung.

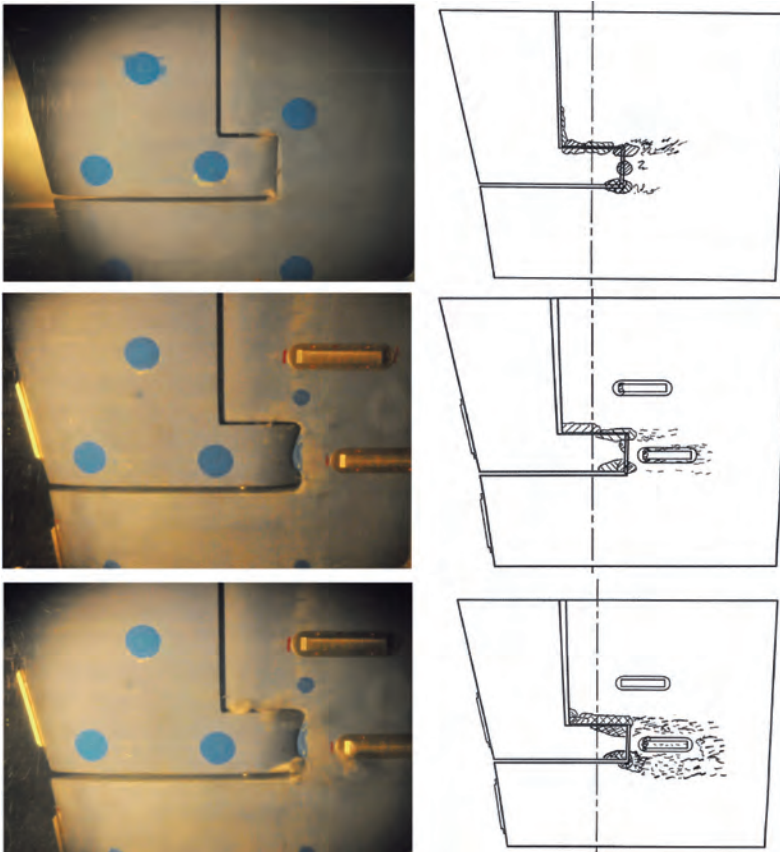


Isoflächen des Druckbeiwertes $C_p = -2.3$ als kavitationsgefährdeter Bereich beim idealen (links) und beim realen Ruder (rechts)

Eine Druck-Visualisierung basierend auf Druckbeiwertisoflächen zeigte eine gute Übereinstimmung in Vergleich mit der beobachteten Vorderkanten-Schichtkavitation. Hier waren die zum Dampfdruck gehörigen Isoflächen im Einklang mit den beobachteten Kavitations-Ausdehnungen. Im Bereich des Pintles sind die realen Strömungs-Verhältnisse offenbar komplizierter und unruhiger als es die (zwangsläufig stationäre) Rechnung nachbilden kann.

Experimentelle Untersuchungen an einem idealen und einem imperfektionsbehafteten Ruder-Teilmodell mit Anoden im Kavitationstunnel

Die Kavitationsbeobachtungen an den Ruder-Teilmodellen wurden im großen Kavitationstunnel der HSVA in uniformer Zuströmung durchgeführt. Bei den untersuchten Teilmodellen handelt es sich um drei Geometrievarianten eines Ruders, die sich in den Fertigungstoleranzen und -ausführung und durch die Anbringung von Opferanoden unterschieden.



Kavitationserscheinungen v.o.n.u: ideales Ruder bei 0°, imperfektes Ruder mit Anoden bei 0° und bei 2° steuerbord

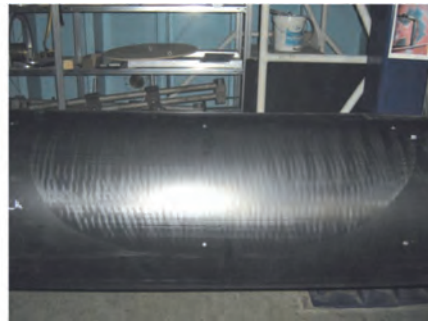
Die Ruder-Teilmodelle wurden verstellbar in die Messstrecke des großen Kavitationstunnels eingebaut und bei verschiedenen Anstellwinkeln und unterschiedlichen Reynoldszahlen untersucht.

Der Vergleich der Ergebnisse führt zu folgenden Erkenntnissen:

- Es konnte keine Abhängigkeit der Reynoldszahl für die Versuchsergebnisse im untersuchten Reynoldsbereich festgestellt werden.
- Durch Imperfektionen und Abweichungen in der Rudergeometrie treten Änderungen im Kavitationsverhalten auf. So zeigte das imperfektionsbehaftete Ruder großflächigere Schichtkavitation, mit kaum stabilen Kavitationsanteilen.
- In Verbindung mit zusätzlich angebrachten Anoden waren nur geringe Änderungen des Kavitationsverhaltens zu beobachten. Bei anderer Positionierung, bzw. Ausrichtung der Anoden können sich möglicherweise jedoch größere Unterschiede ergeben.

Reibungswiderstandsmessungen im HYKAT am zylindrischen Probenkörper

Die Widerstandsversuche mit einem zylindrischen Prüfkörper wurden im HYKAT durchgeführt, um den Einfluss von Oberflächenimperfektionen (Schweißnähte und/oder Feldbeulen) auf den Reibungswiderstand der glatten Oberfläche experimentell zu bestimmen.

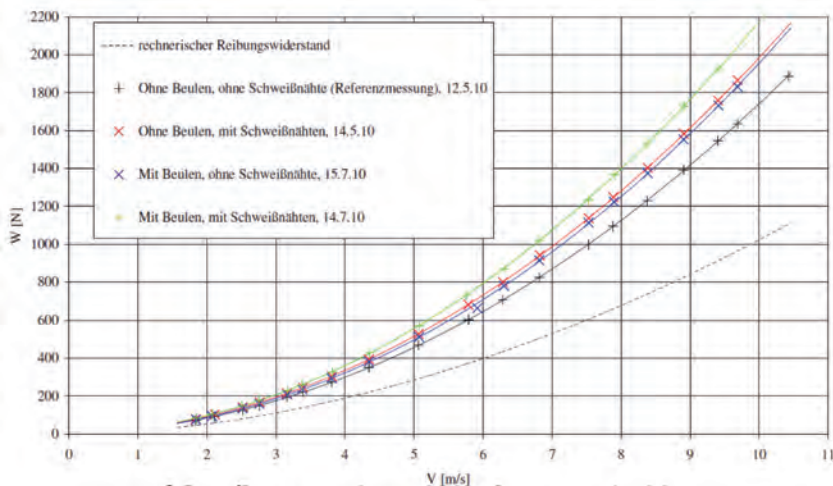


HYKAT-modul mit Messwaage und Probenkörper im Einbau (links), Feldbeule (rechts)

Der 6 m lange, zylindrische Teil des Prüfkörpers hatte zunächst die unbehandelte Oberflächenbeschaffenheit der Kunststoffrohre. Für die zweite Messreihe wurden dann sechs 3 mm hohe und 26 mm breite Schweißnahtnachbildungen in 1 m Abstand voneinander, beginnend direkt hinter dem elliptischen

Anlaufteil, ringsum aufgeschraubt. Für die dritte Messreihe wurden zusätzlich 18 ca. 80 bis 95 cm lange und ca. 40 cm breite ovale Feldbeulen in die Oberfläche eingefräst. Die Beulenlagen – jeweils 3 auf dem Umfang – zwischen den Anbauorten der Schweißnahtnachbildungen, siehe Abbildung oben.

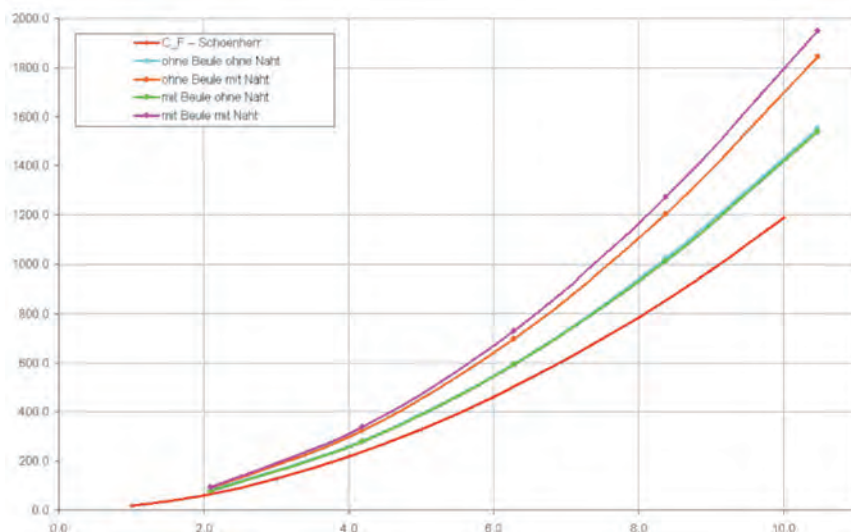
Es zeigte sich, dass Schweißnähte und Feldbeulen einen etwa gleich großen widerstandserhöhenden Einfluss haben, der bei der maximal untersuchten Reynoldszahl von $7 \cdot 10^7$ etwa 20 bis 25 % Widerstandszuwachs gegenüber dem rechnerischen Reibungswiderstand der glatten Prüboberfläche ausmacht. Die Kombination aus Feldbeulen und Schweißnähten führt zu einer weiteren drastischen Erhöhung. In diesem Zustand beträgt der Widerstandszuwachs über 40 %.



Gesamtwiderstand der Probenkörper

Numerische Untersuchung der zylindrischen Probenkörper

Die numerische Untersuchung im Maßstab 1:1 (annähernd Grossausführung) an Hand der gleichen Probenkörper durchgeführt, wie sie im HYKAT untersucht worden sind. Die Modelle wurden in vier verschiedenen Varianten modelliert: mit / ohne Beule und mit / ohne Schweißnaht. Gerechnet wurde RaNS mithilfe des HSVA-Codes 'FreSCo'. Die Modelle wurden als Probenkörper gebaut und, versehen mit einer eingebauten Messwaage, im HYKAT der HSVA bei verschiedenen Geschwindigkeiten vermessen. Die aus der Messung sowie aus der Rechnung ermittelten Widerstandskurven wurden ausgewertet und einem theoretischen Vergleich unterzogen. Es zeigte sich hierbei eine gute Übereinstimmung mit der Messung.



Ergebnisse der numerischen Simulation mit 'FreSCo' (rechts)

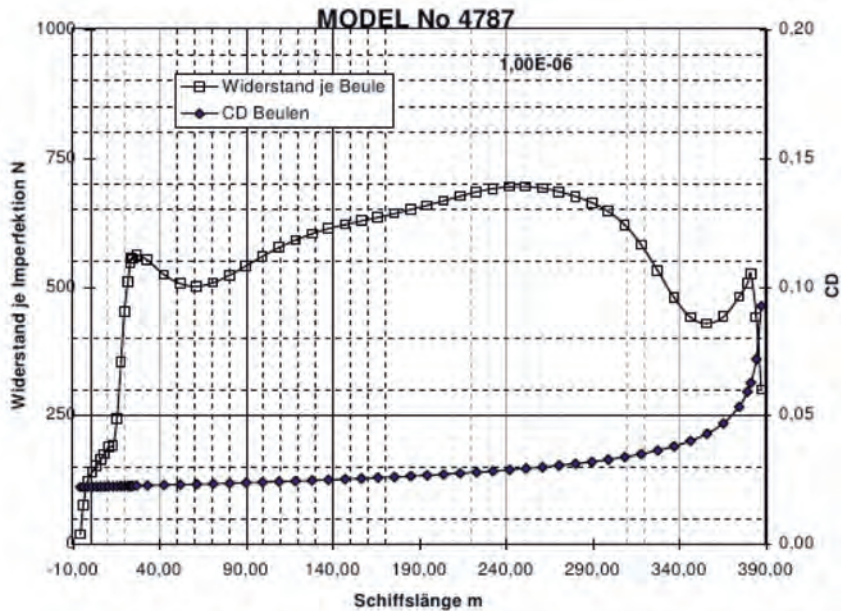
Bewertung der Ergebnisse

Vergleiche der numerischen Berechnungen mit den Messungen an den Plattenmodellen zeigen, dass die Simulation brauchbare Ergebnisse liefern, aber die Messung noch lange nicht ersetzt werden können. Zur Ermittlung der Oberflächenkräfte eignet sich das stationäre RaNS-Verfahren, zur Berechnung der Grenzschichtprofile das LES-Verfahren besser. Jedoch erwies sich keines der beiden Modelle geeignet für beide Aufgaben gleichermaßen.

Die Ruderkavitationsbeobachtung der idealen Ruder und der imperfektions-behafteten Rudergeometrie zeigt im Vergleich einen deutlichen Einfluss geometrischer Imperfektionen, insbesondere in sensiblen Bereichen wie umströmten Kanten, Absätzen und Fugen (Spalte). Eine Untersuchung der tatsächlichen Rudergeometrie ist für Schiffsneubauten praktisch nicht realisierbar. Bei der Abklärung von Schadensfällen an gebauten Schiffen könnte die Untersuchung der gebauten Rudergeometrie jedoch sinnvoll sein.

Die numerischen Untersuchungen der gleichen Ruder zeigten eine gute Übereinstimmung der Druck-Visualisierung basierend auf Druckbeiwert-Isoflächen mit der beobachteten Vorderkanten-Schichtkavitation. Jedoch sind die numerischen Verfahren derzeit noch nicht geeignet, den Kavitationstyp und damit die Gefahr von erosiver Kavitation vorherzusagen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Messung und numerischen Berechnung mit den zylindrischen Probekörpern wurde ein empirischer Ansatz zur Prognose des Widerstandsanteils durch Feldbeulen und Schweißstöße entwickelt. Die Grundlage dieses Ansatzes beruht auf einem Verfahren aus der Aerodynamik, welches mittels unabhängiger Widerstandskoeffizienten für verschiedene geometrische Fehler den jeweiligen Zusatzwiderstand abschätzt.



Prognostizierter Verlauf der Einzelwiderstände von Beulfeldern entlang der Schiffskoordinate

Auf Grundlage der so bestimmten Widerstandskoeffizienten für Feldbeulen und Schweißstöße wurde ein Prognosetool zur Bestimmung des Zusatzwiderstandes von Schiffen implementiert. Dieses summiert die Einzelwiderstände der Imperfektionen entsprechend der lokalen Grenzschichtdicke und Längenkoordinate auf der Außenhaut des Schiffes. Entsprechende Abschätzungen für den Zusatzwiderstand und mögliche Optimierungspotentiale wurden für verschiedene Schiffstypen (drei verschiedene Containerschiffsgrößen, einen Tanker und eine Mega-Yacht) exemplarisch angefertigt.

OFF-DESIGN – Hydrodynamische Berechnungsmethoden für Propulsions- und Manövrierorgane im Off-Design

T. Stoye, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft; M. Richter, EUB; T. Lücke, H. Streckwall, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

Einleitung

Im Schiffsentwurf weichen die tatsächlichen Anforderungen an das Betriebsprofil eines Schiffes häufig von der ursprünglichen Planung ab. Insbesondere im Bereich Short Sea Shipping, also auf Routen mit einer Fahrzeit von wenigen Stunden, werden die Schiffe immer flexibler eingesetzt. Im Rahmen eines ökonomischen und sicheren Schiffsbetriebes stellt sich hierbei für den Schiffsentwurf die Aufgabe, einen konkurrenzfähigen Betrieb auf einem breiteren Einsatzprofil zu gewährleisten. Ebenso kann der Einsatz auf einer vorgegebenen Route ein breites Betriebsprofil erfordern, wenn beispielsweise ein Teil der Fahrtroute durch Flachwasser führt.

Ziel des Vorhabens OFF-DESIGN war es daher, hydrodynamische Entwurfsmethoden zur Verfügung zu stellen, welche die Berücksichtigung und Optimierung eines breiten Einsatzspektrums erlauben. Dabei ging es zunächst darum, ein typisches Betriebsspektrum eines Schiffsneubaus im täglichen Betrieb zu erfassen. In umfangreichen Modellversuchen wurde anschließend untersucht, wie sich in der Großausführung typischerweise vorkommende Betriebszustände auf Propulsions- und Manövrierorgane auswirken. Anhand dieser Messergebnisse konnten dann Entwurfsmethoden entwickelt werden, welche einen optimierten Entwurf auf Basis der zu erwartenden Off-Design Zustände ermöglichen.

Großausführungsmessung

Zur Erfassung des tatsächlichen Betriebsprofils wurde der FSG-Neubau Nr. 738 „Mazarine“ mit einer umfangreichen Datenerfassung zur Langzeitmessung versehen. Verschiedenste Betriebsparameter wurden hierzu im Minutentakt über einen Zeitraum von über einem Jahr erfasst. Bei dem Schiff handelt es sich um eine Einschrauber-RoRo-Fähre mit einer Länge von 195m, welche sich im alternierenden Pendelverkehr auf den Routen Zeebrugge (Belgien) – Gravesend (Themsemündung, UK) und Zeebrugge - Dublin (Irland) befindet (Abbildung 1). Insbesondere in der Themsemündung fährt das Schiff über längere Zeit über Flachwasser, zudem gibt es dort Geschwind-

keitsbeschränkungen. Unter anderem wurden die GPS-Position des Schiffes, Tiefgang und Trimm sowie Propellerdrehzahl, Propellersteigung, Ruderwinkel und Brennstoffverbrauch der Hauptmaschine erfasst.

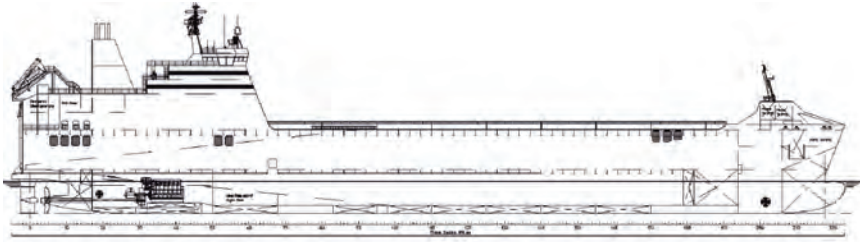


Abbildung 1: FSG-Neubau Nr. 738 „MAZARINE“

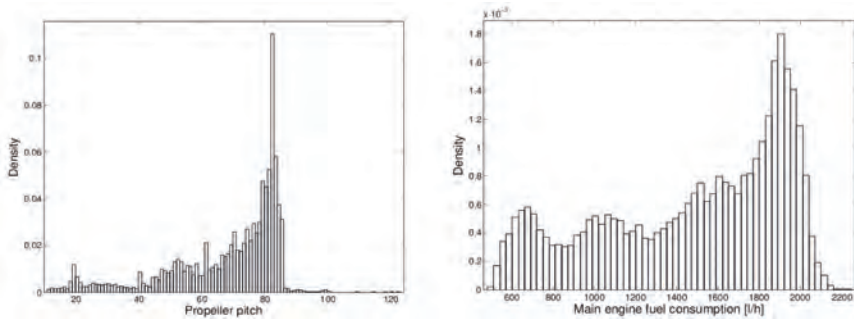


Abbildung 2: Steigungsverteilung (links) und Brennstoffverbrauch der Hauptmaschine (rechts)

In Abbildung 2 ist die gemessene statistische Steigungsverteilung des Propellers und der Brennstoffverbrauch des Schiffes während des Zeitraums Juni 2009 bis Juni 2010 dargestellt. Dies gibt einen Überblick über ein typisches Betriebsspektrum.

Ein Schwesterschiff (Bn. 743 „Amandine“) wurde mit Beobachtungsfenstern über dem Propeller ausgestattet, sodass insbesondere die Beobachtung und Validierung des Druckseitenkavitationseinsatzes ermöglicht werden sollte. Zusätzlich wurde hier eine Beobachtungskamera auf dem Ruder installiert, um eine optimale Perspektive auf die Propellerdruckseite zu erhalten.

Modellversuche

Zusätzlich wurden die hydrodynamischen Begebenheiten im Off-Design durch entsprechende Modellversuche weiter untersucht. Neben Widerstands-, Propulsions- und Propellerfreifahrtversuchen mit verstellten Pro-

pellersteigungen wurden auch Driftversuche mit dem CPMC (Computerized Planar Motion Carriage) der HSVA sowie Nachstrommessungen und insbesondere Kavitationsbeobachtungen am driftenden Schiff im hydrodynamischen Kavitationstunnel (HYKAT) der HSVA durchgeführt.

Um über konventionelle Kavitationsbeobachtungen hinaus im Kavitationstunnel ein 3D-Strömungsbild um Propeller und Ruder zu erhalten, wurden PIV (Particle Image Velocimetry)-Messungen durchgeführt. Üblicherweise kommen bei diesem Verfahren Partikel zum Einsatz, welche dem Wasser zugefügt werden. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde das Wasser alternativ mit Luft angereichert, um die Wasserqualität des Kavitationstunnels zu erhalten. Die das Modell umströmenden Luftblasen wurden anstelle der Partikel zur Strömungsvermessung des bei dieser Messung Kavitationsfrei betriebenen Propellers genutzt. In unterschiedlichen Höhen im Bereich des Propellers wurden dazu Laserschnittebenen erzeugt, welche von einer Kamera unterhalb des Schiffes aufgenommen wurden (siehe Abbildung 3). Diese Versuche wurden für unterschiedliche Propellersteigungen und auch für Driftwinkel bis 4° durchgeführt. Das Ergebnis ist dann ein detailliertes Bild der horizontalen Strömungskomponenten in unterschiedlichen horizontalen Schnittebenen. Hier sind die Geschwindigkeiten in Relation zur Schiffsgeschwindigkeit dargestellt. Es ist deutlich die Grenzschicht und die einzelnen Wirbelschleppen hinter dem Propeller erkennbar.

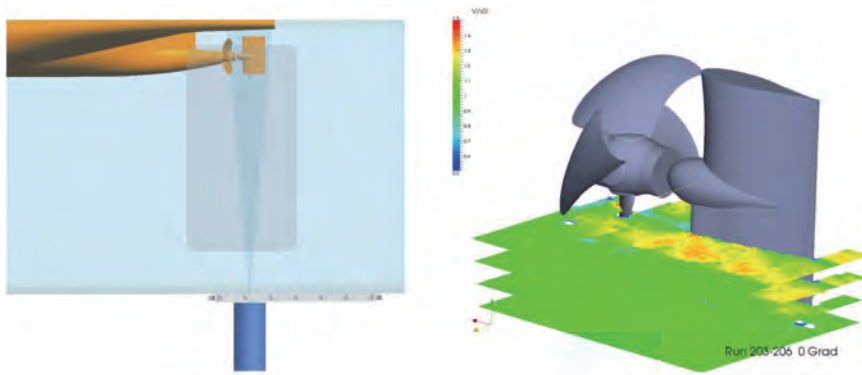


Abbildung 3: Schematische Darstellung der PIV-Messung im HYKAT (links), gemessene Strömungsgeschwindigkeiten (rechts)

Da im Off-Design Betrieb insbesondere das Kavitationsverhalten des Propellers von Interesse ist, wurden im HYKAT für unterschiedliche Propellersteigungen Kavitationseinsatzdiagramme am Propeller ermittelt und zusätzlich der Kavitationseinsatz am Ruder ermittelt. Dies geschah auch vor dem Hintergrund, dass die numerische Berechnung des Druckseitenkavitationseinsatzes mit großen Unsicherheiten behaftet ist, diese jedoch bei der Ausle-

gung des Propulsionskonzeptes im Schiffsentwurf häufig von Bedeutung ist. Des Weiteren sind relativ wenige Kavitationseinsatzdiagramme mit den dazugehörigen Propellergeometrien und Nachstromfeldern verfügbar, sodaß die Berechnungsmethoden nur unzureichend validiert werden können. Insbesondere bei reduzierter Propellersteigung oder etwa bei Driftwinkeln sind hier keine Daten verfügbar, der Bedarf für den praktischen Schiffsentwurf jedoch erheblich. In Abbildung 4 ist das Resultat der Messung des Druckseiten-Randwirbeleinsatzes für unterschiedliche Driftwinkel dargestellt, zusätzlich ist die Propulsionskurve für unterschiedliche Geschwindigkeiten eingezeichnet. Hieraus ist ersichtlich, dass der Driftwinkel den Kavitationseinsatz durchaus beeinflusst. Desweiteren wird deutlich, dass für die Umrechnung der Kavitationszahl σ_n in die Großausführung nach McCormick ($m=0.3$) weiterer Validierungsbedarf besteht.

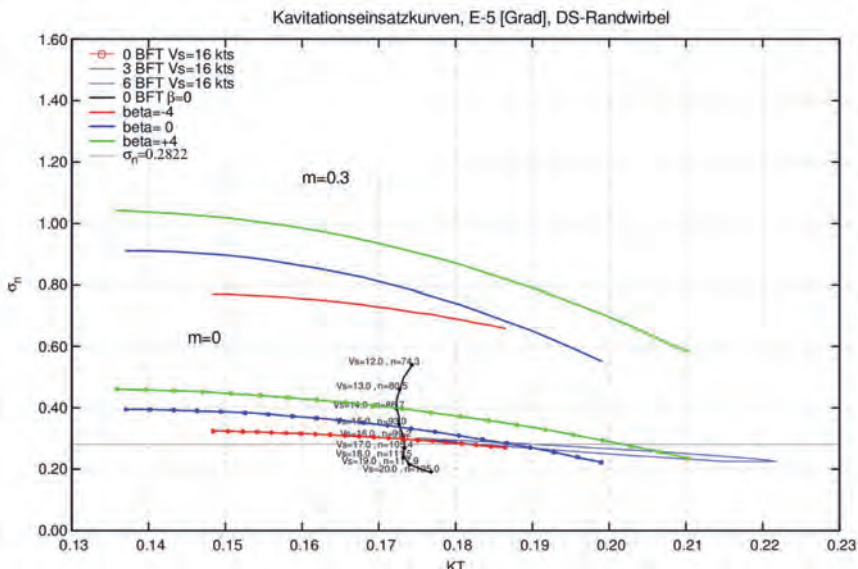


Abbildung 4: Druckseiten-Kavitationseinsatzdiagramm für unterschiedliche Driftwinkel bei reduzierter Propellersteigung E-5°.

Entwurfsmethoden

Parallel zu den Modellversuchen wurden Entwurfsmethoden entwickelt, welche eine Berücksichtigung von Off-Design Zuständen ermöglichen. Dabei wurde insbesondere auf ein enges Zusammenspiel zwischen Modellierungs- und Berechnungsverfahren Wert gelegt.

Diese Möglichkeit wurde mit dem Schiffsentwurfssystem RDE (Rich Design Environment) geschaffen, welches seit einigen Jahren bei der FSG im Einsatz ist. Das System basiert auf der Eclipse-Plattform, welche Javabasiert

über ein OSGi-Framework (Open Services Gateway initiative) die lose Koppelung von Softwarekomponenten ermöglicht. Hierdurch wird es möglich, unterschiedlichste Komponenten flexibel in das RDE-Basissystem einzubinden und miteinander interagieren zu lassen. Im Rahmen des Vorhabens wurden neben einem Propellerentwurfswerkzeug (siehe Abbildung 5) weitere Plugins zur hydrodynamischen Bewertung des Propellers mit und ohne Nachstrom sowie mittels Wirbelgitter- oder RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes)-Verfahren entwickelt. Hierbei wurde Softwareseitig auf eine klare Trennung zwischen Berechnungsmethoden und Benutzerschnittstellen geachtet. Desweiteren wurden in dem Vorhaben Plugins zur Bewertung und Darstellung von Propellerfreifahrten, Nachstromfeldern, Widerstand- und Propulsion sowie Maschinencharakteristika integriert.

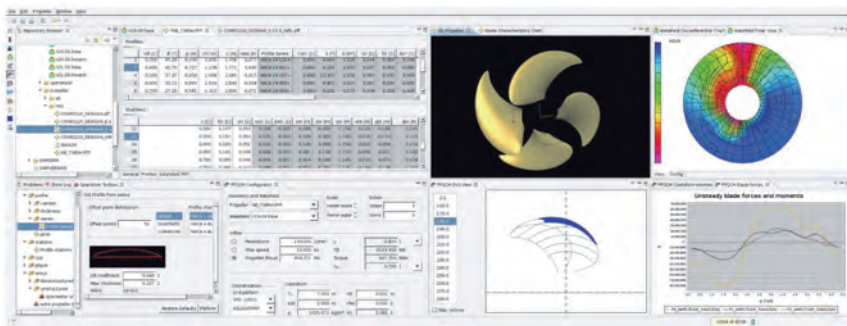


Abbildung 5: Interaktive Propellerhydrodynamik im Schiffsentwurfssystem RDE

Modellierung und Hydrodynamik von Verstellpropellern

Für den Propellerentwurf ist es auf der einen Seite von Bedeutung, die Propellergeometrie auf Zylinderschnitten beispielsweise durch NACA-Profile definieren zu können. Parallel dazu sollte allerdings die Möglichkeit bestehen, die Blattgeometrie möglichst flexibel gestalten zu können.

Bei der geometrischen Beschreibung von Verstellpropellern besteht zusätzlich die Herausforderung, dass die übliche (und für den Propellerentwurf auch sinnvolle) Beschreibung von Profilaufmassen auf Mantelflächen nach der Verstellung eine neue Definition der Profilaufmasse erfordert: Bei Entwurfssteigung haben die die Blattgeometrie beschreibenden Profile Helixform, welche sich z.B. bei Nullsteigung in einen Kreis oder bei Segelstellung zu einer Geraden wandelt. Diese Problematik ist in Abbildung 6 verdeutlicht. Hierzu wurde ein Verfahren entwickelt, welches durch entsprechende Triangulierung und Interpolation auf der Blattoberfläche eine neue profilbasierte Propellerblattbeschreibung erzeugt. Somit können auch Propellergeometrien

mit verstellter Steigung geometrisch richtig dargestellt und mit allen im Entwurfssystem zur Verfügung stehenden Methoden bearbeitet werden.

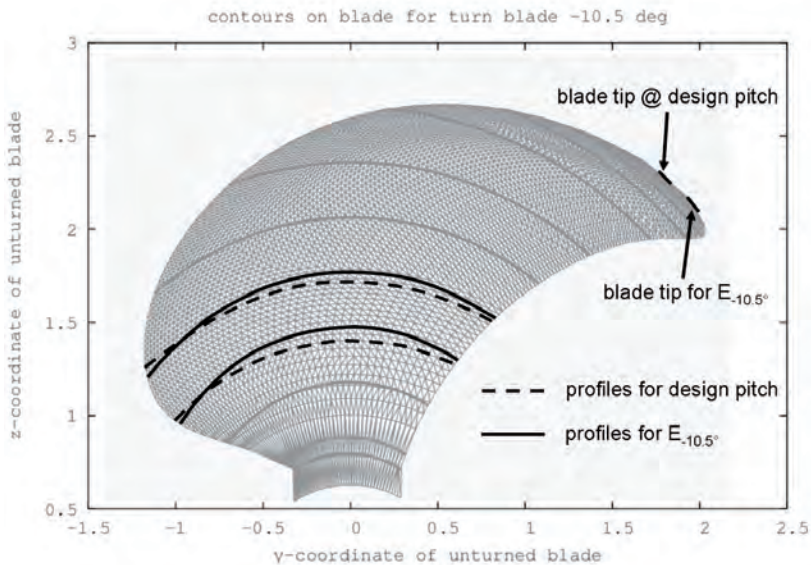


Abbildung 6: Die Blattgeometrie beschreibende Profile bei Entwurfssteigung und bei um 10.5° reduzierter Steigung

Bei der hydrodynamischen Bewertung wurden während des Vorhabens unterschiedliche Verfahren hinsichtlich ihres Gültigkeitsbereichs untersucht. Hierbei wurden zum einen Schub- und Momentencharakteristika mit den gemessenen Modellversuchen verglichen, des Weiteren war jedoch auch die Bewertung des Kavitationsverhaltens, insbesondere die Möglichkeit der Berechnung des Druckseitenkavitationseinsatzes bei verstellten Propellerflügeln von Interesse.

Bei der Berechnung der Freifahrtcharakteristika stellte sich heraus, dass leicht (um wenige Grad) verstellte Propellerflügel mit Fortschrittsgraden im Bereich des Wirkungsgradmaximums mit gängigen Wirbelgitterverfahren hinreichend präzise bewertet werden können. Ein entscheidender Vorteil dieser Verfahren ist der geringe Modellierungs- und Berechnungsaufwand. Daher wurde ein solches instationäres Wirbelgitterverfahren (QCM), welches bei der HSVA entwickelt wurde, in RDE eingebunden. Eine entscheidende Neuerung besteht dabei darin, dass das Verfahren „interaktiv“ eingesetzt werden kann, d.h. jede Modifikation der Propellergeometrie, dem zugrunde liegenden Nachstromfeld oder der Betriebsbedingungen wird sofort berechnet und innerhalb weniger Sekunden dargestellt. Dies wurde sowohl für die Berechnung der Propellerfreifahrt wie auch für die Ermittlung der instationä-

ren Propellerkräfte und -momente sowie der Kavitationsprognose durchgeführt.

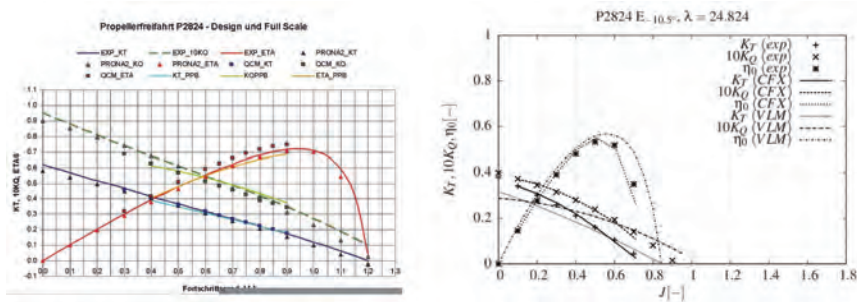


Abbildung 7: Freifahrtcharakteristika unterschiedlicher Wirbelgitterverfahren bei Entwurfssteigung (links), Vergleich von Wirbelgitter- und RANS-Verfahren mit Modellversuchen bei reduzierter Steigung (rechts)

Bei stärker verstellten Flügeln stellt sich jedoch heraus, dass die potentialtheoretischen Verfahren an ihre Grenzen stoßen. Daher wurde zusätzlich eine Schnittstelle für eine automatische RANS-Berechnung entwickelt. Die Propellergeometrie wie auch die Randflächen des Strömungsvolumens wird dazu trianguliert und ein entsprechendes Skript erzeugt, mit dem ANSYS-ICEM dann ein Volumengitter generiert. Anschliessend werden für vorher definierte Fortschrittsgrade Berechnungen mit ANSYS-CFX durchgeführt und die resultierenden Kräfte und Momente als Propellerfreifahrt an RDE zurückgegeben. Dieser Prozeß läuft im Hintergrund, sodaß RDE währenddessen weiter genutzt werden kann. Eine Propellerfreifahrtcharakteristik lässt sich somit innerhalb weniger Stunden berechnen. Dieses Verfahren ist insbesondere für große hydrodynamische Anstellwinkel von Interesse, bei denen Wirbelgitterverfahren keine oder keine genauen Ergebnisse mehr liefern. Ein Beispiel einer Propellerfreifahrt eines Propellers mit um 11° reduzierter Steigung mit einem hydrodynamischen Anstellwinkelbereich von 90° ist in Abbildung 9 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass sich im Prinzip jede Flügelstellung in jedem beliebigen Betriebszustand des Propellers durch das Verfahren mit hinreichender Genauigkeit berechnen lässt. Der Berechnungsaufwand ist zwar relativ groß, durch eine Einbindung einer entsprechenden Methode wurde der Modellierungsaufwand jedoch minimiert, sodaß sich solche Berechnungen „über Nacht“ erzeugen lassen und somit im frühen Schiffsentwurf zur Anwendung kommen können.

Da für eine viskose Berechnung der Propellerfreifahrt in der Regel immer nur ein Propellerblatt modelliert wird, sind für die automatische Vernetzung des Propellers unterschiedliche Vernetzungsstrategien notwendig: Zwischen den Propellerblättern werden periodische Schnittstellen eingefügt, welche einen

möglichst großen Abstand zur Geometrie haben sollten. Zwei mögliche Alternativen sind in Abbildung 8 dargestellt. Während bei Propellern mit einer Steigung größer der Entwurfssteigung oder bei Festpropellern ein periodisches Interface in Helix-Form notwendig ist, ist dies insbesondere bei reduzierter Propellersteigung nicht mehr möglich. Daher wird die Randbedingung gerade zwischen den Propellerblättern durchgeführt, dann jedoch mit einer entsprechenden radialen Verschiebung, um die Flügelrücklage darzustellen.

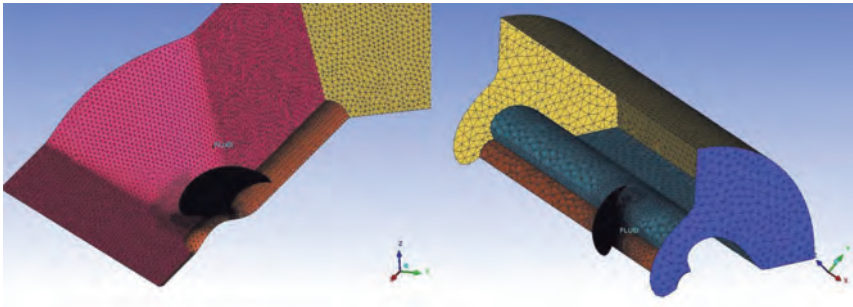


Abbildung 8: Erzeugtes Volumengitter für Festpropeller und Propeller mit erhöhter Steigung (links), Volumengitter für Propeller mit reduzierter Steigung (rechts)

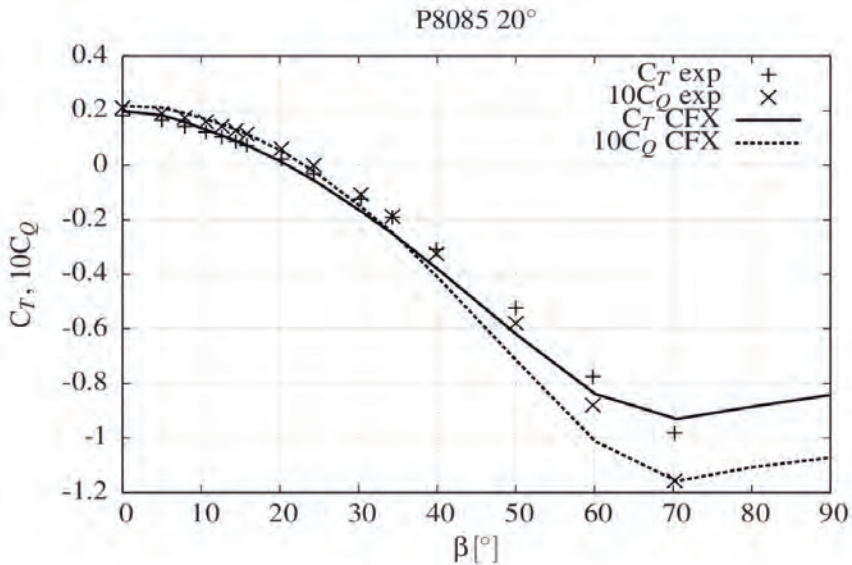


Abbildung 9: Vergleich von gemessener und mit RANS berechneter Propellerfreifahrtcharakteristik bei großen hydrodynamischen Anstellwinkeln

Da bei der Auslegung des Propulsionskonzeptes der Propellerentwurf eng mit den Manövrierorganen einhergeht, war eine Bewertung der Berechnungsverfahren für den Ruderentwurf ebenfalls von Bedeutung. Die Ergebnisse der oben erläuterten PIV-Messungen im HYKAT wurden daher mit den Ergebnissen einer RANS-Berechnung verglichen. Das Simulationsmodell bestand dabei aus einer Einstömungsbedingung vor dem Propeller, die dem gemessenen Nachstromfeld entsprach. Somit wurde auf eine (sehr aufwändige) Vernetzung des Rumpfes verzichtet. In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die globalen Strömungsverhältnisse recht gut übereinstimmen. Aufgrund des relativ groben Gitters ab einem gewissen Abstand von der Geometrie lassen sich Details wie zum Beispiel der Spitzenwirbel, welcher bei der PIV-Messung teilweise noch erkennbar ist, jedoch nicht auflösen. Dennoch stellt das Verfahren eine solide Grundlage für die Gestaltung der Rudergeometrie im frühen Schiffsentwurf dar, da insbesondere die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse direkt am Ruder von Interesse sind.

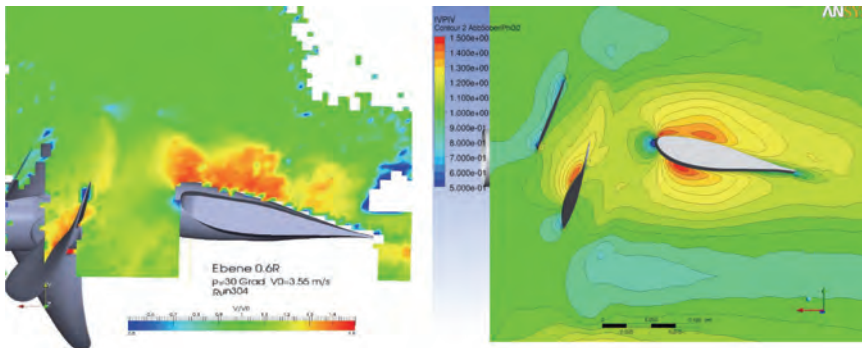


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten durch die PIV-Messung (links) und RANS-Berechnung bei 5° reduzierter Propellersteigung (rechts)

Bei der Betrachtung der instationären Zuströmverhältnisse zum Ruder fällt auf, dass diese starken Fluktuationen unterliegen. Ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Anströmwinkeln in den gemessenen horizontalen Ebenen hinter dem Propeller sind in Abbildung 11 dargestellt. In der Nähe der Propellernabe ($y/R < 0.4$) weichen die Berechnungen von den Messungen ab, da so dicht an der Nabe keine Informationen über den Nachstrom vorlagen. Bemerkenswert ist hierbei jedoch, dass selbst bei reduzierter Propellersteigung ($E=5^\circ$) eine Fluktuation des Strömungswinkels von ca. 10° bei unterschiedlichen Phasenlagen des Blattes messbar ist. Dies ist für den Ruderentwurf von Bedeutung, da die Anströmwinkel für eine kavitationsfreie Auslegung des Ruders wichtig sind.

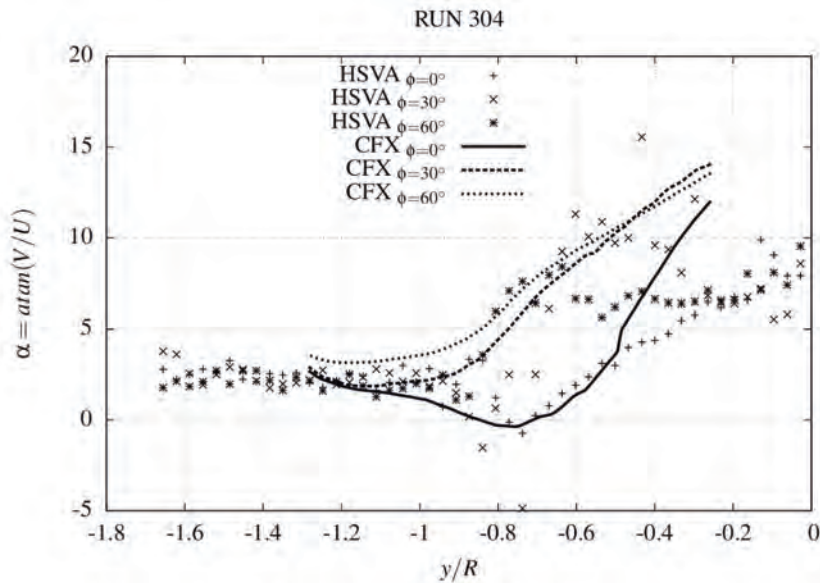


Abbildung 11: Strömungsrichtung in einer horizontalen Ebene unterhalb der Propellernabe für unterschiedliche Phasenlagen des Propellers

Kavitationseinsatzdiagramme

Insbesondere bei einem breiten Betriebsspektrum ist die Kenntnis von Kavitationseinsatzkurven von Bedeutung. Diese zeigen an, inwieweit sich bei Schub- bzw. Fortschrittsgradänderungen z.B. aufgrund von Wind-, Wetter- oder Beladungsbedingungen das Kavitationsverhalten ändert bzw. wie groß bei den jeweiligen Betriebspunkten die Gefahr des Einsatzes von Druckseitenkavitation ist. Durch den Vorhabenspartner EUB wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der unter Berücksichtigung der jeweiligen Off-Design Bedingungen den Kavitationseinsatz reduziert. Das entwickelte Entwurfskonzept geht von einem Startentwurf aus, der für die Off-Designzustände Teillast, Überlast und Schräganströmung bewertet und anschließend in einem Feinentwurf hinsichtlich Leistung, Schub und Kavitation mittels Steigungs-Wölbungs-Korrektur optimiert wird. Dabei wird das sogenannte Bucket-Verfahren angewandt. Das Kavitationsbucket wird mit dem realen Arbeitsbereich des Propellers kombiniert, sodass schließlich Aussagen über die Kavitationsgefahr getroffen werden können. Im entwickelten Entwurfsverfahren wird daher insbesondere das Kavitationsverhalten in den verschiedenen Off-Designzuständen in einem bisher nicht praktizierten Umfang betrachtet und im Entwurf berücksichtigt.

Aufgrund der großen im Entwurf zu verarbeitenden Datenmenge und dem damit verbundenen großen Bearbeitungsaufwand, wurden automatisch agierende Optimierungsverfahren erstellt. Durch Einlesen der Schiffs-, Betriebs- und Nachstromdaten können die Entwurfsprogramme zentral gesteuert und mit Hilfe eines neu implementierten linearen Optimierungsverfahrens verfeinert werden. Kernstück des Entwurfssystems bildet das parametrische Propellermodell nach Meier. Die Entwurfsdaten des Grobentwurfs werden dabei in ein Parametermodell umgewandelt, wodurch der automatisierte Entwurf des Propellers mit optimaler Sicherheit gegen Druckseitenkavitation möglich ist.

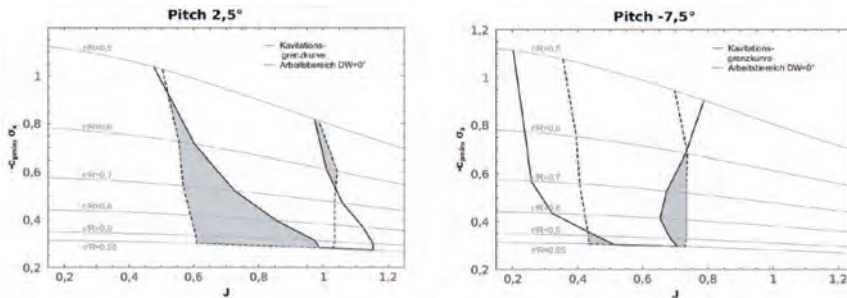


Abbildung 12: Kavitationseinsatzdiagramme für erhöhte und für reduzierte Propellersteigung

Auf Basis dieser Verfahren wurde ein alternativer Propellerentwurf entwickelt, welcher anschliessend im Kavitationstunnel getestet wurde. Die berechneten Kavitationseinsatzdiagramme sind in Abbildung 12 dargestellt.

Durch die HSVA wurden parallel die bestehenden Berechnungsverfahren weiterentwickelt. Insbesondere zur Berechnung der Druckseitenkavitation stellte sich heraus, dass eine hinreichend genaue Modellierung der Flügelvorderkante notwendig ist, da kleine geometrische Abweichungen einen großen Einfluss auf die Druckverteilung und den Kavitationseinsatz an der Flügelvorderkante haben. Zum einen ist hier eine bessere Modellierung des Paneelsystems für das Wirbelgitterverfahren notwendig, des Weiteren hat sich herausgestellt, dass eine „künstliche“ Aufdickung der Flügelvorderkante nach einem bestimmten Schema zu einer besseren Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen führt.

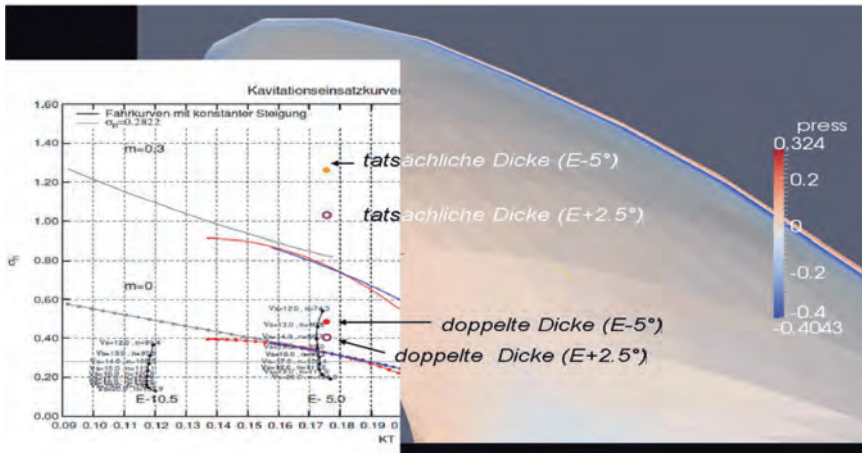


Abbildung 13: Kavitationseinsatz bei aufgedickter Flügelvorderkante

Entwurfsbeispiel

Im Folgenden soll ein Beispiel eines praktischen Schiffsentwurfs präsentiert werden, bei dem die innerhalb des Vorhabens entwickelten Methoden zum Einsatz kamen. Bei dem Projekt handelt es sich um eine Fähre, welche ein relativ breites Geschwindigkeitsspektrum aufweist: Während die Entwurfsgeschwindigkeit bei 18 Knoten liegt, soll das Schiff über längere Zeiträume mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 10-12 Knoten betrieben werden. Da es sich bei der Hauptmaschine um einen Viertakt-Mittelschnellläufer handelt, lässt sich die Motordrehzahl nur sehr eingeschränkt absenken, da ansonsten nicht mehr ausreichend Leistung zur Verfügung steht. Dementsprechend müsste die reduzierte Geschwindigkeit überwiegend über den Verstellpropeller realisiert werden. Daher besteht hier die Gefahr von Druckseitenkavitation, was aufgrund der langen Betriebszeiten in diesem Modus vermieden werden sollte.

Da das Schiff als Zweischauber entworfen wurde, besteht alternativ die Möglichkeit, nur einen Propulsionsstrang für den Antrieb zu nutzen. Die zweite Welle wird dann entweder von der Hauptmaschine entkoppelt und läuft frei mit oder es wird eine sogenannte „Segelstellungsnahe“ installiert, welche die Steigung des Propellers soweit erhöht, dass der Propeller kein Moment mehr erzeugt. Dem Zusatzwiderstand des nicht an der Propulsion beteiligten Propellers steht dann ein günstigerer Propulsionswirkungsgrad des antreibenden Propellers wie auch eine bessere Auslastung der Hauptmaschine gegenüber. Um dies zu quantifizieren, wurden die innerhalb des Vorhabens OFF-DESIGN entwickelten Methoden angewendet. Zunächst wurde der Zusatzwiderstand des Propellers in Segelstellung ermittelt. Die Druckverteilung der RANS-Berechnung ist in Abbildung 14 dargestellt. Durch eine Propulsi-

onsprognose im Einwellenbetrieb und einem (aufgrund der höheren Auslastung der Maschine günstigeren) spezifischen Brennstoffverbrauch kann dann der Brennstoffverbrauch pro gefahrene Seemeile ermittelt werden. In dem hier präsentierten Beispiel ist der Einwellenbetrieb bei 10 kn ca. 25% günstiger, zusätzlich ist die Gefahr von Druckseitenkavitation eliminiert.

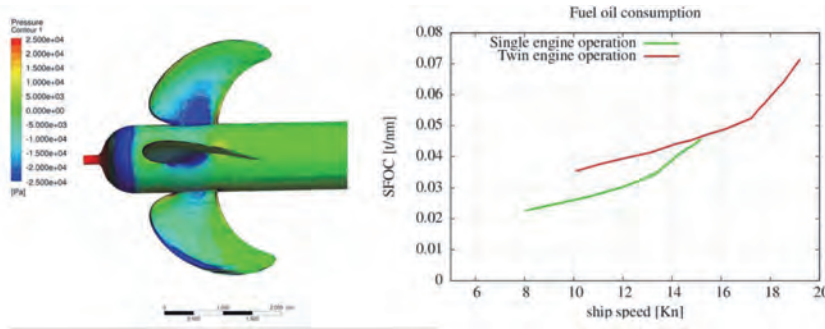


Abbildung 14: Dynamische Druckverteilung des Propellers in Segelstellung (links), Brennstoffverbrauch im Ein- und Zweiwellenbetrieb

Zusammenfassung und Ausblick

Mittels Großausführungsmessungen und der durchgeführten Modellversuche konnten hydrodynamische Berechnungsmethoden angepasst bzw. erweitert werden. Insbesondere bei Wirkungsgrad und Kavitationsverhalten von Verstellpropellern konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden. Parallel wurden Berechnungsmethoden entwickelt, welche eine bessere direkte Bewertung von Off-Design Zuständen im Schiffsentwurf ermöglichen. Dadurch können die Schiffsentwürfe besser für komplexe Betriebsprofile optimiert werden. Viele der innerhalb des Vorhabens entwickelten Methoden werden mittlerweile im Entwurf angewendet, da die während des Vorhabens ermittelten Gültigkeitsbereiche der Prognosemethoden zu einer Absicherung der Prognosequalität führen. Durch Steigerung von Prognosequalität und –umfang wird die Wettbewerbsfähigkeit der mit den entwickelten Methoden erstellten Entwürfe weiter gesteigert.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Verbundprojektes OFF-DESIGN (Förderkennzeichen 03SX260) erstellt. Wir danken dem BMWi sowie dem Projektträger Jülich für die Förderung des Projektes.

Literatur

- Carlton, J.S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion*. 2nd ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK.
- Lücke, T. & Streckwall, H. (2009). 'Cavitation Research on a Very Large Semi Spade Rudder'. *Proceedings of The First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- Streckwall, H. (1997). 'Description of a Vortex-Lattice Method for Propellers in Steady and Non Steady Flow'. *HSVA Report Nr. CFD 18/97*, Hamburg, Germany.
- Stoye, T. (2011). 'Propeller Design and Propulsion Concepts for Ship Operation in Off-Design Conditions'. *Proceedings of The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany.

Vorhaben ROT – RObots in Tanks

Leif Christensen*, Thomas Vögele*, Frank Kirchner*, Niklas Fischer**, Reinhard Ahlers**, Thomas Witolla***, Lars-Erik Etzold***, George Psarros****

(* DFKI GmbH - Robotics Innovation Center, ** Balance TC GmbH, *** MEYER WERFT GmbH, **** Det Norske Veritas (Norwegen))

Kurzbeschreibung

Die manuelle Inspektion und Wartung von Schiffstanks ist eine für Menschen gefährliche und kostenintensive Aufgabe, die in dem Deutsch-Norwegischen ERA-NET Martec Verbundprojekt ROT (FKZ 03SX269) in Teilen an einen Roboter übertragen werden konnte. Basierend auf Anforderungen von Werften, Reedereien und Klassifikationsgesellschaften wurde ein autonomes und kosteneffizientes robotisches System konzipiert, implementiert und in einem komplexen Testtank getestet und demonstriert. Der Roboter besteht aus flexibel verbundenen austauschbaren Modulen für verschiedene Aufgaben (Sensorik, Verarbeitung, Antrieb, Manipulator, Energieversorgung), die je nach Einsatzszenario unterschiedlich arrangiert werden können. Im Gegensatz zu Lokomotionstechnologien von kletternden oder laufenden Robotern nutzt das erarbeitete Konzept eine einfache, thermisch verformbare und korrosionsfreie Plastikschiene, die vor Ort frei im dreidimensionalen Raum verlegbar ist und hohe Nutzlasten sowie Überkopf-Arbeiten des Roboters erlaubt. Die Entwicklung des Inspektionssystems wurde durch eine Life-Cycle-Cost-Analyse (LCC) begleitet, die eine Kostenreduktion des bisherigen Inspektionsprozesses sicherstellte.

Einleitung

Ballastwasser wird genutzt, um teilbeladene oder Schiffe ohne Ladung zu trimmen. Soweit benötigt, wird Ozean- oder Hafenwasser in Ballastwassertanks (BWTs) eingeleitet, um die Masseverteilung des Schiffes anzupassen. Da das genutzte Wasser typischerweise mit Algen, Plankton und anderen Organismen versetzt ist, sowie aufgrund der aggressiven Natur von Salzwasser, weisen BWTs häufig Fäulnis- und Korrosionserscheinungen auf und benötigen häufig wiederkehrend Inspektion, Reinigung und Reparatur. Bis dato ist die Inspektion und Wartung von BWTs nicht während des Betriebs des Schiffes möglich, so dass die Schiffseigner zu kostenintensiven (Arbeitskosten, Ausfallzeiten) Werftaufenthalten gezwungen sind. BWTs werden typi

scherweise dort eingebaut, wo der Platz nicht für andere Zwecke benötigt wird. Als Konsequenz sind sie meist eng, verschachtelt und schlecht belüftet. Sie sind zwar so konstruiert, dass sie durch Menschen betreten werden können, allerdings ist es eine dreckige, ungemütliche und gesundheitsgefährdende Arbeitsumgebung, in die sich der Mensch begeben muss. Manuelle Arbeit in einer solchen Umgebung ist ermüdend und trägt kurz- sowie langfristige Gesundheitsrisiken in sich. Dessen ungeachtet werden Beschichtung, Reinigung, Inspektion und Reparatur manuell durchgeführt, eine kosteneffiziente Automation dieser Prozesse war bisher aufgrund der Komplexität der Arbeitsumgebung sowie der beschränkten Flexibilität robotischer Systeme nicht möglich. Soweit Roboter in die Lage versetzt werden können die oben genannten Prozesse zu übernehmen, würden diese wesentlich beschleunigt und die Gesundheitsrisiken der Arbeiter vor Ort minimiert. Werften, Reeder und Klassifikationsgesellschaften könnten die Kosten für Inspektion und Wartung reduzieren und damit ihre Konkurrenzfähigkeit erhöhen.

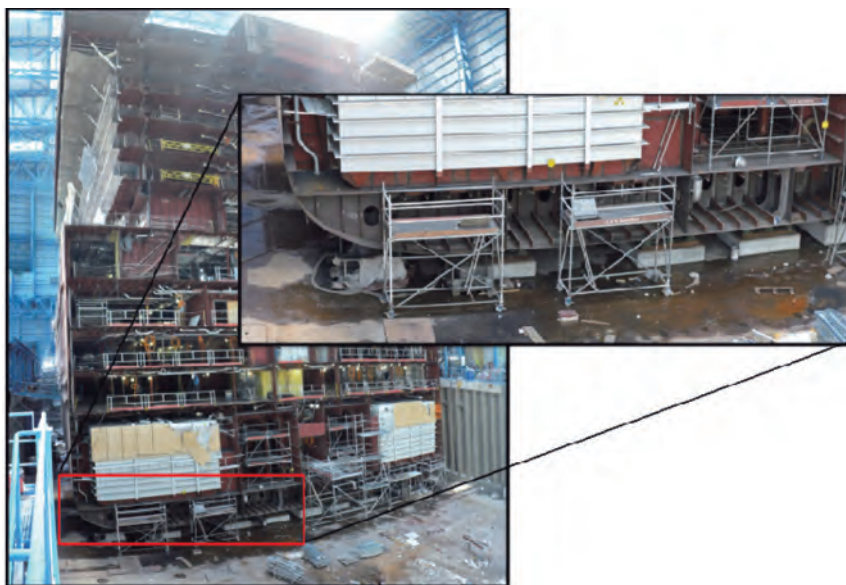


Abbildung 1: Typische Platzierung von Ballastwassertanks in Kreuzfahrtschiffen

Das deutsch-norwegische ERA-NET Martec Verbundprojekt ROT (RObots in Tanks) adressiert diese Herausforderungen, indem es die Nutzeranforderungen analysiert, bestehende robotische Konzepte in Hinblick auf den Einsatz in Ballastwassertanks evaluiert und weiterentwickelt sowie in einem robotischen Demonstrator umsetzt und testet. Die Entwicklung wird von einer Lebenszyklus-Kostenanalyse begleitet und es werden Richtlinien, bzw. Emp-

fehlungen für den Schiffbau entwickelt, wie Ballastwassertanks zukünftig „roboterfreundlich“ ausgelegt werden können.

Anforderungen an Tankinspektionen

Gemäß den internationalen Verordnungen der IMO ([5], [6], [7]) müssen alle Schiffe während ihrer gesamten Lebenszeit Inspektionen unterzogen werden. Diese müssen sowohl den gesetzlichen als auch den klasseninternen Inspektionsvorschriften entsprechen. In der Rolle einer international anerkannten Organisation führen diese die Prüfungen stellvertretend für die jeweiligen Flaggenstaaten durch. Hierbei handelt es sich zusammenfassend um die Überprüfung eines ordnungsgemäßen Zustands von Rumpf, Maschinen und Ausstattung der Schiffe als auch um die Einhaltung der geltenden Standards. Die Anzahl der Überprüfungen wird gemäß einheitlicher Anforderungen der IACS [4] festgelegt und ist bindend für alle IACS-Mitglieder. Laut regulärem Ablauf wird jedes Jahr eine bestimmte Anzahl von Überprüfungen durchgeführt, die so, nach Ablauf eines Fünf-Jahres-Zyklus, zu einer Erneuerung des Klassezeichens führen. Entsprechend dem fortschreitendem Alter eines Schiffes steigen sowohl der Umfang als auch die Intensität der Inspektionen.

Um eine gründliche Überprüfung eines Tanks zu gewährleisten, müssen zuvor alle Oberflächen und Bereiche durch den Betreiber (z.B. Reeder) gereinigt werden. Die Reinigung beinhaltet auch das Entfernen aller lose anhaftenden Korrosionsflächen. Alle Flächen sollen ausreichend von Wasser, Ablagerungen, Schmutz, Ölrückständen etc. befreit sein, um Korrosion, Verformungen, Risse oder andere Schäden (z.B. Verkrümmungen, Ausbeulungen, Kerben etc.) erkennbar zu machen. Sollten zwischen den Inspektionen prüfungsrelevante Defekte auftreten, so ist der Betreiber verpflichtet umgehend die entsprechende Klassifizierungsgesellschaft zu benachrichtigen. Mittels Kontrollen und Messungen in verschiedenen Prüfungskategorien soll ermittelt werden, ob sich die Gesamtstruktur unter Berücksichtigung von auftretenden Beschädigungen und Korrosion (z.B. Verkrümmungen, Ausbeulungen, Kerben etc.) weiterhin in zufriedenstellendem Zustand befindet. Ist eine allgemeine Prüfung fällig, wird zunächst aus einigem Abstand (z.B. von der Tankmitte aus) der Gesamtzustand rein visuell inspiziert, um danach den Umfang weiterer, genauerer Einzelüberprüfungen festzulegen. Visuell wird der generelle Instandhaltungsgrad, der Zustand der Beschichtungen, Rostbefall, Lecks und strukturelle Ablösungen kontrolliert. Der Prüfer kann hierbei die Inspektion nach eigenem Ermessen und je nach Notwendigkeit intensivieren. Wird eine intensive Prüfung gemäß den Vorschriften oder nach Ermessen des Inspektors angeordnet, müssen die zu betrachtenden Oberflächen oder Objekte von Hand aus erreichbar sein. Entsprechend den Regeln

der Klassifikationsgesellschaften [3] werden hierbei die verbliebene Beschichtungsdicke sowie das Korrosionsmuster aufgezeichnet. Treten Korrosion, strukturelle Schäden, Schäden an Rumpf, Maschine oder Teilen der Schiffsausstattung auf, gilt es im Sinne der Klassifizierungsanforderungen zu überprüfen ob:

- Zusätzliche Prüfungen ausreichen
- Reparaturen notwendig sind

Im ROT-Projekt werden lediglich Ballastwassertanks (BWTs) im Piek und Doppelbodenbereich betrachtet. Klassifikationsüberprüfungen finden in diesem Falle in wiederkehrenden Abständen statt und müssen innerhalb eines zulässigen Zeitfensters (normalerweise 3 Monate vom Stichtag) ausgeführt werden. Hierbei unterscheidet man in drei Kategorien.

Jährliche Prüfung

Wie der Name sagt, sollte diese Inspektion jährlich durchgeführt werden, wobei man sich am Jahrestag der Klassenzulassung orientiert. Hauptsächlich BWTs, für die bei einer vorherigen Prüfung explizit eine jährliche Prüfung angeordnet wurde, müssen inspiziert werden. Eingehende Detailinspektionen, einschließlich Messungen der Beschichtungsdicke, müssen für Flächen mit von Korrosion stark beschädigter Oberfläche ausgeführt werden. Dies gilt auch für alle anderen Flächen, bei denen von den Prüfern ad hoc eine Notwendigkeit erkannt wird, sowie Oberflächen, die bei vorangegangenen Klasseprüfungen zur Beobachtung gekennzeichnet wurden. An Oberflächen, für die eine jährliche Prüfung angeordnet wurde oder bei denen während der Prüfung erheblicher Korrosionsbefall festgestellt wurde, müssen zwingenderweise Messungen der Beschichtungsdicke vorgenommen werden. Stark korrodierte Oberflächen, die nicht repariert und zuvor nicht erkannt wurden, sollen für die nächsten jährlichen Prüfungen zur Nachkontrolle gemeldet werden.

Zwischenprüfung

Die Fälligkeit der Zwischenprüfung liegt 2,5 Jahre vor dem Ablaufdatum des Klassezeichens. Sie kann zusammen mit der zweiten oder dritten jährlichen Hauptuntersuchung ausgeführt werden. Für Schiffe, die zwischen 5 und 10 Jahre alt sind, findet eine generelle Überprüfung, vom Inspektor bestimmter, für das Schiff repräsentativer, BWTs statt. Die Auswahl sollte die Gesamtanzahl der BWTs berücksichtigen sowie verschiedene Typen, einschließlich der Piek, umfassen. Sollte keine Schutzbeschichtung, Weich- oder Semi-Hartbeschichtung¹⁾, oder eine Beschichtung in schlechtem Zustand (20% der Beschichtungsfläche beschädigt, oder 10% mit Ablagerungen

verkrustet) vorgefunden werden, wird die Prüfung auf andere Ballastwasser-Tanks desselben Typs ausgeweitet. Für Schiffe, die älter als 10 Jahre sind, wird eine generelle Überprüfung aller Tanks durchgeführt. Tanks, die als Bilgetanks genutzt werden, sollen wie Ballasttanks geprüft werden. Bei den zu prüfenden Tanks gilt es besonderes Augenmerk auf Folgendes zu richten:

- Ladungsführende Rohrsysteme, die durch BWTs führen
- Bilge und Ballastwasser Rohrsysteme, die durch Laderäume führen
- Luft- und Schall Rohrsysteme, die durch BWTs oder Laderäume führen
- Treibstoff Rohrsysteme, die durch BWTs führen

Die Inspektion von BWTs soll auch die Prüfung der Korrosions-Schutzsysteme beinhalten, sofern solche vorhanden sind. BWTs, Bilge Tanks ausgenommen, sollten für die jährliche Inspektion gemeldet werden, wenn:

- Keine Hart-Beschichtung aufgetragen ist;
- Weiche oder Semi-hart-Beschichtung angewendet wurde
- Die Hartschutz-Beschichtung sich im schlechten Zustand befindet und nicht erneuert wurde.

Oberflächen an denen bei der Prüfung beträchtliche Korrosionsschäden festgestellt werden, sollen ausführlichen Dickenmessungen der Beschichtung unterzogen werden.

5 Jahres Prüfung, Erneuerung des Klassezeichens

Alle 5 Jahre ist die Erneuerung des Klassezeichens vorzunehmen, was im Rahmen einer ausführlichen Inspektion geschieht. Visuelle Kontrollen, Messungen und Tests (sofern erforderlich) sollen innerhalb der BWT Struktur vorgenommen werden. Dies dient der Gewährleistung eines zufrieden stellendem Zustands und der Überprüfung, ob alle Vorschriften erfüllt werden. Eventuell anliegende Reparaturen müssen ausgeführt werden, bevor die

¹⁾ Nach IMO PSPC (IMO 2006) dürfen keine Weichbeschichtungen mehr in Neubauten appliziert werden. Bei in Betrieb befindlichen Schiffen sollten Tanks mit weichen Beschichtungen sukzessive durch harte Beschichtungen ersetzt werden, sobald Beschädigungen am ursprünglichen Beschichtungssystem auftauchen.

Prüfung als abgeschlossen gilt. Bei der 5 Jahres Prüfung müssen sämtliche BWTs überprüft werden. Im Allgemeinen gelten dabei die gleichen Anforderungen wie bei den Zwischenprüfungen.

Messungen, die an beschädigten Flächen vorgenommen werden, sollen nicht nur auf Einzelwerten basieren. Sie sollen mit visuellen Prüfungen einhergehen und sollten zudem mehrere Messpunkte beinhalten. Abhängig von der Struktur haben sich 3 oder 5 Punkt Messungen als praktikabel erwiesen.

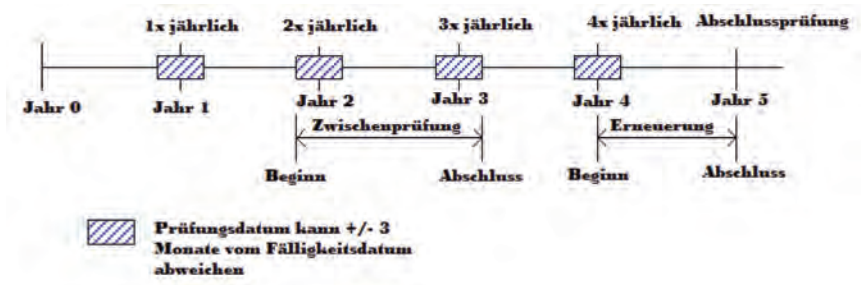


Abbildung 2: Zeitplan für einen klassischen Prüfungsablauf

Robotisches Konzept

Obwohl Inspektion und Wartung von BWTs derzeit noch manuell ausgeführt werden, gibt es generische robotische Konzepte, die in Hinblick auf das spezifische Einsatzszenario von BWTs evaluiert wurden, um ein Startpunkt für das Roboterdesign zu finden. Haupt-Design-Parameter (Lokomotion, Sensorik, Nutzlast, Kommunikation, Autonomie und Energieversorgung) wurden mit den Nutzeranforderungen sowie dem typischen BWT Design und deren Zustand in der Bauphase sowie im Betrieb abgeglichen (siehe hierzu auch [2]).

Lokomotionskonzepte

Abgesehen von radgetriebenen Robotern in einer perfekt sauberen und un-verstellten Büroumgebung, ist es keine leichte Aufgabe für einen Roboter sich zielgerichtet kollisionsfrei von Punkt A zu Punkt B zu bewegen. Dies gilt umso mehr, soweit der Roboter sich im dreidimensionalen Raum bewegen muss (6 Freiheitsgrade). Die Komplexität der Bewegung (und damit auch der Regelung) hängt hochgradig vom der Konfiguration eines Roboters ab, etwa bei einem sechsbeinigen Laufroboter mit jeweils 4 Gelenken pro Bein der diese 24 Gelenke für eine vordergründig einfache Rechtskurve koordinieren muss [1]. Nahezu alle klassischen Lokomotionsverfahren wie Gehen, Schrei-

ten, Gleiten, Fahren, Hybrides Bewegen, gleisgebundene Lokomotion, Klettern und Hangeln sind in der Vergangenheit in Robotern umgesetzt worden, aber ihre Nutzbarkeit ist stark abhängig von der Umgebung und der zu erledigenden Aufgabe [12]. In der sehr anspruchsvollen beengten Umgebung von Doppelboden-Ballastwassertanks, oft zusätzlich verbaut durch Versteifungen und Befestigungen, benötigt die robotische Bewegung ein adäquates Adhäsionskonzept.



Abbildung 3: Ballastwassertank Anwendungsszenario

Adhäsionsverfahren für kletternde Roboter können in Hinblick auf die Natur der Kräfte klassifiziert werden, die den Roboter an einer Wand oder Struktur halten [9]. Ein oft angewandtes Verfahren ist die Nutzung von Saugkräften. Üblicherweise werden mehrere Vakuumblocken benötigt, um Druckverlust durch Oberflächenunebenheiten auszugleichen. Pneumatische Verfahren weisen in der Regel einen relativ hohen Energieverbrauch auf und benötigen vergleichsweise glatte und saubere Oberflächen, und scheiden daher bei in Nutzung befindlichen Ballastwassertanks aus. Diese Beurteilung kann sich in der Zukunft ändern, soweit neue Ballastwasser-Regularien (z.B. IMO Convention - „International Convention for the Control and Management of Ships Ballast Water & Sediments“) eine Filterung des Ballastwassers fordern und damit Sedimentrückstände drastisch reduziert werden.

Magnetische Adhäsion ist z.B. durch die Nutzung von Neodym-Magneten in der Lage, sehr hohe Kräfte an magnetischem Schiffbaustahl aufzubauen,

allerdings besteht dort die Notwendigkeit, die Magnete zum für die Bewegung richtigen Moment wieder von der Oberfläche zu lösen. So verwendet beispielsweise der Roboter „Magnetbike“ [13] extra aktivierte kleine Räder zu diesem Zweck, während der DFKI Magnetkrabbler sehr viele sehr kleine Permanentmagneten in einer flexiblen passiven Abschäl-Struktur vorsieht [15]. Magnetische Kräfte weisen jedoch starken Verlust mit zunehmendem Abstand zu der ferromagnetischen Oberfläche auf, so führen Beschichtung, Rost oder Dellen in der Oberfläche sehr schnell dazu, dass ein Roboter die Haftung verliert. Ein weiteres Problem in einer langfristigen Anwendung ist die Anhäufung von Eisenstaub unter den Magneten, was wiederum zu einem höheren Abstand zur ferromagnetischen Oberfläche und damit zu einem erheblichen Verlust der Haftung führen kann. Dennoch kann magnetische Adhäsion, je nach konkreter Roboter-Aufgabe und Oberfläche, eine valide Option für die Schiffsinspektion darstellen. Ein Magnetcrawler könnte eine Lösung für die ferngesteuerte Punktinspektion sein, bei der ein Inspektor den Roboter quasi als Werkzeug vor Ort einsetzt, um lokale Messungen durchzuführen an Stellen, die er mangels anderer Hilfseinrichtungen nicht erreicht. Nach unserer Auffassung ist diese Lösung am besten geeignet für großflächige unverbaute BWT-Flächen wie sie in Bulkcarriern, Tankern und Containerschiffen auftreten, nicht jedoch für die engen Doppelboden-Ballastwassertanks wie sie in Kreuzfahrtschiffen vorkommen.

Mechanische Adhäsion ist im Falle von strukturierten Oberflächen und spezialisierten Greifern eine energetisch günstige Möglichkeit mit dieser Oberfläche verbunden zu bleiben. Der große Nachteil einer solchen Lösung ist der große Aufwand, an einen solchen Punkt zu gelangen, sowohl aus Bewegungs- als auch aus Navigations-Sicht. Diese Lösungen sind darüber hinaus langsam und verbrauchen in der Bewegung viel Energie aufgrund der hohen auftretenden Hebelkräfte. Für die vorliegende Situation, wo zum Einen ein Roboter benötigt wird, der klein genug ist um durch Standard-Mannlöcher zu passen, zum Anderen aber die Distanz zwischen möglichen Greifpunkten (z.B. die Holland-Profil-Versteifungen) sehr groß ist, kann diese Lösung daher nicht, zumindest nicht effizient, eingesetzt werden.

Andere in der Literatur vorgeschlagene Lösungen wie elektrostatische oder chemische Adhäsion neigen dazu aufgrund des Staubes in der Umgebung nach einigen Sequenzen rapide abzubauen (Klebertechniken) oder sind noch zu weit entfernt von realen technischen Anwendungen (z.B. Van-der-Waals-Kräfte, Roboter „Stickybot“ [8]).

Da keine der üblichen Lokomotionstechniken für die sehr anspruchsvolle Umgebung in Doppelboden-Ballastwassertanks geeignet ist, wurden schienenbasierte Lösungen in Betracht gezogen [2].

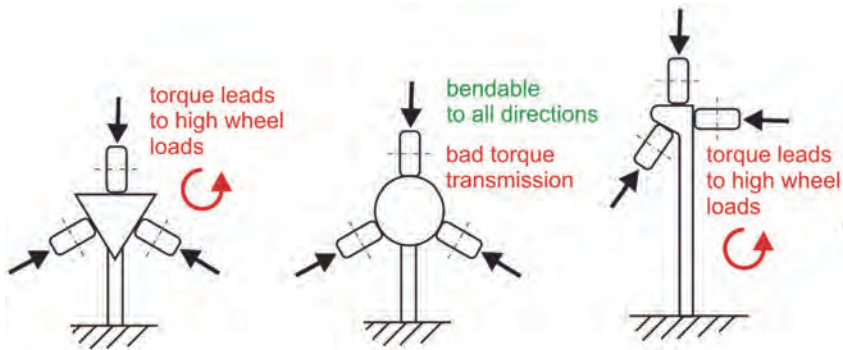


Abbildung 4: Mögliche Schienenprofile, inkl. Üblicherweise verbauter Hol-landprofile

Ein schienenbasierter Inspektionsroboter ermöglicht hohe Nutzlasten, ist verglichen mit den anderen Lokomotionsmöglichkeiten sehr schnell, reduziert zudem die Komplexität der Navigation auf einen Freiheitsgrad und ermöglicht damit einen hohen Grad der Automation, unter anderem erlaubt die Reduzierung der Freiheitsgrade eine exakte Lokalisierung des Roboters im Tank. Daneben ist ein Herunterfallen des Roboters und damit eine Beschädigung der Tankoberflächen bei dieser Lösung ausgeschlossen, während andere Lösungen zusätzliche Maßnahmen wie Sicherheitsseile oder ähnliches erfordern würden. Der Hauptnachteil einer Schienenlösung ist der zusätzliche Installationsaufwand. Allerdings mussten auch für die bisherige manuelle

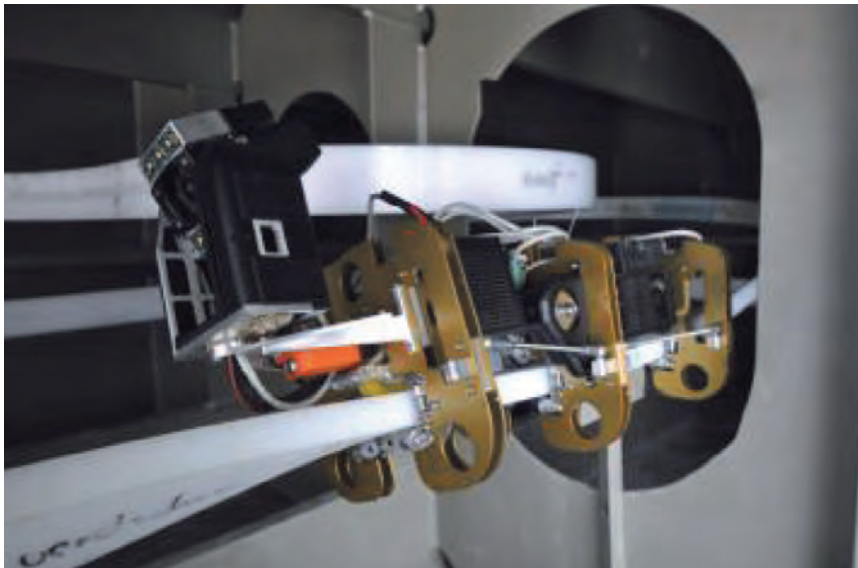


Abbildung 5: BWT Inspektion im Demonstrator

Inspektion zusätzliche Einrichtungen wie Leitern, Plankenhalterungen, Geländer, etc. installiert werden, nichtdestotrotz sind die Kostenaspekte einer Schienenlösung in der Lebenszyklus-Kostenanalyse explizit berücksichtigt worden (s.u.). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass dieses Konzept gegenüber anderen robotischen Lösungen das höchste Potential besitzt auch in gefluteten oder teilgefluteten Tanks eingesetzt zu werden.

Sensorik

Zur Bestimmung der Orientierung und Position des Roboters wurde ein kompakter Inertialsensor (Inertial Measurement Unit - IMU) integriert. Der interne Signalprozessor liefert driftfreie Orientierung sowie kalibrierte Beschleunigungsdaten, Drehraten und die Magnetfeldstärke (jeweils in drei Achsen). Die Messungen der Magnetfeldstärke zeigten, wie erwartet, starke Anomalien bei Einsatz des Systems im Ballastwasser-Testtank aufgrund des Schiffbaustahls. Diese Anomalien sind jedoch statisch und können kompensiert werden. Darüber hinaus wurde im Vorhaben ein Verfahren entwickelt, diese Magnetfeldabweichungen in einer 3D-Magnetfeldkarte aufzuzeichnen und neben Bildverarbeitungsalgorithmen unter Zuhilfenahme einer Kamera zur Navigation zu verwenden. Neben diesen roboterspezifischen Sensoren gibt es eine Reihe von Sensoren, die zur Ballastwassertankinspektion genutzt werden können, mit ganz gravierenden Unterschieden bezüglich Abmessungen, Stromverbrauch und Einsatzaufwand. Die meisten dieser Sensoren benötigen einen Manipulator, um sie an einen gegebenen Punkt an der BWT-Oberfläche zu platzieren. Im Projekt wurde beispielhaft ein Dickenmessgerät als applikationsspezifischer Sensor verwendet. Zur visuellen Inspektion wurde eine sehr kompakte, hochauflösende Schwenk-Neige-Kamera mit LED-Blitz entwickelt. Das Kamerasystem wurde genutzt, um automatisch 360° Panoramabilder der Tankinnenseiten zu generieren, die später mit geeigneten Visualisierungswerkezeugen den Inspektoren zur Verfügung gestellt werden können.

Kommunikation

Ein nicht vollständiger Roboter zur BWT Inspektion benötigt zumindest punktuell Möglichkeiten zur Kommunikation für Teleoperation oder Sensordatenübertragung. Auch bei vollständig autonomen Systemen gibt es regelmäßig aus Sicherheitsgründen den Bedarf, grundlegende Statusinformationen übertragen zu können. Einige der im Projekt untersuchten Sensoren benötigen hohe Bandbreiten für die Übertragung ihrer Daten in Echtzeit (Laserscanner, Kameras). Der hauptsächliche Hinderungsgrund für den Einsatz Ethernetbasierter Kommunikation mit hoher Bandbreite ist das benötigte Kabel. Die Nutzung eines Versorgungskabels für Kommunikation und Energie-

versorgung scheidet in den betrachteten Einsatzumgebungen aus, es würde aufgrund der vielen Ecken und Kanten und häufiges Abbiegen bei einer vollen Abdeckung des Tanks zu viel Reibung erzeugen, beziehungsweise ganz blockieren. Drahtlose Verbindungstechniken wie Bluetooth oder WLAN erlauben auch in perfekten Umgebungen nur Datenraten (z.B. bis zu 450 Mbit/s im Falle von IEEE 802.11 draft N), die ein herunterskalieren z.B. der Videodaten erzwingen, was wiederum Gegenläufig ist zum Anspruch, den Inspektoren eine möglichst hochauflösende Abbildung des Tankinnenlebens zu präsentieren. Hinzu kommt, dass die sehr verwinkelte Stahlumgebung in den BWTs zu hohen Fehlerraten in der drahtlosen Kommunikation führt, was den Datendurchsatz weiter verringert. In Anbetracht dieser Limitierungen muss das Robotersystem in der Lage sein, alle anfallenden Daten in Echtzeit auf dem System selbst zu speichern, wozu eine SSD-Festplatte vorgesehen wurde, die robust gegenüber etwaigen Erschütterungen bei gleichzeitiger hoher Speicherkapazität ist.

Energieversorgung

Da aus o.g. Gründen eine Versorgungsleitung zum Inspektionssystem nicht in Frage kommt, wurde ein 5000 mAh Lithium-Polymer Akkumulator mit 25.9V Versorgungsspannung vorgesehen, die für eine Einsatzdauer des Systems von ca. 3-4 Stunden je nach Tankdesign ausgelegt ist (zur Energiedichte siehe auch [14]).

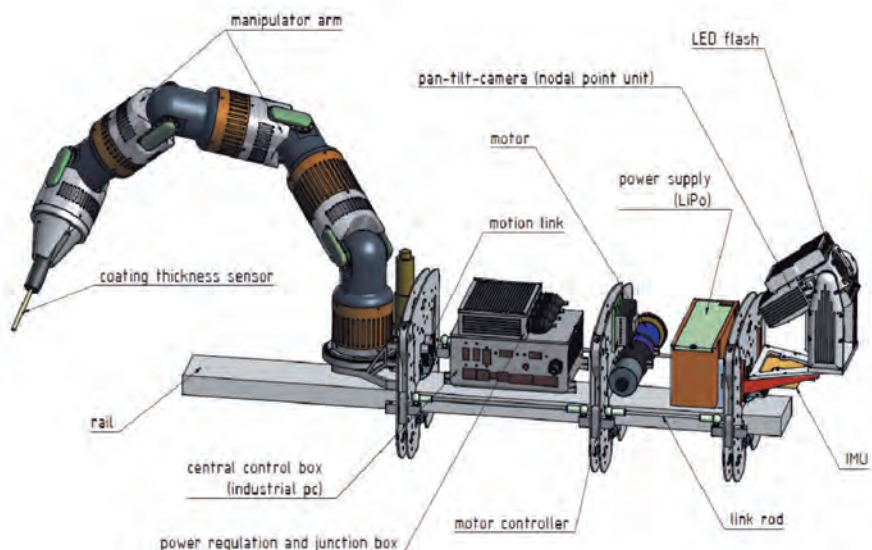


Abbildung 6: CAD des modularen Konzeptes

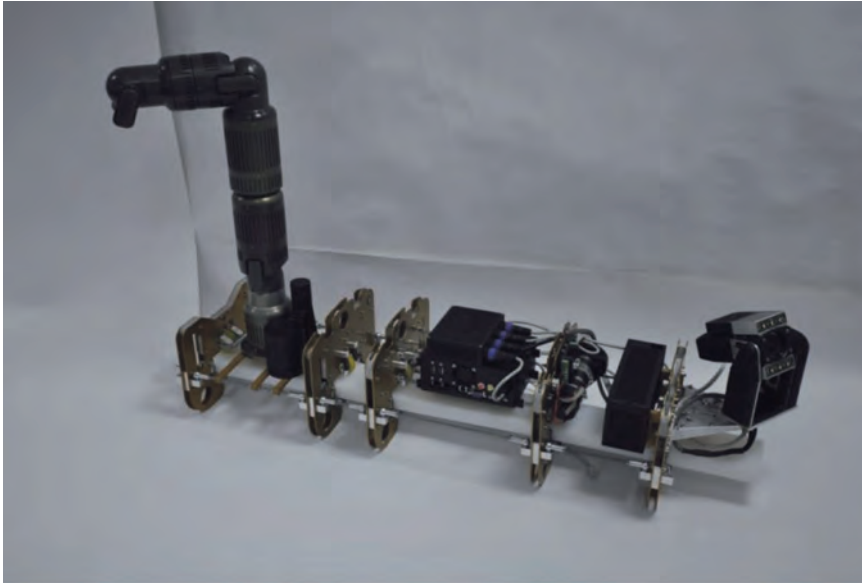


Abbildung 7: Finale Version des Demonstrator Roboters

Implementierung und Tests

Da das Betreiben des Roboters auf metallischen Schienen Abrieb erzeugen kann, der in Kontakt mit der Tankwand Korrosion erzeugen kann wurde für die Schiene ein thermisch verformbares Plastikmaterial verwendet, was neben der Korrosionsvermeidung den Vorteil bietet, vor Ort und auch nachträglich kostengünstig verlegbar zu sein. Um den Schwerpunkt des Systems nahe der Schiene zu halten, wurde ein modulares Konzept entworfen, bei der jedes Funktionsmodul (Antrieb, Sensorik, Manipulator) sein eigenes adaptives Fahrwerk besitzt und dessen rotatorisches Zentrum in der Mitte der

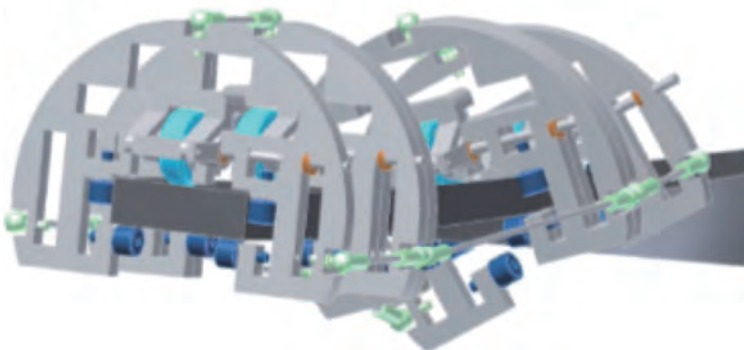


Abbildung 8: Aufhängungskonzept, Verwindungen sind möglich

Schiene liegt. Das modulare Konzept bietet den Vorteil, je nach Applikations-szenario die Module in Auswahl, Anordnung und Anzahl frei konfigurieren zu können, etwa ein weiteres Antriebsmodul anzuhängen, soweit die Nutzlast dies erfordert.

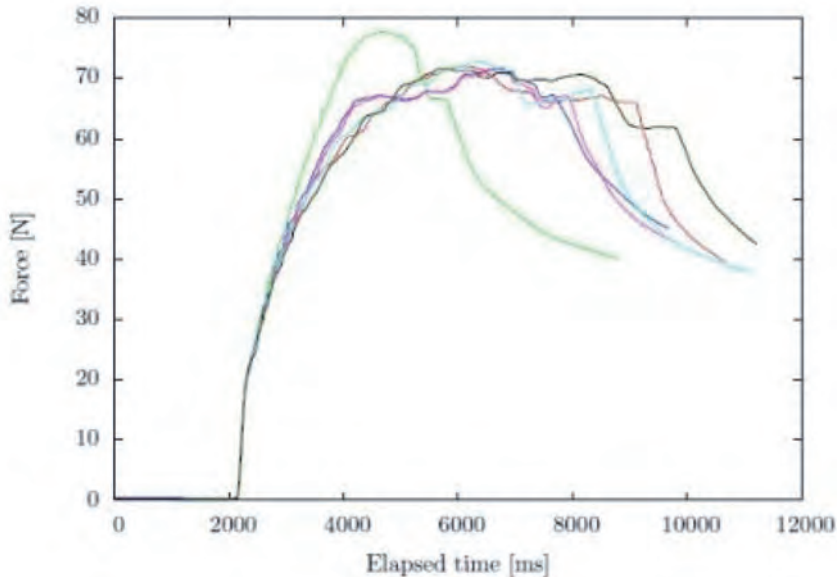


Abbildung 9: Reifen Haftungstest – trockene Bedingungen – Gummi Material

Für das Antriebsmodul wurden verschiedene Vortriebsräder aus unterschiedlichen Materialien und verschiedener Struktur gefertigt. Das wasserstrahlgeschnittene Gummi (Härte 50° Shore A) zeigte ausreichende Reibung für vertikale Fahrten des Systems auf der Schiene, allerdings wurde dabei stark Abrieb erzeugt und das Profil war nach etwa 20 Testläufen abgefahren. Die Räder basierend auf PU (Härte 60° Shore A) wiesen diese Problematik nicht auf, hatten allerdings nicht die Notwendige Reibung auf nassen, bzw. Öligen Untergründen. Um die beste Material-Profil-Kombination für das ausgesuchte Schienenmaterial und die erwarteten Einsatzbedingungen zu finden, wurde eine Serie von Testmessungen mit unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt, bei der eine Feder durch das Verfahren des Systems langsam gespannt wurde, bis es zu Schlupf-Effekten kam. Die hierbei auftretenden Kräfte wurden jeweils geplottet. Wie erwartet zeigte das Gummimaterial die beste Performance im Vergleich zu den anderen Materialien mit Beginn des Schlupfens bei durchschnittlich 70 N auf trockener Schienenoberfläche, 20 N bei ölgiger Oberfläche. Die Abriebproblematik des Materials konnte durch eine andere Wahl des Profils überwunden werden.

Um das Erstellen von nahtlosen 360° Panoramabildern zu ermöglichen, wurde eine Schwenk-Neige-Einheit bestehend aus einer hochauflösenden Kamera mit 90° Öffnungswinkel sowie drehmomentstarken Digitalservos entwickelt, die die Kamera um das optische Eintrittszentrum der Linse schwenken und damit das Auftreten von sog. Parallaxenfehlern vermeiden. Zur Beleuchtung der komplett dunklen Ballastwassertanks wurde ein LED Blitzsystem entwickelt, dass die Blitzlänge sowie -intensität mittels eines Atmel Atmega Mikrocontrollers regelt und von der Kamera je nach Belichtungslänge ausgelöst werden kann. LEDs wurden aus Sicherheitsgründen eingesetzt, da sie nicht die bei Xenonbasierten Blitzern benötigten hohen Spannungen (~ 400V) benötigen (Faulgas!), weniger Strom verbrauchen und für Bildfolgen schneller ausgelöst werden können.

Die Nutzeranforderungen in Kombination mit den typischen Doppelboden-Ballastwassertank-Abmessungen erforderten einen Leichtbau-Manipulator von maximal 4 kg, der von dem robotischen System getragen werden kann, der Robust gegen Umwelteinflüsse (Wasserdichtigkeit, Staubdichtigkeit) ist, eine kinematische Konfiguration aufweist, um durch die Standard-Mannlochgrößen zu passen und ausreichend Reichweite hat, um hinter Vertiefungen zu greifen und an den relevanten Orten im Tank beispielsweise Schichtdickenmessungen vorzunehmen. Da ein solcher Manipulator nicht am Markt verfügbar ist, wurde er im Rahmen des Vorhabens entwickelt. FPGA-basierte Motorkarten wurden den projektspezifischen Anforderungen angepasst (verschiedene Bürstenmotorgrößen, CAN-Kommunikation, Magnetencoder) und die Manipulatorgelenke für eine maximale Nutzlast am ausgestreckten Arm von 500g ausgelegt. Die Manipulatorgelenke wurden wie das Roboter-

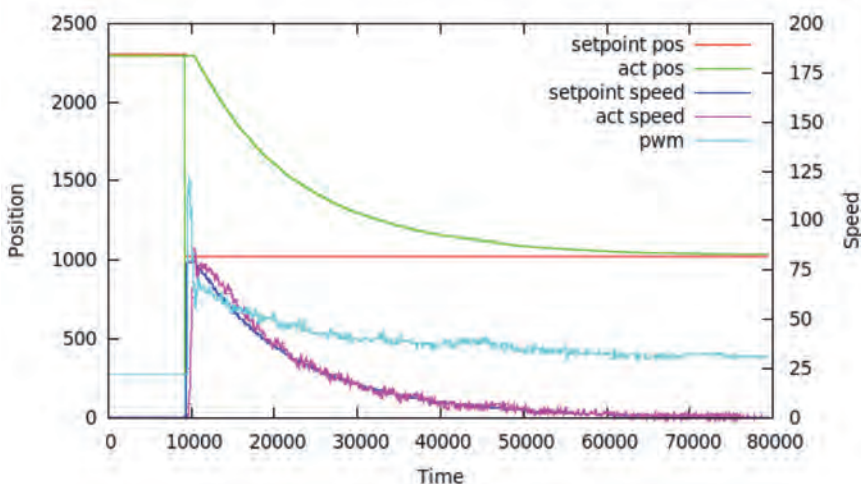


Abbildung 10: Performance Test der Kontrolleinheit

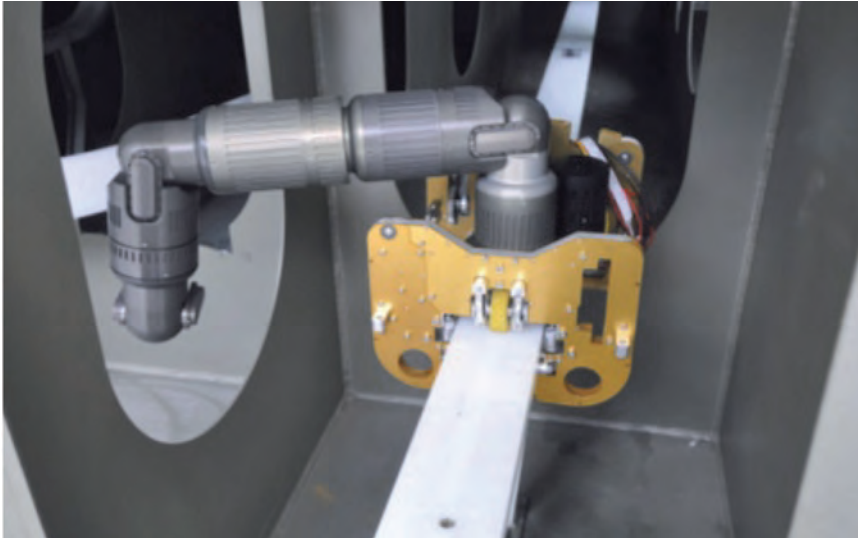


Abbildung 11: Manipulator im Teststadium

system modular ausgelegt, so dass verschiedene Motoren zum Einsatz kommen können, um auch höhere Nutzlasten (dann allerdings auf Kosten von Energieverbrauch und Größe) zu ermöglichen. Für den Manipulator wurden Vorwärts- und Rückwärtskinematiken basierend auf geometrischen wie analytischen Methoden definiert. Um Überlastschäden auszuschließen und eine exakte Positionierung im Millimeterbereich zu ermöglichen, wurde eine volle Positions-Geschwindigkeits-Stromfluss-Reglerkaskade implementiert und getestet.

Kontrolle	Voll autonom, manuelle Fernsteuerung möglich
Lokomotion	3D schienenbasiert
Breite	244 mm
Höhe	293 mm
Länge	Länge ~ 900 mm (abhängig von den verwendeten Modulen)
Gewicht	~ 6 kg
Energieverbrauch	~ 30W (Abhängig vom Tankdesign)
Energieversorgung	25.6V 5000 mAh LiPo Batterie
Antriebsmotor	Gebürstet, DC, 110 mNm, 36:1 Planetengetriebe
Inspektionskamera	2448x2050 px @ 15Hz, Prosilica GC2450C
Objektiv	Pentax C418DX, 90° Öffnungswinkel, 1:1.8
IMU	XSens MTi

Tabelle 1 stellt zusammengefasst die Eckdaten des Demonstrators dar.

Software

Als Software-Framework kam das RoboticOperationSystem (ROS) zum Einsatz [11], das aufgrund seiner Modularität und den Möglichkeiten, die berechnenden Knoten auf verschiedene Systeme zu verteilen gut zu der Modularität unseres Systems passte. Für die Kamera konnten fertige Treiber verwendet werden, zusätzliche ROS-Treiber wurden für die IMU, die Motorkarten, die GPIOs des Industrie-PCs sowie die RS485-basierten Servos in C++ implementiert. Zur exakten Schätzung der Position wurde ein probabilistischer Monte-Carlo-Schätzer (Partikelfilter) implementiert, der die IMU- sowie die Odometriedaten fusioniert und die Magnetanomalien der Ballastwassertankumgebung nutzt. Für die Demonstration der autonomen Inspektion wurde eine endlicher Automat programmiert, der den Roboter an einen definierten Punkt fahren lässt, dort ein 360° Panorama der Umgebung generiert und speichert, der Manipulator eine Schichtdickenmessung vornimmt, wobei der Roboter auf mögliche Hindernisse selbständig reagiert und ggf. an seinen Ausgangspunkt zurückkehrt. Das ganze System konnte auf der Abschluss Präsentation erfolgreich demonstriert werden.

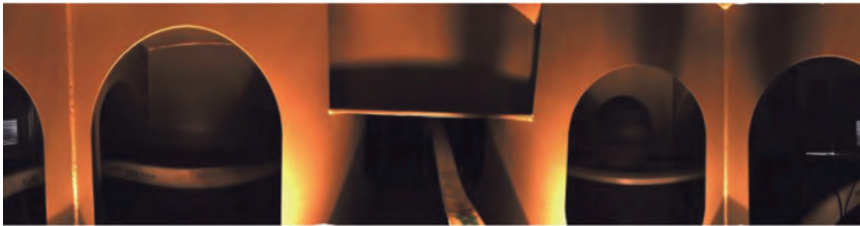


Abbildung 12: Zusammengefügtes Panoramabild des Testtanks

Lebenszyklusbetrachtung

Die Roboterentwicklung wurde von einer Betrachtung der Lebenszykluskosten begleitet, um eine wirtschaftliche Machbarkeit zu gewährleisten. Mit der BAL.L3C (BALance Life Cycle Costs Calculations) Software wurden hierfür mehrere Anwendungsszenarien simuliert. Hierbei werden alle über die Betriebslebenszeit auftretenden Kosten untersucht. Diese Methode eignet sich insbesondere wenn die finanziellen Vorteile sich erst einige Zeit nach dem Erwerb eines Produktes abzeichnen und somit nicht sofort ersichtlich sind. Des Weiteren können so der Break-Even-Point und die Robustheit des Modells unter verschiedenen Annahmen überprüft werden. Die zugrunde liegende Methode ist „Net Present Value“ (NPV).

Zwei Segmente wurden identifiziert, die sich für den Robotereinsatz anbieten. Zum einen die Anwendung im Neubau, da hierbei die Tanks in mehreren

Schritten eingehend inspiziert werden müssen, zum anderen erscheint die Unterstützung der vorgeschriebenen Klasseinspektionen sinnvoll. Zunächst wurde die Anwendung eines ROT Roboters für ein Kreuzfahrtschiff untersucht. Als Modell diente hierbei ein 70.000 GT Schiff mit einem Ballastwassertankvolumen von 2.250 m³. Hierbei soll der Roboter die Anwesenheit von Inspektoren sowohl im Neubau als auch im Betrieb minimieren.

Während des Neubaus werden die Tanks nach jedem Produktionsschritt (Sandstrahlen, Beschichten, etc.) von bis zu 4 Experten betreten um nach möglichen Fehlern zu suchen. Die Gesamtkosten für manuelle Kontrollen wurden aufgrund der Berechnungen mit 75.000€ beziffert. Die notwendigen Daten wurden hierbei durch Befragungen von Werftexperten ermittelt.

Im Falle der robotergestützten Inspektion werden Daten und Bilder automatisch gesammelt und an ein Rechenzentrum gesendet, wo sie von Experten ausgewertet werden können. Hierdurch können Personalkosten gespart werden, da das zeitintensive betreten der Tanks wegfällt. Allerdings entstehen für das Installieren des Systems und die Anschaffung des Roboters zusätzliche Kosten, die nahezu eine Verdopplung der Kosten auf 146.000€ bewirken.

Die Höhe der Kosten, die durch eine Tankinspektion im Schiffsbetrieb entstehen, wird hauptsächlich durch den Verdienstausschlag bestimmt. Dieser kann bei einem Kreuzfahrtschiff bei 125.000€ pro Tag liegen. Somit bietet das ROT System hier eine Möglichkeit die zeitaufwendigen, personenbasierten Tankinspektionen zu minimieren. Die dafür nötigen Daten (Bilder, Dickenmessungen, etc.) sollen vielmehr während des Schiffsbetriebs und vor der eigentlichen Inspektion an Bord gesammelt und an die Experten übertragen werden. Während der eigentlichen Schiffsinspektion entfällt somit nur noch ein geringer Teil der eingeplanten Zeit auf die Tanks (Nachinspektionen der übermittelten Daten oder ad hoc Reparaturen werden nie vollständig auszuschließen sein) und das Schiff kann früher als herkömmlich seinen Betrieb wieder aufnehmen.

Unter Voraussetzung dieser Annahme wurden verschiedene Lebenszyklen mit unterschiedlichem Erhaltungsgrad der Tanks untersucht. Bei Tanks in schlechtem Erhaltungszustand ist hierbei ein größeres Einsparpotential zu verzeichnen, da die Inspektionen in der Regel länger dauern und oftmals nicht eingeplante Reparaturen nach sich ziehen. Das ROT System kann sich unter der Annahme inspektions- und wartungsintensiver Tanks demnach frühestens nach der 5ten Inspektion (12,5 Jahre) amortisieren.

Eine kostengünstigere Betriebsform des Roboters kann durch die Ausrüstung einer Serie von Schiffen erreicht werden. Hierbei kommen in der Pro-

duktion Skaleneffekte zu tragen, die eine frühere Amortisierung möglich machen. Des Weiteren geht man von einem Betreiberkonzept aus, dass nur einen Roboter wechselseitig auf verschiedenen Schiffen einsetzt. Geht man weiterhin davon aus, dass die Klasseninspektion durch die landseitige Inspektion der Ballastwassertanks um bis zu einen Tag verkürzt werden kann ergibt sich folgendes Bild:

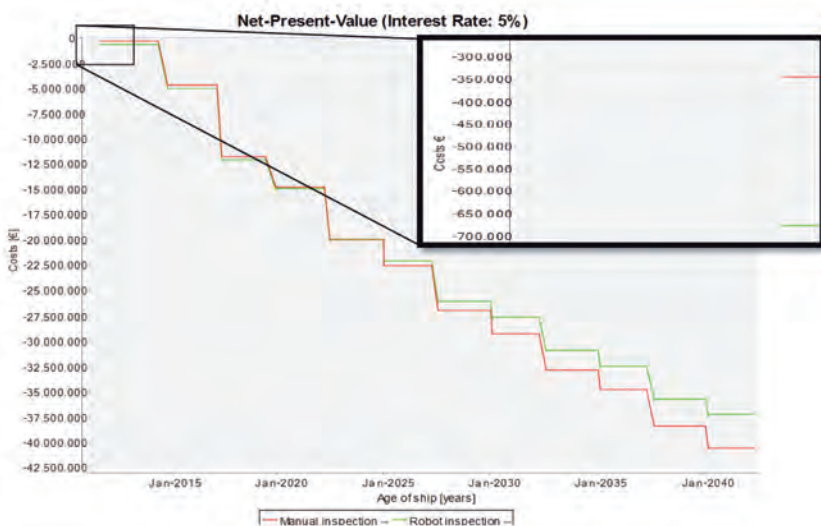


Abbildung 13: Aufsummierung aller mit der Tankinspektion verbundener Kosten über einen Zeitraum von 30 Jahren. Betrachtet wird hierbei eine Flotte von 5 Schiffen in der Klasse um 70.000 GT. In der Vergrößerung die Investitionskosten inklusive der Neubau Inspektionen

Somit belaufen sich die Investitionen und robotergestützten Inspektionen im Neubau für 5 Schiffe einer Serie auf 647.000 €. Damit ist die erforderliche Anfangsinvestition immer noch 300.000€ teurer als ein rein manuelle Inspektion während der Neubauphase. Da durch den Serieneffekt die Investition trotzdem gesenkt wurde kann eine Amortisation des Systems nun schon nach der 4ten Inspektion (10 Jahre) erreicht werden. Das Einsparungspotential über eine Lebenszeit von 30 Jahren beläuft sich unter Einbeziehung eines Abzinsungsfaktors von 5% auf 3.400.000€ (Abb. 13).

Die Lebenszyklusberechnungen beziehen sich momentan nur auf die Investitionskosten, den mit Inspektionen verbunden Aufwand und etwaigen Verdienstausschlag durch Dockliegezeiten. Hierbei werden Effekte die monetär schwer bewertbar sind noch nicht in die Rechnung mit einbezogen. Um kostspielige und großflächige Reparaturen zu vermeiden, kann das System beispielsweise auch präventiv zur Schadenserkennung eingesetzt werden. Auf-

grund der räumlichen Bedingungen innerhalb von Ballastwassertanks ist das Betreten der Tanks immer mit Gefahren für das Personal verbunden. Auch hier schafft ROT Abhilfe und sorgt für eine Erhöhung der Sicherheit an Bord.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des ROT Projektes war die Entwicklung eines Robotersystems, das in der Lage ist, menschliche Prüfaufgaben in BWTS durchzuführen. Nachdem die Meyer Werft die Voraussetzungen für notwendige Inspektionen in der Neubauphase präzise dokumentiert hatte und DNV die Prüfanforderungen im Schiffsbetrieb definiert hatte, wurde ein neues Roboterkonzept erstellt.

Außerdem wurde ein Mustertank gebaut, der an der Geometrie insbesondere von komplexen BWTS in Kreuzfahrtschiffen ausgerichtet ist. In diesem Testtank konnte der Roboter im Rahmen unterschiedlicher Szenarien unter realen Bedingungen getestet werden. Als potentielle Nutzer haben die Meyer Werft und DNV die Realitätsnähe der Tests bewertet.

Das DFKI entwickelte ein schienenbasiertes Lokomotionskonzept, das modular aufgebaut ist. Die Modularität erlaubt auch zukünftig die Einbindung weiterer Funktionalitäten. Derzeit ist der Roboter in der Lage mit Hilfe einer Kamera Sichtprüfungen durchzuführen. Ein Greifarm erlaubt kleinere Manipulationen bzw. Beschichtungsdicke-Messungen. Für das Robotersystem wurde ein Patent angemeldet.

Die von BALance durchgeführte Lebenszykluskostenanalyse hat bewiesen, dass eine Amortisierung in einem überschaubaren Zeitraum gewährleistet ist. Es wird jedoch damit gerechnet, dass mit gezielten Systemverbesserungen der Amortisierungszeitraum noch deutlich verringert werden kann.

Zusammenfassend kommt das Projektteam zu dem Schluss, dass der Einsatz des ROT-Systems innerhalb von BWTS erhebliche Vorteile bietet. Im Rahmen weiterer Projekte sollen sowohl Systemoptimierungen durchgeführt als auch weitere Einsatzfelder definiert werden.

Literaturverzeichnis

1. BARTSCH, S. et al., 'SpaceClimber Development of a Six-Legged Climbing Robot for Space Exploration', 41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics, 2010
2. CHRISTENSEN, L. et al., 'Cost Effective Autonomous Robots for Ballast Water Tank Inspection', Proceedings of the 10th Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, 2011
3. DNV, 'Rules for Classification of Ships – SHIPS in Operation: Part 7 Ch.1, Survey Requirements', January Edition, Høvik, 2011.
4. IACS, 'Unified Requirements Z – Requirements concerning Survey and Certification', April Edition, London, 2011.
5. IMO, 'Resolution MSC.215 (82) Performance Standard for Protective Coatings (PSPC) for dedicated Seawater Ballast Tanks in all types of ships and doubleside skin spaces of bulk carriers', London: MSC 82/24/Add.1, 2006.
6. IMO, 'Resolution A.744 (18) as amended 1996, 1997, 2000, 2002, 2003, 2005, 2008 – Guidelines on the Enhanced Programme of Inspections during Surveys of Bulk Carriers and Oil Tankers', London, 1993.
7. IMO, 'SOLAS Consolidated Edition, 2004 – Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates', Sales Nr: ID110E, ISBN 92-801-4183-X, London, 2004.
8. KIM et al., 'Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot', IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007
9. LONGO, D. and MUSCATO, G., 'Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental considerations', International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2008
10. N.U. (03.03.2010), Norwegian reports, Cruise Industry News, No.4, Vol.26

11. QUIGLEY, M. et al., 'ROS: an opensource Robot Operating System', IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009
12. SILVA, M. F. and MACHADO, J. A. T., 'Climbing robots: a survey of technologies and applications', International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2008
13. TACHE, F. et al., 'Compact magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex shaped pipe structures', IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007
14. TARASCON, J.-M. und ARMAND, M., 'Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries', Nature 414/6861, 2001
15. VÖGELE, T. et al., 'A Hybrid Legged Wheel Climbing Robot for Marine Inspection', International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2010

PropSeas – Propulsion in Seaways

M. Abdel-Maksoud¹, J. Dohmen², M. Greve¹, E. van Heumen², K. Hitzbleck², K. Koushan³, W. Menzel⁴, B. el Moctar², T. Rung¹, K. Woeckner-Kluwe¹

(¹ TUHH, ²UDE, ³ MARINTEK Coordinator, ⁴ GL)

Kurzfassung

Im Zuge dieses Projektes wurden Randelementeverfahren und Feldmethoden zur Berechnung der auf Propeller wirkenden Lasten in moderater und schwerer See entwickelt. Weiterhin wurden Modellversuche und Großausführungsmessungen durchgeführt. Die Modellversuche dienten zusätzlich zur Validierung der zu entwickelnden numerischen Methoden. Es wurde außerdem ein Konzept zur Messung der auf Propeller wirkenden Lasten entwickelt und umgesetzt. Die Großausführungsmessungen haben sich als technisch aufwendig erwiesen. Die Projektteilnehmer gehen dennoch von einer Realisierung dieser Messungen aus. In diesem Kurzbericht werden die numerischen Methoden kurz beschrieben und Teile der Validierungsarbeiten vorgestellt. Ein umfassender Bericht über die Ergebnisse des Projektes wird im Laufe des nächsten Jahres zur Verfügung stehen.

Introduction

Current practice for design of propulsion systems is based mainly on analysis of calm water performance. The effects of seaways and motions of the ships and floating offshore structures are supposed to be taken into account by using high safety factors. The same applies for classification of the propulsion systems. However; experience has shown that the problems are not necessarily solved by simply oversized dimensioning of the propulsors and machinery. Cargo vessels, offshore vessels and FPSOs have experienced downtime and operational problems due to failure of propulsion units. These failures occur due to fatigue and extreme loads, for which excessive motions of ships in harsh seaway, emersion of propeller and other dynamic effects may be responsible. However, the effects of excessive ship motions on extreme loads of propulsion units have not been studied in details so far. In addition to downtime and safety problems, oversized and non-optimised propulsion systems lead to higher fuel consumption, which has both negative financial and environmental consequences. These explain the necessity to develop scientific methods to find dynamic loads and responses related to operation of propulsion units in heavy seas. PropSeas – Propulsion in Seaways meets these challenges by applying the state-of-the-art experimen-

tal and numerical methods, which are also subject to further development during the course of the project. Improved competitive know-how is obtained by performing extensive numerical and experimental investigations for model and full-scale. Based on this know-how and by using the methods developed in the project, new propulsors can be designed that are more suited for the harsh conditions in seaways. Implementing the know-how in the design of new control systems for ships and floating offshore structures can result in identification and avoidance of worst conditions for propulsion systems. The primary objective of the project is to obtain knowledge about the forces acting on propellers and thrusters in operation in heavy seas, in order to ensure reliability on new designs and to enable operational guidance on existing systems. Secondary objectives are to:

- Develop better prediction methods for forces and moments on propellers and thrusters operating in heavy seas
- Recommend model and full scale test procedures for propellers and thrusters operating in heavy seas
- Recommend improved design practices for propellers and thrusters to optimise the designs with respect to operation in heavy seas
- Recommend schemes for implementing operational guidance and/or limits for propulsion systems operating in heavy seas

The PropSeas consortium includes a research institute (Norwegian Maritime Technology Centre MARINTEK), three universities (Norwegian University of Science and Technology NTNU, Technical University of Hamburg-Harburg TUHH and University of Duisburg-Essen UDE), a marine propulsor manufacturer (Rolls-Royce Marine), a classification society (Germanischer Lloyd GL), a shipping company (Farstad Shipping) and an instrumentation development company (Develogic). This combination provides best provisions to succeed. The PropSeas work program is divided in the following work packages:

- Model scale experimental investigation
- Full-scale investigation
- Numerical investigation
- Analysis and evaluation
- Evaluation of recommendations and guidelines

This paper considers only some of the aspects of the problem. A detailed description follows in the final report of the project in the next year.

Measuring Concept

Model Tests

To obtain a better understanding of the physical effects related to the loads on propellers and azimuthing thrusters operating in heavy seas, model scale experiments have been carried out at the Norwegian model basin MARINTEK. Open water tests have been performed on an isolated open propeller in the large towing tank to investigate hydrodynamic forces on the propeller blade and to observe ventilation inception. The fourbladed right-handed propeller was mounted on the open water test rig. A novel blade dynamometer capable of measuring 5 degrees of freedom (the centrifugal component was not measured) was used during these experiments. The use of high-speed video cameras (one under and one above water) gives a visual understanding of ventilation phenomena. Furthermore, model tests with a self-propelled ship model with Azipull propulsors are to be carried out at the ocean basin of MARINTEK at different wave spectra and wave directions. Propulsor loading characteristics as well as relative ship motions are investigated together with ventilation of propulsors.

Full-scale investigation

Full-scale measurements are conducted to improve the understanding of how transient loads on a propeller blade in rough wave conditions compares with those in calm water conditions and how they are magnified in relation to the wave induced hull motions. For this purpose, platform supply vessel Far Searcher (length over all 93.9 m, breadth 21.0 m, draught 6.6 m) of Farstad Shipping ASA (s. Fig. 1) has been instrumented in order to conduct full-scale measurements on propeller loads due to seaways. The vessel is designed for transportation of supplies and equipment to/from offshore installations. Its propulsion system is diesel-electric type. The main engine set consists of four diesels engines and the propulsion unit of the Far Searcher consists of two Rolls-Royce Marine Azipull thrusters (s. Fig. 2), each fitted with a controllable pitch propeller (diameter 3.2 m, 4 blades, pitch to diameter ratio at 0.7 radius 1.2).



Fig.1: Offshore Supply Vessel Far Searcher



Fig.2: Azipull Propulsor

Figure 3 shows the arrangement of the measuring equipment. Sensors are placed at the propeller, in the thruster and in the engine room. The following quantities are to be measured during normal operation of the supply vessel:

- torque, power and number of revolutions of the electric drives
- pitch and azimuth angles of the thrusters
- number of revolutions of the propeller, as well as its position
- strains at the propeller blade root
- accelerations at thruster and near the ship's centre of gravity

One propeller blade of the Azipull type AZP120 unit has been machined with a tailored solution to accommodate strain gauges that shall be mounted to the face and back of the blade surface. Four strain gauge rosettes are placed on either side of the propeller blade root. (s. Fig.4) Interior parts of the thruster are also influenced by the lead-in wire for transfer of the strain gauge signals to the antenna on the top flange of the thruster. Careful engineering has been carried out to accomplish this instrumentation such that leakages and stress concentration in the blade and other components are avoided and at the same time ensure that the system will be robust and durable. Furthermore, the Far Searcher is equipped with a Health and Monitoring system for the engines and propulsors (HEMOS). The HEMOS system includes transfer of the recorded data from "ship to shore". The strain gauge data from the propeller blade are linked to the HEMOS logging system. To correlate the recorded data with the wind and wave conditions, nautical data is documented simultaneously. It consists of: speed and course over ground, ship's course, position, roll and pitch angle and wind speed and direction. Typical

load conditions of the propeller can be identified and therefore related to the current sea and operational conditions.

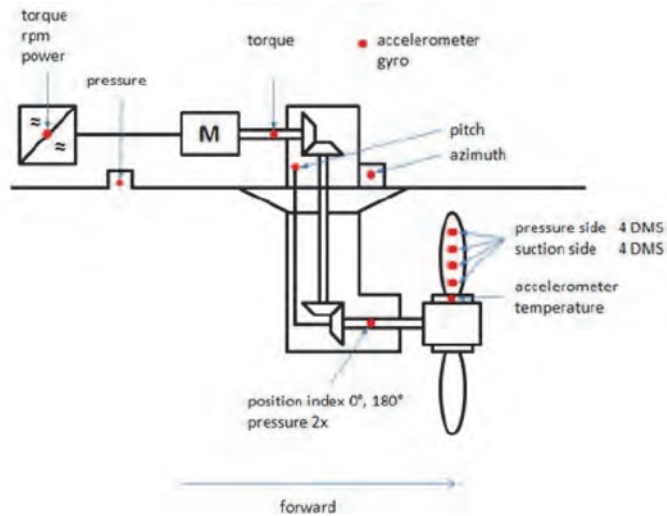


Fig.3 : Sensor arrangement

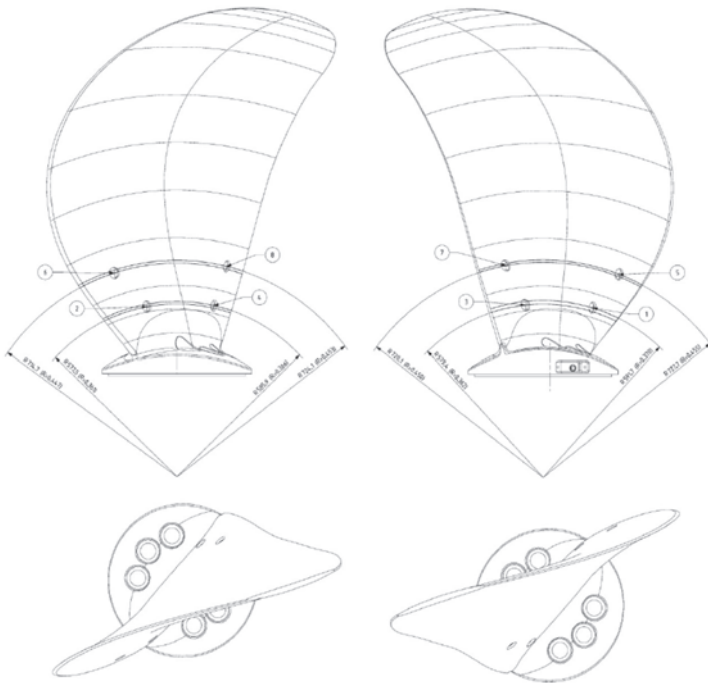


Fig.4 : Strain gauge positions

Numerical Methods

During the project, the finite-volume method OpenFOAM was developed further at the University Duisburg-Essen and at the Germanischer Lloyd SE, while the boundary-element method panMARE and the finite-volume solver FreSCo+ were developed at the Hamburg University of Technology. These methods are briefly described below.

Field method: OpenFOAM (UDE, GL)

The numerical method solves the conservation equations for mass and momentum in their integral form. The fluid is assumed viscous and incompressible, and the flow turbulent, satisfying the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations. The solution domain is subdivided into a finite number of control volumes of arbitrary shape. The integrals over control volumes and their faces are numerically approximated using the midpoint rule. The mass flux through the cell face is taken from the previous iteration, following a simple Picard iteration. The free surface dynamics is computed employing Eulerian interface-capturing techniques of the volume-of-fluid (VoF) type. The convection terms in the momentum equations are approximated using a TVD-limited linear second-order scheme. The pressure-velocity coupling follows the PISO method. Integration in the time domain relied on the use of the implicit Euler or Runge-Kutta scheme. To ensure numerical stability, the exciting forces are under-relaxed. Although the PISO scheme (Pressure Implicit with Splitting of Operators) for pressure-velocity coupling does not require outer iterations, for implicit coupling of flow equations and rigid-body motions such iterations were introduced. At the end of each outer iteration the force equilibrium is checked. The normalised difference between fluid and mass forces serves as criterion to stop outer iterations. Since the first rigid body motions in the current time step can be predicted well based on the previous time steps, the approach converges rapidly. The two-fluid system is modelled following a two-phase formulation of the governing equations. The spatial distribution of each of the two fluids is obtained by solving an additional transport equation for the volume fraction of one of the fluids. As no explicit treatment for the free surface is required, overturning (breaking) waves as well as effects of trapped air can be modelled. In order to avoid numerical smearing of the interface, OpenFOAM employs the explicit MULES scheme. The “sliding-grid” technique was applied for the simulation of flows with a rotating propeller. The numerical investigation of a ship in waves has been performed. For this purpose a new solver sixDoFInterFoam has been developed, which couples the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with Hamiltonian non-linear equations of motion of a rigid body. The equations of motion are solved with a semi-implicit method, in which the Euler-Cromer method is used in the outer loop of the PISO iteration. Furthermore, a strategy has been

developed for automatic generation of numerical grids. This enhancement of the RANSE-software OpenFOAM has been validated with model test results. A series of numerical grids has been generated and multiple ship motion scenarios have been simulated.

In order to investigate possible dynamic amplification of loads due to fluid-structure interaction, RANSE-based flow simulation was coupled with the finite-element structural solver ANSYS. The necessary coupling of the finite element solver with the RANSE-solver has been achieved with MpCCI which is developed by Fraunhofer Institute SCAI. This Mesh-based parallel Code Coupling Interface has been developed in order to provide an application independent interface for the coupling of different simulation codes.

Field method FreSCo+ (TUHH)

The viscous flow solver FreSCo+ (Rung, 2009) is a spin-off of the FreSCo solver that was jointly developed by the Hamburg University of Technology, the Hamburg Ship Model Basin (HSVA) and the Dutch Maritime Research Institute (MARIN). The segregated algorithm is based on the strong conservation form of the momentum equations and employs a cell-centred, co-located storage arrangement for all transport properties. Structured and unstructured grids with arbitrary polyhedral cells or hanging nodes can be used. The implicit numerical approximation is second-order accurate in space and time. Integrals are approximated using the conventional mid-point rule. The solution is iterated to convergence using a SIMPLE-type pressure-correction scheme. Various turbulence-closure models using statistical (RANS) or scale-resolving (LES, DES) approaches are available. Two-phase flows are modelled by interface-capturing methods based upon the Level-Set or Volume-of-Fluid (VOF) technique. In the presented study a VOF-method is used. To obtain the solution of the linear equation systems, methods offered by the PETSc library are employed. The algorithm is parallelised using a domain-decomposition technique based on a Single Program Multiple Data (SPMD) message-passing model, i.e. each process runs the same program on its own subset of data. Interprocessor communication employs the MPI communications protocol. Load balancing is achieved using the ParMETIS partitioning software.

Boundary element method panMARE (TUHH)

The potential-flow method panMARE (Abdel-Maksoud, 2010) is a Boundary-Element method (BEM), i.e. only the geometric-boundaries and (if existing) the water free surface are discretised. A set of linear equations is solved to calculate the forces and velocities. The BEM is based on the solution of the Laplace equation where a velocity potential is evaluated. This potential is a linear combination of several sources and doublets which are distributed on

all boundary surfaces present in the area of interest. The circulation generated by the propeller develops as a sheet of free doublets into the trailing flow. Different boundary conditions can be defined in panMARE. These are the Neumann boundary condition on the body surfaces and the dynamic and kinematic boundary condition on the water free surface. Further the strength of the trailing vortices is defined by the Kutta condition applied on the trailing edge of lifting surfaces. For calculating the unsteady forces acting on a propeller behind a ship, arbitrary distributions of inflow velocities can be used.

Coupling algorithm between FreSCo+ and panMARE

In the coupling approach, the propeller is not geometrically resolved in the viscous flow solver, but modelled by rotating sets of volumetric body forces for each blade surface. The viscous flow method is used to calculate the inflow condition of the propeller, while the inviscid method is used to predict the propeller forces. The corresponding reaction forces are employed as body forces in the viscous approach. The coupling approach is based on the exchange of two properties, i.e. the transfer of inviscid propeller-induced body forces to the viscous solver and the transfer of the effective wake velocities (total wake reduced by the propeller induced velocities) to the inviscid solver. As regards the implementation, two details of the coupling procedure related to the (a) spatial and (b) temporal transfer of information are of specific interest. The former issue is associated to mapping techniques between two grids of substantially different nature, whereas the latter issue is concerned with explicit, implicit or semi-implicit time advancing techniques. The viscous velocity distribution is extracted in a plane typically located $0.1D$ - $0.2D$ upstream the propeller. The respective data is mapped onto a predefined set of structured locations in a circular domain (specified by corresponding angular and radial positions). The spatial transfer of body-forces from the potential flow solver to the viscous solver follows a different route. Since one force per grid-panel is transferred, the forces of the pressure- and suction-side of the blade are calculated separately. The forces are then distributed to the adjacent fluid cell centres of the RANS mesh as volumetric body forces. Although the grids of the viscous and the inviscid method are significantly different, in particular with respect to the grid density, the mapping procedure maintains force conservation. It utilizes a cell-search algorithm that connects each panel to the closest cell centre and the corresponding neighbour cells in a conservative way. The free water surface calculated with the VOF-method by the viscous solver can also be transferred to the inviscid method as a part of the coupling-algorithm. Because the required grid density differs significantly between the solvers, independent grids based on different data structures have to be supported. Since there is no physical free surface calculated by the VOF-method, the interface between water and air is reconstructed by an interpolation of the mixture fraction c – where $c=1$ refers to air and $c=0$ pertains

to water. On the reconstructed free surface data a Fourier transformation is performed to obtain an analytical representation of the surface. The Fourier transformation employs two-dimensional cutting planes along the main flow direction and only the Fourier coefficients are passed to the BEM. The height of the free surface can subsequently be determined at arbitrary planar positions of the panel grid in panMARE. The position of the free surface is updated in each coupling cycle when a new distribution of velocities is transferred. For results see Wöckner (2011).

Results

Propeller flow: OpenFOAM (UDE)

The calculations have been performed on the so-called 551765-001 propeller blade design of Rolls-Royce Marine. The geometry is identical to the propeller which was experimentally investigated by the Norwegian model basin MARINTEK. For the numerical simulations the geometry of the propeller blade, hub and shaft were modelled. A spatial discretisation of the fluid domain has been achieved with a hexahedral grid consisting of 0.5 and 3.5 mio cells for each blade. Fig.5 shows a comparison between measured and computed forces and moments acting on the fully submerged propeller. The flow was assumed to be fully turbulent. The computed forces and moments agree well with the measurements – the differences between the computed and measured loads are below 2%, Fig. 5. The simulations of the partially submerged propeller were accomplished using a hexahedral grind consisting of about 3 mio cells. Interface capturing of the free surface is achieved by using the VOF-method. The calculations were performed for different submergence ratios h_0 and advance ratios J . The definition of the submergence ratio is represented in figure 6. Simulations results for different submergence ratios h_0 for a constant advance ration $J=0.9$ are shown in Table 1. Up to propeller immersion corresponding to $h_0=1$ (the top of propeller blade at the free surface level), the changes of the forces and moments on the propeller are marginal. During the emersion of a blade ($h_0=0.0$), the forces and moments on the propeller decline. Fig.7 shows a comparison of computations with the measurements. While the differences between the measurements and computations are significant at very low advance ratio values, these differences are marginal in the region of operational advance ratio. There are still some uncertainties regarding both computations and measurements for a partially submerged propeller.

h_0	K_t	Deviation	K_q	Deviation	η_0	Deviation
∞	0.205	1.43%	0.042	0.63%	0.700	0.8%
1.5	0.183	-10.46%	0.042	0.61%	0.631	-9.91%
1	0.186	-9.15%	0.041	-2.56%	0.654	-6.74%
0	0.081	-60.34%	0.017	-58.40%	0.668	-4.63%

Table 1: Partially submerged propeller with constant advance ratio $J=0.9$ computed effect of variable submergence ratio h_0

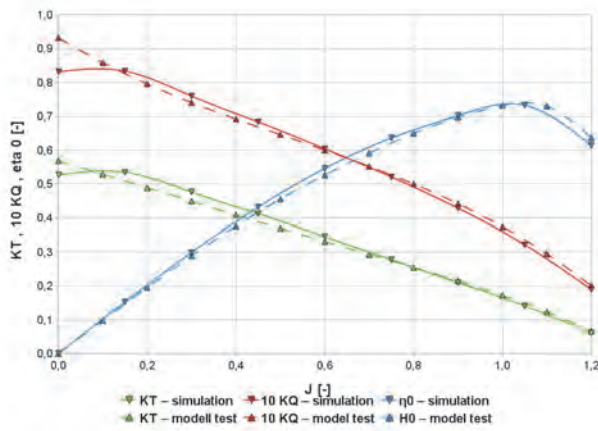


Fig.5 : Computed and measured propeller forces

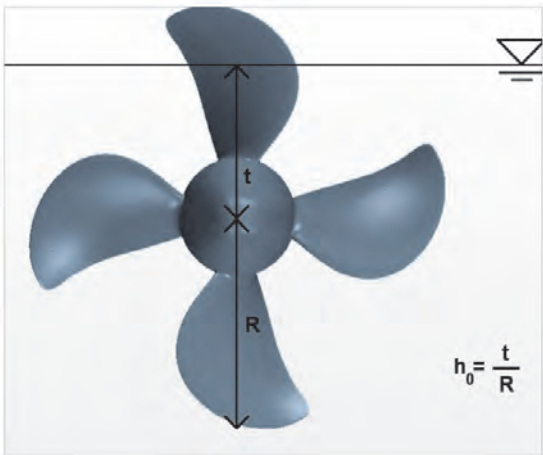


Fig.6 : propeller submergence ratio h_0

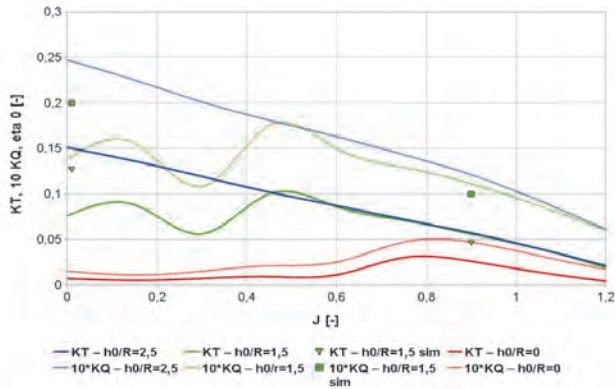


Fig.7: Measured and computed propeller forces for different submergence ratios

Propeller flow: Boundary element method (TUHH)

For simulating the inviscid flow on the propeller geometry, a surface grid of the propeller blade with about 600 panels is applied. A comparison between the calculated and the measured open water performance can be found in Fig. 8. A wave potential is implemented in panMARE in order to reproduce a set of measured results of the unsteady propeller forces in waves, which are induced by the orbital velocities and variation of immersion ratio. Figure 9 shows the calculated oscillation of the propeller side force in waves (see Amini, 2011). With this approach the effects of waves on the propeller can be predicted even for emerging blades neglecting the influence of the blade on the free surface.

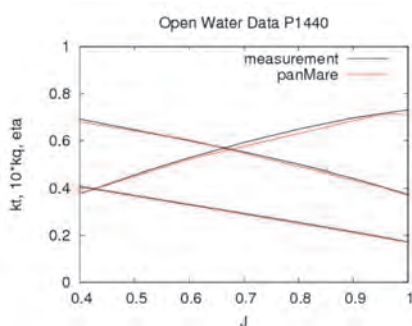


Fig.8 : Open Water Diagram of Propeller P1440

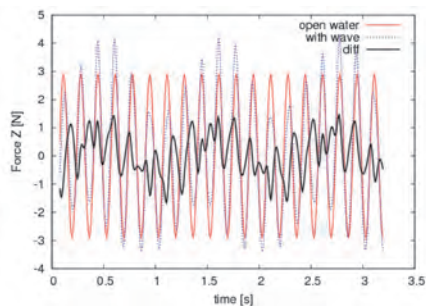


Fig.9: Side Force variation of a propeller in waves

Propeller flow Field Method FreSCo+ (TUHH)

For the viscous simulations an unstructured hexahedral grid with local refinements around the propeller blades and in the free surface regions is used. Overall the grid has approximately 2.8 mio cells (Fig. 10 left). As the whole domain is moving the refinement is concentrated around the propeller. The investigated propeller model has a diameter of $D = 0.2\text{m}$ and operates at a constant number of revolutions ($n = 18\text{ 1/s}$). Furthermore the volume fraction is initialized according to the prescribed immersion ratio. In a first step, the propeller is investigated in deeply submerged open-water condition for validation purposes. A comparison of the computed open water characteristics to the experimental values can be found in Figure 10 on the right hand side. Overall a good agreement is observed. Only the values for the open water efficiency are slightly underpredicted by FreSCo+ at the larger advance coefficients due to the increased torque values. Different advance coefficients are then simulated to investigate the influence of the propeller loading on the amount of ventilation. During this computations the immersion ratio is assigned to a constant value of $h_0=1.5$. The investigated advance coefficients vary from bollard-pull conditions ($J=0.01$) to $J=1.2$. The propeller is expected to ventilate for the smaller advance coefficients, while no ventilation will occur for the larger ones. To analyse the results, the free surface contour around the propeller is visualized in Figure 11 for different advance coefficients. The single figures show the propeller at one instant in time after the first couple of rotations. Ventilation is visible for the two smallest advance coefficients. Here the free surface is sucked down by the propeller and a blade partly ventilates, when it leaves the topmost position. The influence of the propeller on the free surface decreases, if the advance coefficient is further increased and above an advance coefficient of $J=0.6$ nearly no deformation of the free surface is visible.

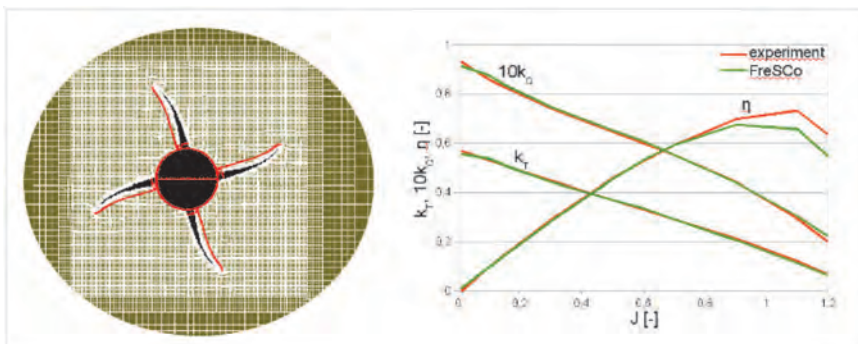


Fig.10 : (left): Computational grid used for the FreSCo+ simulations (right): Comparison of deeply submerged open water diagram between experiments and simulations

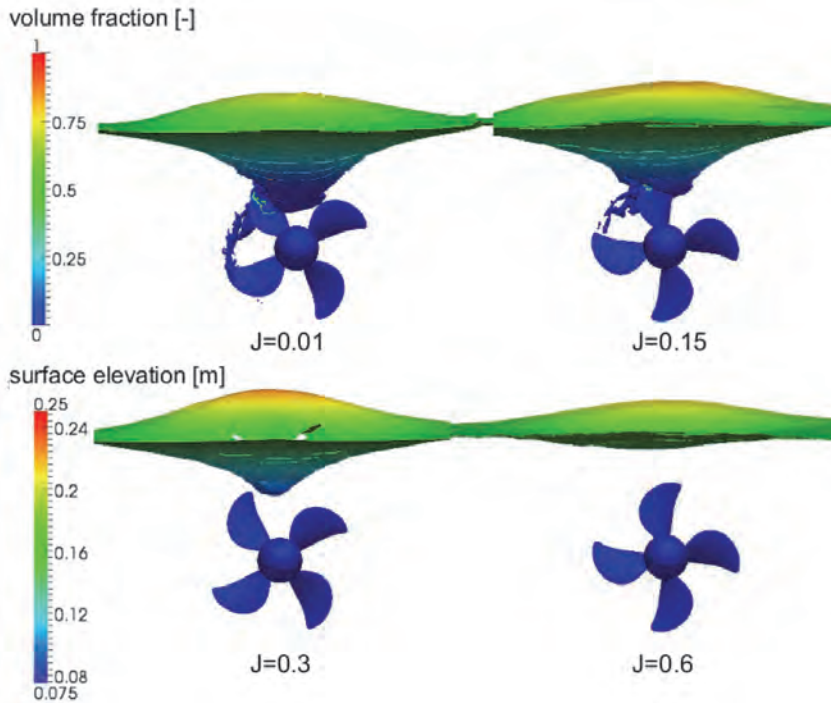


Fig.11 : Flow visualisation for different advance coefficients at constant immersion ratio

Analogous to that, the occurrence of ventilation is also visible in the predicted thrust values. Figure 12 (left) shows the calculated blade thrust of the ventilated propeller divided by the thrust of non-ventilated condition over the blade position. The red dots depict the results for $J=0.01$. Here thrust losses up to 80% of the deeply submerged value can be found near the upright position, while nearly no thrust losses are obtained in the lowest position. The thrust losses become smaller when the advance ratio is increased to $J=0.15$ (black dots) and nearly a constant thrust over one rotation is predicted for $J=0.3$. Secondly, the influence of the immersion ratio is investigated. Next to the simulated immersion ratio beforehand, two smaller immersion ratios ($h_0=1$ and $h_0=0$) are simulated. The computed blade thrust ratios along the angular position for an advance coefficient of $J=0.3$ are shown in Figure 12 (right). A clear correlation can be found between the amount of ventilation on a blade, the thrust losses and the immersion ratio. The calculated results are compared to experiments performed by MARINTEK. Figure 13 (left) depicts the comparison for $J=0.15$ and $h_0=1.5$. Similar to the results presented before, the thrust losses are displayed over the blade position. The magnitude between the minimum and maximum thrust value is almost equal in the experiments and the simulations. But a stronger variation over one rotation is ob-

served in the computations with nearly the same tendency in each rotation. In the experiments the thrust losses are almost constant over one rotation, but different levels of thrust loss are measured depending on the duration of the experiment. During ventilation periods, the whole propeller is surrounded by air in the experiments, Figure 13 (right), while the blade loses contact to the free surface behind the lowest position in the simulations (upper right picture of Figure 10). More details on the comparison between the experiments and the FreSCo+ computations can be found in Kozłowska (2011).

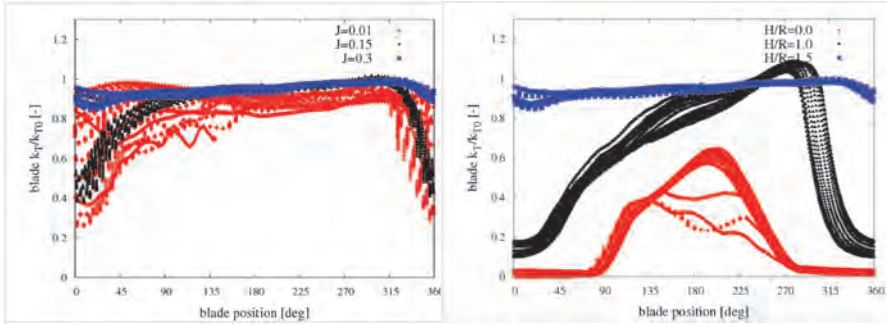


Fig.12 (left) Computed thrust losses for the three smallest advance coefficients

Fig.12 (right) : Computed thrust losses for the investigated immersion ratios at constant advance co-efficient $J=0.3$

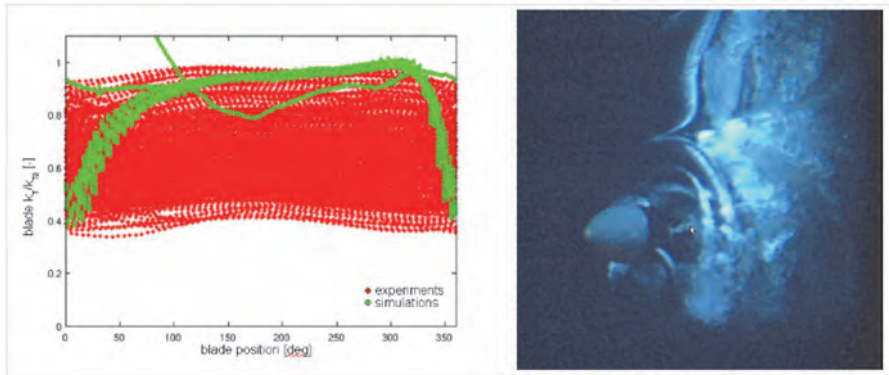


Fig.13: Comparison between measurements (red) carried out by MARIN-TEK and simulations (green). The right figure displays a photo from the experiments for the same case)

Seakeeping OpenFOAM (UDE)

The study was undertaken for two ship types, a Panmax container ship (KCS) and a ferry (Table 2 shows main particulars). A series of model measurement results at different institutes was provided to the participants of the workshop and used in this project for validation of the developed tools.

	KCS	Ferry
L_{pp} [m]	230.0	173.0
B [m]	32.2	26.0
T [m]	10.8	6.3
∇ m ³	52030	15338
C_B	0.651	0.541

Table 2: Main particulars

The numerical grids were generated with an open source grid generator SnappyHexMesh; the grid resolution depends on the wave length and Froude number; significantly more cells were used for the simulations with short waves and small Froude numbers in order to resolve incoming, radiated and diffracted waves. For incoming waves longer than about one ship length, the numerically predicted ship motions become periodic in few wave periods. However, for shorter incoming waves, the disturbances due to the initial condition remain relatively long. In such cases, more than 10 periods were usually required until periodic ship motions are achieved. The rigid body motions were accounted for by grid deformation. The solution of the motion equations yields the displacement of the vertices on the ship hull, while vertices on the water bottom, inlet and outlet are fixed. The displacement of the cell vertices inside the computational domain is determined using a grid deformation algorithm. For the estimation of the spatial discretisation error, grids of varying density were used. Simulations were performed in head waves for a model unrestrained in heave and pitch and moving with a prescribed forward speed. Figures 14 and 15 show computed and measured time histories of heave and pitch motions of the container vessel in head wave. The computed transfer functions of heave and pitch for the ferry are compared with measurements in Fig. 16. In general, the computed and measured motions in waves agree well with each other; this holds for both amplitudes and phases of motions.

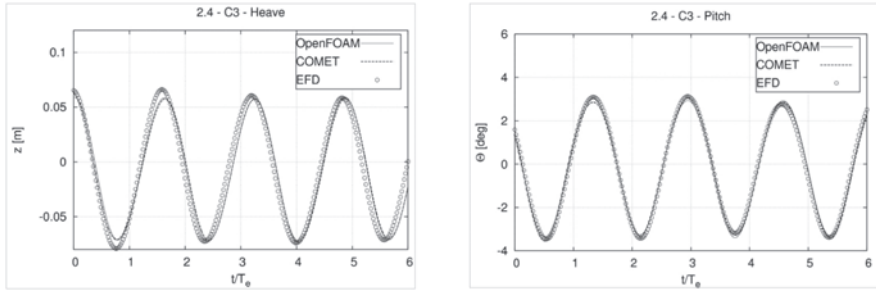


Fig.14: Computed and measured time history of heave (left, figures in model scale) and pitch motion (right) of KCS ($\lambda/L_{pp}=2$, $Fn=0.26$, Wave height = 7m)

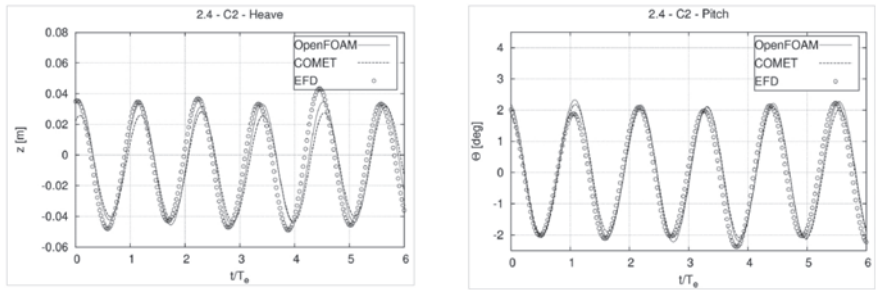


Fig.15: Computed and measured time history of heave (left, figures refer to model scale) and pitch motion (right) of KCS ($\lambda/L_{pp}=1.33$, $Fn=0.33$, Wave height = 5 m)

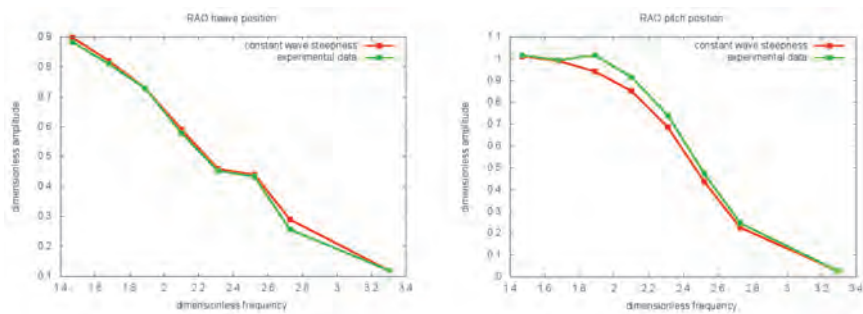


Fig.16: Computed RAO for the ferry ($Fn= 0.25$)

Summary

Because of the limited size of this report, only a small part of the project results is presented. The report focuses on the development and validation of numerical methods. The developed methods are used in order to determine the loads acting on the propeller in seaway. Different scenarios were studied, including sailing ahead, drifting, crash stop manoeuvre, partial emersion of the propeller blades (propeller racing) and oblique flow due to ship motions in seaway. Further, the influence of dynamic amplification of propeller loads due to fluid-structure interaction was studied. Although the full-scale measurements of propeller loads are not completed yet, the relevant critical scenarios for propeller loads were identified using the onboard system Health Monitoring On Ship System (HEMOS) on the vessel Far Searcher: combinations of ship motions, propeller rotation rate, blade pitch, ship speed etc. These observations are very valuable with regard to the determination of the load spectra on the propeller.

In the project PropSeas, viscous finite-volume solvers as well as boundary element methods were further developed and coupled, in order to enable – as far as we know at the first time – well-founded computation of loads on the propeller in seaway. The extensive model test measurements at MARINTEK have enabled sound validation of the developed methods. The developed methods were applied for the investigation of propeller loads under different operational scenarios.

Literature

- Abdel-Maksoud, M., Steden, M., & Hundemer, J. (2010). Design of a Multi-Component Propulsor. 28th Symposium on Naval Hydrodynamics. Pasadena, USA.
- Amini, H. (2011). Azimuth propulsors in off-design conditions. Trondheim, Norwegen: Norwegian University of Science and Technology.
- Bertram, V., Schmode, D. & Tenzer, M. (2009). Simulating Ship Motions and Loads using OpenFOAM Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Band 103, Hamburg
- Bertram, V., el Moctar, O. (2000). RANS Simulation of Propeller in Oblique Flow. Proceedings of the 3rd Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS), Tjarno, 2000
- Kozłowska, A., Wöckner, K., Steen, S., Rung, T., Koushan, K., & Spence, S. (2011). Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation. Proceedings of the 2nd International Symposium on Marine Propulsors. Hamburg, Germany.
- el Moctar, O, Kaufmann J., Ley, J., Oberhagemann, J., Shigunov, V. & Zorn, T. (2010). Prediction of Ship Resistance and Ship Motions using RANSE Proceedings of the Gothenburg Workshop 2010
- el Moctar, O. (2001). Numerical computations of flow forces for maneuvering ships. Ship Technology Research, 2001
- Rung, T., Wöckner, K., Manzke, M., Stück, A., Brunswig, J., & Ulrich, C. (2009). Challenges and Perspectives for Maritime CFD Applications. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 103.
- Wöckner, K., Greve, M., Scharf, M., Rung, T., & Abdel-Maksoud, M. (2011). Unsteady Viscous/Inviscid Coupling Approaches for Propeller Flow Simulations. Proceedings of the 2nd International Symposium on Marine Propulsors. Hamburg, Germany.

AGaPaS – Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See

H. Kucharzewski, J. Burg (MarineSoft, Rostock); G.F. Clauss, A. Kauffeldt, N. Otten (Technische Universität Berlin, Schiffs- und Meerestechnik); D. Sedlacek, U. Fielitz (Institut für Sicherheitstechnik und Schiffsicherheit e.V., Rostock); R. Bronsart, T. Buch, M. Haase, E. Ihde, A. Krüger, M. Kurowski, B.P. Lampe, S. Neubert, R. Stoll, M. Wulff (Universität Rostock); W. Sichermann, T. Richard (Blohm + Voss Naval, Hamburg)

1 Einleitung

Das Über-Bord-Gehen von Personen stellt einen schweren Seeunfall mit einer erheblichen Gefährdung für das Leben des Verunglückten und der an der Rettung beteiligten Personen dar. Auf hoher See ist dabei die Besatzung des Schiffes des verunglückten Seemannes mit dezimierter Stärke häufig auf sich allein gestellt. Auch wird der Unfall oftmals zu spät festgestellt. Weil Rückführ-, Aussetz- und Rettungsmanöver nach konventioneller Methode weitere Zeit in Anspruch nehmen, ertrinkt der Verunfallte nicht selten wegen Erschöpfung oder unterkühlt sich mit Todesfolge innerhalb von Minuten.

Beim gegenwärtig praktizierten Rettungsprozess wurden folgende Defizite identifiziert:

1. Eine Alarmierung erfolgt in der Regel über Unfallzeugen, die durch Ruf, persönliche Meldung oder über Kommunikationsmittel den Unfall zur Brücke melden. Das führt in der Mehrzahl der Fälle zu einer Informationsverzögerung und zu Informationsdefiziten bezüglich des Unfallhergangs.
2. Der einzige Informationsweg zwischen Verunfalltem und Schiff ist der Sichtkontakt. Der Sichtkontakt zum Verunfallten wird zunächst nur vom Unfallzeugen und erst verzögert von der Brückenwache hergestellt. Gegebenenfalls ist ein Typhonsignal als Information an den Verunfallten zu geben.
3. Erstmaßnahmen durch den Unfallzeugen und durch die Brückenwache, wie Werfen eines Rettungsringes zur Sicherung des Verunfallten, erfolgt zeitlich verzögert. Das Erreichen des Rettungsringes ist für den Verunfallten unrealistisch.

4. Die interne Kommunikation und Orientierung der Besatzung auf den Notfall erfolgt über den Generalalarm (außer Marineeinheiten). Der Start aller Maßnahmen zur Rettung ist daher nur über Zusatzinformationen (Durchsage) möglich.
5. Die Zeit zur Rückführung des Schiffes und das Aufstoppen in unmittelbarer Nähe des Verunfallten liegt in Abhängigkeit von der Schiffsgröße und den Manöviereigenschaften in einer Größenordnung von 5 bis 20 Minuten. Dabei ist die Bedingung einzuhalten, dass das Rescue Boot nur bei $V_s < 5\text{kn}$ ausgesetzt werden kann.
6. Eine unmittelbare Rückführung des Schiffes kann unter bestimmten Umständen wie Seegang, Verkehrslage, Fahrwasserbedingungen u.a. behindert oder unmöglich sein.
7. Das Aussetzen eines Rescue Bootes zur Aufnahme des Verunfallten hat bei extremen Seegangsbedingungen objektive Grenzen, die jedoch durch subjektive Faktoren (Entscheidung des Kapitäns, Ausbildungs- und Trainingsstand u.a.) variieren.
8. Eine Aufnahmetechnik und -technologie oberhalb der Einsatzgrenzen von Booten existiert an Bord von Schiffen derzeit nicht. (außer Rettungsschwimmer auf Marineeinheiten)
9. Eine sofortige externe Information (Notfallalarmierung) erfolgt erst auf Entscheidung des Kapitäns. Dies geschieht in der Regel erst bei Verlust des Sichtkontaktes, der eine anschließende Suche nach dem Verunfallten erfordert bzw. wenn eine Aufnahme der POB durch das Schiff nicht möglich ist.
10. Die Hinführung externer Retter zum Verunfallten gestaltet sich besonders schwierig, wenn das eigene Schiff nicht in unmittelbarer Nähe des Verunfallten positioniert werden kann.

Um dieses Problem zu lösen, haben sich unterschiedliche wissenschaftliche und industrielle Partner zusammengeschlossen und das interdisziplinäre Forschungsprojekt Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See (AGaPaS) ins Leben gerufen. Hauptaufgabe des Projektes ist es, die Zeitspanne zwischen dem Unfall und der Rettung des Verunglückten durch die Entwicklung eines automatischen Alarmierungssystems in Verbindung mit einem autonomen und ferngesteuerten Rettungsfahrzeug wesentlich zu verringern und somit den gesamten Search-and-Rescue (SAR) -Prozess abzudecken. Gleichzeitig sind die Überlebensbedingungen der Person so lange zu gewährleisten bis die Rettungstechnik mit dem Verunfallten durch das ei-

gene Schiff oder durch externe Rettungskräfte aufgenommen wurde. Grundlage des geplanten halbautomatischen Rettungsprozesses ist das erarbeitete Pflichtenheft.

Seit Jahrhunderten unterliegt die Seefahrt permanenten technischen Entwicklungen, die darauf abzielen, den Seetransport sicherer und effizienter zu gestalten. Innovationen im Bereich Schiffbau müssen sich ständig an den Erfordernissen des Welthandels messen. Daraus wachsende Anforderungen an das Schiffspersonal und die Technik sind sowohl in der Aus- und Weiterbildung als auch in zukunftsweisenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu berücksichtigen.

Entwicklungen von Technologien und Verfahren zur Erhöhung der Sicherheit stehen dabei stets im Focus der Konstrukteure, Schiffbauer, Reeder, Zulassungsbehörden, Ausbildungseinrichtungen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen.

Ein Kooperationsverbund aus Industrie, Wissenschaft und Forschung, bestehend aus der MarineSoft GmbH Rostock, Blohm + Voss Naval Hamburg, dem Institut für Sicherheitstechnik und Schiffsicherheit e.V. Rostock, der Universität Rostock und der Technischen Universität Berlin haben sich mit Unterstützung des Projektträgers Jülich und bei Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im **Projekt AGaPaS - Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See** dieser Herausforderung gestellt.

Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung des Funktionsmusters eines sich selbst aktivierenden Rettungssystems, das auf See über Bord gegangene Personen (engl. Person over Board (POB)) selbständig auffindet und deren Bergung durchführt. Dieses Roboter-System unterstützt den gesamten „SAR“-Prozess. Die systembestimmenden AGaPaS - Komponenten sind:

- Rettungsweste mit GNSS – Signal Empfänger / Sender,
- Autonomes Rettungssystem, bestehend aus Rettungsfahrzeug (RF) mit Bergungssystem, Rettungsweste und Vitalsensor,
- Aussetz- und Aufnahmeeinrichtung für das Rettungsfahrzeug (Konstruktionsvorschläge),
- SAR – Steuerstation und
- SAR – Brückensystem.

2 SAR-Szenario

Ausgehend vom „POB“ Rettungsprozess ist das nachfolgende AGaPaS Rettungsszenario entwickelt worden, aus dem ein Pflichtenheft für das Rettungssystem abgeleitet wurde.

Geht eine Person über Bord, wird automatisch ein Alarm ausgelöst. Durch eine speziell entwickelte Rettungsweste wird fortlaufend die Position des Verunfallten mit Hilfe von Positionsbestimmungssystemen wie GALILEO oder (D)GPS ermittelt und an die SAR-Steuerstation des Mutterschiffes sowie an das Rettungsfahrzeug gesendet. Über die SAR-Steuerstation wird gleichfalls das Rettungsfahrzeug aktiviert.

Das automatisch ausgesetzte Rettungsfahrzeug wird ständig mit den Positionsdaten der verunfallten Person versorgt und manövriert selbständig und schnellstmöglich zur Unglücksstelle (Zielfahrt). Ab einer bestimmten Distanz zur verunfallten Person wird das Rettungsfahrzeug auf Basis von Telemetriedaten, die unter anderem Videodaten sind, ferngesteuert und in eine Bergungsposition gebracht, die es erlaubt, den Verunfallten aufzunehmen. Der POB wird dann mittels einer speziell entwickelten Aufnahmeeinrichtung geborgen. Nach der erfolgreichen Bergung manövrieren das Rettungsfahrzeug und das Mutterschiff zueinander, hierbei steht eine ständige Funkverbindung für die am SAR-Prozess beteiligten Seeleute zur Verfügung.

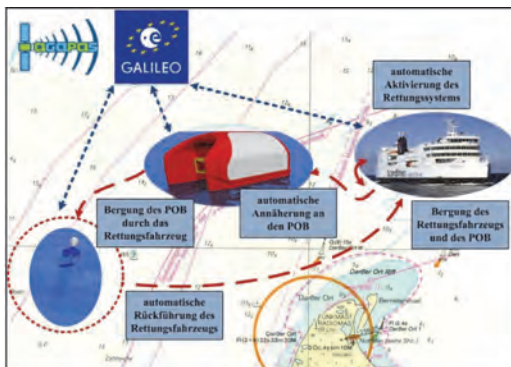


Abbildung 2.1: SAR-Szenario

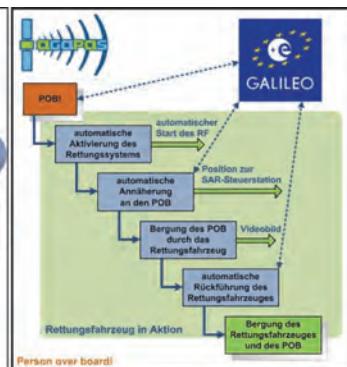


Abbildung 2.2: SAR-Prozess

3 Rettungssystem

Wie aus Abbildung 3.1 ersichtlich, deckt das im Projekt entwickelte System den gesamten SAR-Prozess lückenlos ab. Es besteht aus den Hauptelementen POB-Rettungsweste, Rettungsfahrzeug und Mutterschiff.

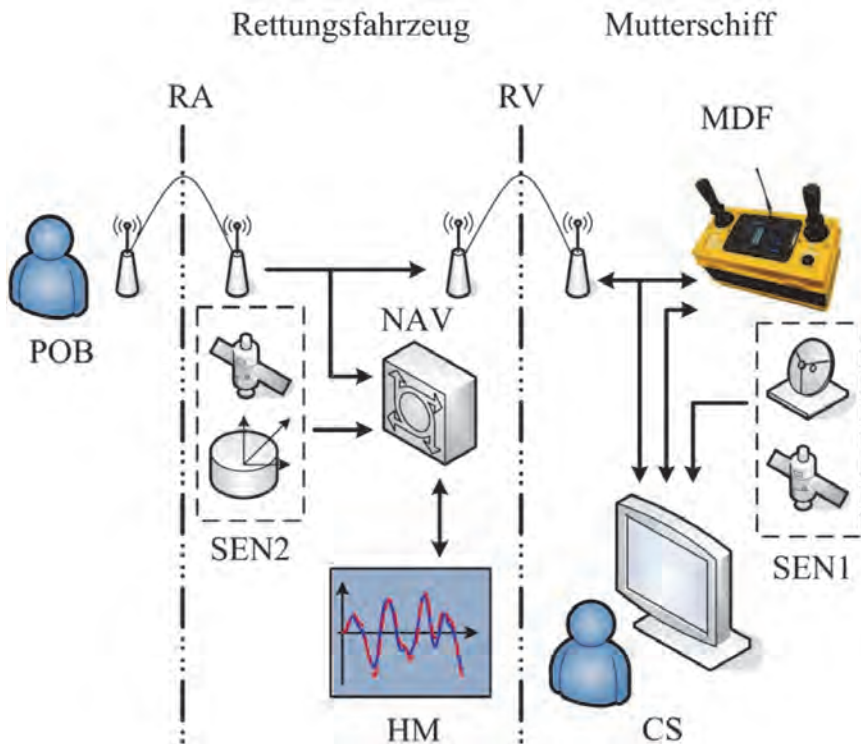


Abbildung 3.1: SAR-System

Das zentrale Element ist die auf dem Mutterschiff befindliche SAR-Steuerstation (CS). Sie stellt das Hauptüberwachungs- und Steuersystem des SAR-Prozesses dar. Ebenfalls an Bord des Mutterschiffes befindet sich neben den bordeigenen Navigationssensoren (SEN1) auch das Modulare Dezentrale Fernbedienungsmodule (MDF). Diese mobile Fernbedienungseinheit dient der manuellen und teilautomatisierten Fernsteuerung des Rettungsfahrzeuges sowie der Aufnahmevorrichtung. Außerdem zeigt es Zustände, Warnungen und Störungen der Rettungsausrüstung an.

Der mittlere Teil der Abbildung beschreibt die Elemente des Rettungsfahrzeuges selbst. Das Kommunikations- und Steuerungssystem (NAV) besteht aus dedizierten PC/104 PC-Modulen, die hauptsächlich zwei Aufgaben realisieren. Einerseits steuert es die Funk- und die Videodatenübertragung und sammelt und verarbeitet die Daten der Infrarot- sowie der Greyscale-Kamera. Andererseits steuert es das Rettungsfahrzeug selbst. Zu Testzwecken wurde im Frühstadium des Projektes ein hydrodynamisches Modul (HM) genutzt, welches die Bewegung des Rettungsfahrzeuges einschließlich der Einflüsse von Störungen wie Seegang simuliert. SEN2 beschreibt die ausgestatteten Sensoren für Bewegung und Navigation des Rettungsfahrzeuges.

Die im Projekt eigens konfigurierte POB-Rettungsweste sendet mit Hilfe eines AIS-Senders (Automatic Identification System) laufend die Position des Verunfallten. Darüber hinaus werden durch den zugehörigen medizinischen Brustgurt die Vitaldaten des Verunfallten an die SAR-Steuerstation ermittelt und bei entsprechender Entfernung zum Rettungsfahrzeug übertragen.

4 POB-Rettungsweste

Die Rettungsweste selbst ist eine optimale Variante, die während der Deckstätigkeiten nahezu keine Behinderung darstellt und im Wasser eine stabile Überlebenslage gewährleistet.

Der zweite Bestandteil der Rettungsweste ist ein automatisch auslösender Notsender. Er übernimmt die Alarmauslösung, sendet das Startsignal für das Rettungsfahrzeug, übernimmt die Positionsdaten vom GALILEO-System und übermittelt sie an die SAR-Steuerstation mit Hilfe eines Satellitenempfangs- und Kommunikationsmoduls.

Hierfür kam im Laufe des Projektes ein auch hinsichtlich der Abmaße geeignetes Gerät mit folgenden Leistungsmerkmalen auf den Markt:

- Einfacher Selbsttest für Funktionsprüfung
- Sehr lange Batteriestandzeit = lange Serviceintervalle
- Kleiner AIS SART - Individuelle Identifikationsnummer des Gerätes
- Made in Germany
- Sendereichweite bis zu 25nm (abhängig von Wellenhöhe und Empfangs-Antennenhöhe)
- BSH Zulassung: BSH / 4615 / 4361565 / 10

Technische Daten:

- Sendeleistung, typisch 2W
- Integrierter, schneller GPS-Empfänger
- Wasserdicht bis 10m (IP68)

- Betriebstemperaturbereich: -20°C bis 65°C
- Länge 125mm, Breite 68mm, Höhe 30mm
- Gewicht ca. 210g

Die Aktivierung des Senders erfolgt ca. 2 Minuten nach Wasserkontakt

Die Kombination des Notsenders mit einer zugelassenen und geeigneten Rettungsweste ermöglicht die notwendige Standortinformation als Voraussetzung aller übrigen bereits beschriebenen Rettungsaktivitäten.



Abbildung 4.1 und 4.2: POB-Rettungsweste und Easy Rescue AIS Seenot-Funksender

Eine weitere Ausrüstungskomponente stellt das mobile Sensormodul zur Erfassung der Vitaldaten der POB dar. Dieses Sensormodul ermöglicht in Kombination mit einem Brustgurt die Aufnahme eines Zweikanal-EKGs, der Atmung, der Hauttemperatur und der Körperlage. Die Informationen können nach der Aufnahme der POB kabellos vom Rettungsfahrzeug abgerufen und an die SAR-Steuerstation weitergeleitet werden.

5 Rettungsfahrzeug

5.1 Entwurf

Bei vergleichenden Analysen eines Monohulls und eines Katamarans wurde letzteres Konzept wegen seiner besseren Wendigkeit und der Möglichkeit, die Person mit einem Korb zwischen den Rümpfen zu retten, bevorzugt.

Fünf Alternativentwürfe wurden untersucht. Der endgültige Entwurf vereinigt die besten Eigenschaften und bietet optimale Längs- und Querstabilität, eine hohe Zuladung, genügend Stauraum und ein gutes Freifallverhalten bei angemessenen Kosten und Platzbedarf. Die Rettung erfolgt durch einen Netz-

korb, der an seiner Hinterkante gelenkig gelagert ist. Die Rumpfgeschwindigkeit beträgt 5,5 kn und die Beschleunigungen beim Abwurf aus 7,5 m Höhe konnten auf ca. 6,5 g reduziert werden, verglichen mit 35 g (Entwurf 3) bzw. 10 g (Entwurf 4). Um Zuladung und Wasserlinienfläche weiter zu erhöhen ist der Unterwasserteil völliger gestaltet. Gleichzeitig wurde die Heckform neugestaltet und die Propellerzuströmung optimiert [CI2010].

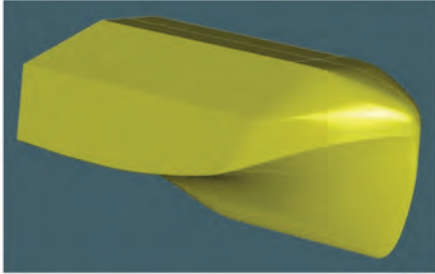


Abbildung 5.1: Rumpfform des Monohulls

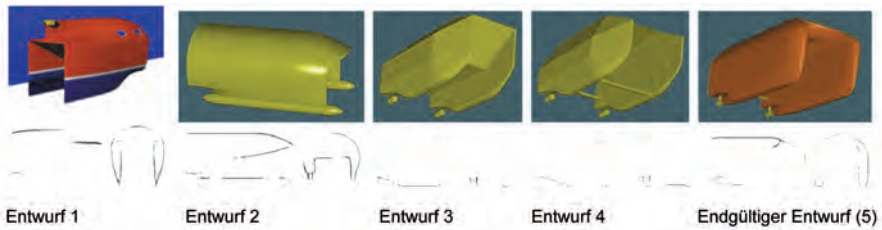


Abbildung 5.2: Entwicklungsstufen zum endgültigen Design des Rettungskatamarans

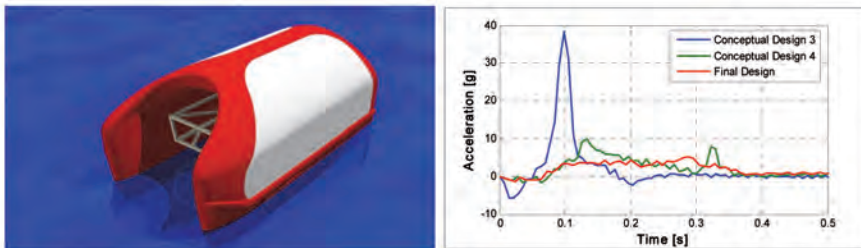


Abbildung 5.3: links, Endgültiger Entwurf, rechts, Beschleunigung beim Eintauchen nach dem Freifall (Entwurf 3, 4, 5)

5.2 Modellversuche und CFD-Analysen

Vor dem Bau der Großausführung wurden diverse Größen durch Modellversuche als auch CFD-Analysen untersucht. Durchgeführt wurden Manövrier-, Propulsions-, Seegangs- sowie Freifallversuche.

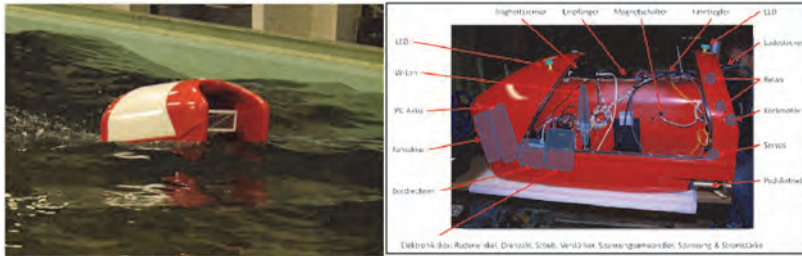


Abbildung 5.4: Modell des Rettungsfahrzeugs (Maßstab 1:4,5)

Das 1 m lange Modell ist frei fahrend und wird per Fernbedienung gesteuert. Neben der Messtechnik zur Erfassung von Schub, Drehzahlen, Ruderwinkel, Beschleunigungen, Stromverbrauch und Spannung ist auch ein Computer an Bord, der per W-LAN bedient wird und Messdaten verarbeitet bzw. speichert. Für die Simulation des Rettungsprozess ist ein voll funktionsfähiger Rettungskorb installiert. Der Maßstab von 1:4,5 ergibt sich als Kompromiss zwischen Zuladung (Messtechnik) und möglichst kleinen Abmessungen für die Seegangsversuche, die im 100 m langen und 8 m breiten Seegangsbecken der Technischen Universität Berlin stattfanden.

Die Manövierversuche belegen die außerordentliche Wendigkeit des mit drehbaren Pod-Antrieben ausgerüsteten Fahrzeugs. Mit Ruderwinkel über 90° kann das Boot problemlos auf der Stelle drehen. Die Propulsionsversuche zeigen darüber hinaus, dass die Rumpfgeschwindigkeit von 5,5 kn mit der vorgesehenen elektrischen Antriebsanlage von 2 x 4 kW mühelos erreicht und sogar überschritten werden kann. Im Seegang folgt das Rettungsfahrzeug den Wellen. Dies ist wichtig, um die Relativbewegungen zwischen dem Fahrzeug und der zu rettenden Person, die ebenfalls den Wellen folgt, zu minimieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Rettungsoperation auch im Seegang durchführbar ist.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Freifallversuche gelegt, da der Abwurf eine wesentliche Voraussetzung für die geringe Reaktionszeit des Systems darstellt. Außerdem sind die strukturellen Belastungen für einen Katamaran, der hier erstmalig für den Freifall ausgelegt wird, besonders hoch. Um die optimalen Abwurfbedingungen zu ermitteln, wurden systematische CFD-

Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse anschließend durch Modellversuche validiert wurden. Variiert wurde:

- die Abwurfhöhe: 7,5 m und 15 m
- der Rampenwinkel: 20°, 30°, 40°, 50°, 60°
- die Geschwindigkeit des Mutterschiffes: 0 kn, 7,5 kn und 15 kn

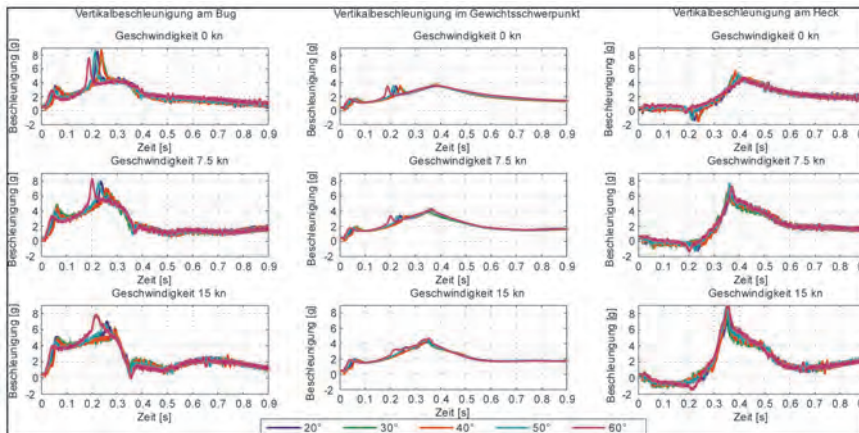


Abbildung 5.5: CFD-Ergebnisse für eine Rampenhöhe von 7,5 m

Die Ergebnisse zeigen, dass der ideale Rampenwinkel zwischen 30° und 40° liegt. Die für 7,5 m Abwurfhöhe dargestellten numerischen Ergebnisse lassen erkennen, dass die maximal auftretende Beschleunigung ca. 8,5 g beträgt. Dabei sind die Werte für den Bug (linke Spalte) und für den Gewichtsschwerpunkt (mittlere Spalte) weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit des Mutterschiffes. Im Heckbereich (rechte Spalte) steigt die Beschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Kurven innerhalb eines Diagramms unterscheiden sich vor allem durch die Lage der Beschleunigungsmaxima, während der qualitative und quantitative Verlauf ähnlich ist, da sich der Eintauchwinkel unabhängig vom Rampenwinkel nur wenig ändert.

Die Bewertung der Ergebnisse gestaltet sich aufwendig, da die Beschleunigungsspitzen nur über einen sehr kurzen Zeitraum auftreten. Die Einwirkzeit der Beschleunigungen ist aber maßgeblich für die Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Rumpfstruktur und die Ausrüstungskomponenten. Da Bauingenieure ähnliche Probleme im Fall von Erdbeben durch die sogenannte rms-Beschleunigung, den effektiven Mittelwert, gelöst haben, wurde deren Methode für unsere Anwendung übernommen. Bezogen auf eine Einwirkzeit von 0,5 s betragen die effektiven Beschleunigungen bei 7,5 m Abwurfhöhe maximal 4,5 g im Bugbereich. Im Gewichtsschwerpunkt werden effektiv nicht einmal 3 g erreicht [CI2011].

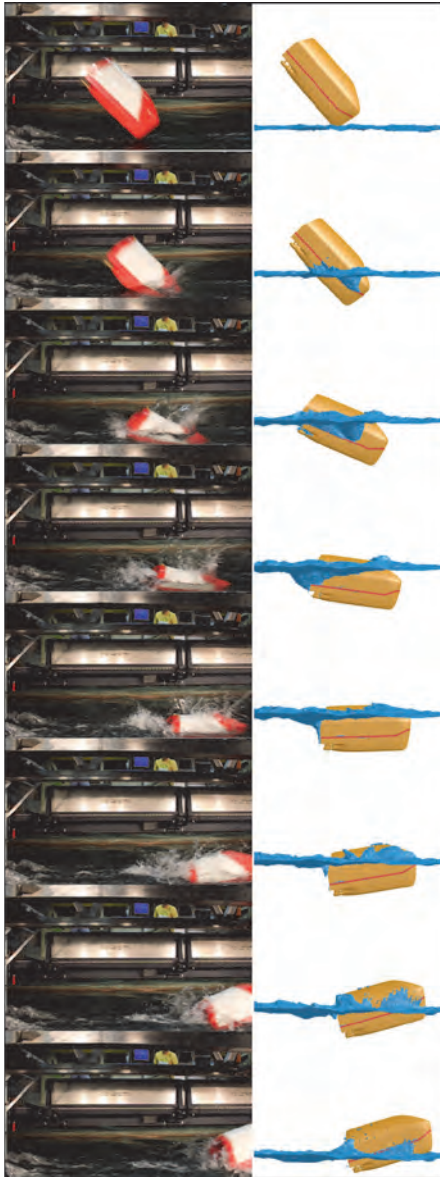


Abbildung 5.7:
Abwurfsequenz (Modell und CFD)

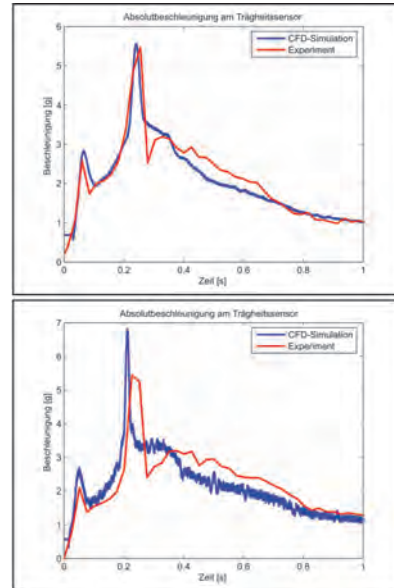


Abbildung 5.6:
Validierung von CFD-Ergebnissen (blau) und Versuchsdaten (rot) für 7,5 m Rampenhöhe und 0 kn Geschwindigkeit bei 30° (oben) bzw. 50° Rampenwinkel (unten)

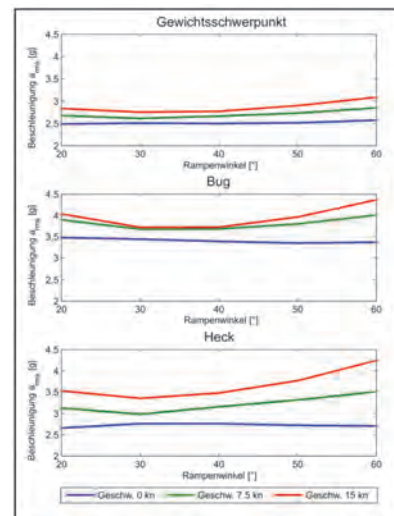


Abbildung 5.8:
rms-Beschleunigungen für Bug, Schwerpunkt und Heck

Die CFD-Rechnungen stimmen ausgezeichnet mit den aus den Modellversuchen gewonnenen Daten überein, wie die Validierung zeigt. Sowohl die Orientierung des Fahrzeugs im Raum, seine Eintauchtiefe als auch die Beschleunigungswerte stimmen bis hin zum Kurvenverlauf perfekt überein.

5.3 Hydrodynamische Modellierung

Manövriersimulation

Zur Untersuchung der hydrodynamischen Aspekte im Projekt AGaPaS wurden verschiedene Ansätze in Bezug auf das Manövrierverhalten des Rettungsbootes gewählt, um den Rettungsprozess zu simulieren. Empirische Methoden wurden mit existierenden Modellversuchsdaten verifiziert und mit freifahrenden Manövrierversuchen optimiert. CFD-Berechnungen für quasistatische Manövrierkräfte wurden mit gefesselten Modellversuchen erfolgreich validiert.

Framework MANIS

Es wurde eine Simulation (MANIS – Manövrieren im Seegang) entwickelt, die das Annähern eines kleinen Rettungsfahrzeugs zu einer an der Wasseroberfläche treibenden Person simuliert. Dabei wurden folgende Anforderungen an den Code gestellt und implementiert:

- Simulation von kleinen Zweirumpfschiffen,
- Simulation von Ruderpropellern,
- Simulation von regulärem und irregulärem Seegang,
- Simulation von seegangsinduzierten Kräften,
- Netzwerkschnittstelle für unabhängige Regelungsalgorithmen und
- Integration verschiedener hydrodynamischer Kraftmodelle.

Empirische Methoden der Manövriersimulation

Mithilfe von empirischen Methoden lassen sich sowohl quasistatische hydrodynamische Kräfte und Momente für die Schiffsbewegung in drei Freiheitsgraden (Schnellen, versetzen und gieren) bestimmen, als auch seegangsinduzierte Kräfte und Momente (Radiation und Diffraktion) approximieren.

Beide Ansätze wurden in der Literatur [Vo1985] gefunden. Speziell die quasistatischen Manövrierkräfte konnten mithilfe von experimentellen Versuchsdaten aus dem SIMMAN-Workshop [St2008] für verschiedene Schiffe erfolgreich validiert werden, siehe [Ha2010]. Zur Berücksichtigung der hydrodynamischen Kräfte an Doppelrumpfschiffen wurde ein Ansatz von [Ma1976] gewählt. Dort werden Querkraft und Giermoment in Abhängigkeit des Rumpfabstandes korrigiert.

Seegangsinduzierte Kräfte

Potentialeffekte des Seegangs auf das Schiff wurden durch empirische Methoden erfasst [Vo1985]. Viskose Effekte wurden hingegen durch Superposition von welleninduzierter Geschwindigkeit und Schiffsgeschwindigkeit berücksichtigt. Durch die Überlagerung der beiden Geschwindigkeiten in einem globalen Koordinatensystem ergibt sich für das Schiff ein effektiver Gierwinkel, der anstelle des Gierwinkels über Grund in den Kraftgleichungen berücksichtigt wird. Es wurde lediglich die horizontale Komponente der Wellenbewegung mit berücksichtigt, da eine vertikale Bewegung in der Simulation vernachlässigt wird. Außerdem setzt diesen Modell voraus, dass die Schiffslänge deutlich kleiner als die Wellenlänge ist, da die welleninduzierten Geschwindigkeiten über die Schiffslänge als konstant angesehen werden. Somit lässt sich der Einfluss der Wellen auf die hydrodynamischen Kräfte in einem nichtlinearen Weg mit berücksichtigen.

Modifikation mit Hilfe von Freifahrt- Modellversuchen

In Kooperation mit der Technischen Universität in Berlin (TUB) wurden Freifahrtversuche im Modellmaßstab 1:4.5 durchgeführt. Verschiedene Standardmanöver wie Drehkreis- oder Zig-Zag-Manöver wurden bei verschiede-

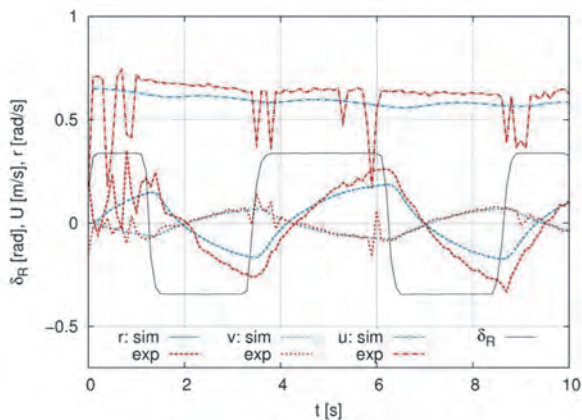


Abbildung 5.9: Vergleich simulierter und getesteter Zig-Zag-Manöver für $dr = 20$ und $Fn = 0.2$.

nen Ruderwinkeln und Geschwindigkeiten gefahren. Auf Basis dieser Daten wurden Koeffizienten des empirischen Modells korrigiert, um eine deckungsgleiche Bewegung zwischen Simulation und Modellversuch zu erreichen. In Abbildung 5.9. ist der Vergleich von einem simuliertem und einem getestem Zig-Zag-Manöver zu sehen.

CFD-Berechnungen

Zwei verschiedene Arten von CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics) wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt. Einerseits eine time-domain Simulation des Rettungsfahrzeug im irregulären Seegang in sechs Freiheitsgraden, siehe [Ha2010]. Der zweite Ansatz ist die quasistatische Simulation von Driften und Gieren. Dabei wird das Rettungsboot vor der eigentlichen Simulation in verschiedenen Driftwinkeln und Drehraten berechnet, aus diesen Daten wird dann ein Abkowitz-Modell erstellt. Dieses Modell kann dann in MANIS anstatt der empirischen Berechnung für hydrodynamische Kräfte und Momente benutzt werden. Der Vorteil gegenüber den empirischen Methoden ist, dass die genaue Schiffsgeometrie in der Berechnung berücksichtigt wird, während die empirischen Ansätze nur einige geometrische Parameter mit berücksichtigt. Die CFD-Berechnung von Katamaranen in statischer Drift ist mit einer Reihe von Modellversuchen in Kooperation mit der Seoul National University (SNU) in Südkorea validiert worden, siehe [Ha2011]. Die Versuche wurden bei moderaten Froude Zahlen durchgeführt und in der Berechnung ist die freie Wasseroberfläche und deren Effekt auf die Querkraft mit berücksichtigt worden, siehe Abbildung 5.10.

Der große Vorteil der zweiten Methode ist, dass die time-domain Simulation in real-time stattfindet und somit eine Vielzahl von Berechnungen zeiteffizient durchgeführt werden kann.

Schnittstelle zur Schiffsregelung

Um die speziell in diesem Projekt entwickelten Regelungsalgorithmen zur Schiffssteuerung mit der vorgestellten Simulation zu testen, wurde eine UDP-Schnittstelle (User Datagram Protocol) implementiert. Das Simulationstool MANIS bietet dadurch eine Virtual Reality

Umgebung für die Schiffsregelung unter Berücksichtigung der verunfallten Person und von Umweltbedingungen wie Seegang. Berechnungen der Schiffsbewegung und der Schiffssteuerung können somit unabhängig von Soft- und Hardwarepräferenzen durchgeführt werden. Über dieses Protokoll werden Simulation und Steuerung miteinander synchronisiert.

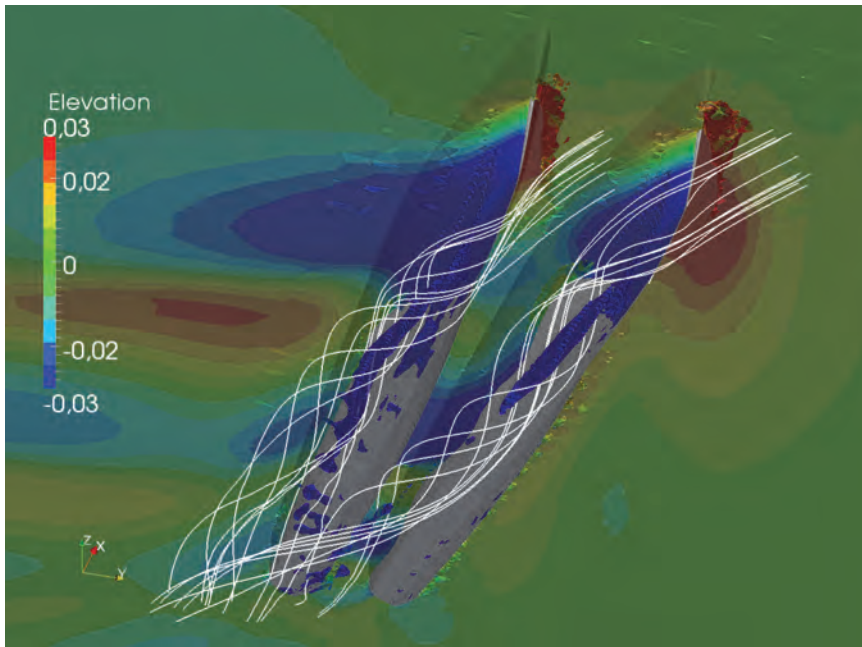


Abbildung 5.10: Simulation eines NPL Katamaran in statischer Drift bei moderaten Froude Zahlen unter Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche.

5.4 Bau und Ausrüstung der Großausführung

Die Großausführung wurde von der Firma Ostwald Composite Technology gebaut. Strukturelemente, wie Spanten und Decks, bestehen aus Bootsbau-spertholz mit 15 mm Stärke, da dieses Material leicht und dennoch sehr stabil ist. Die Außenhaut ist in Sandwich-Bauweise ausgeführt. Ein hochfester Schaum bildet das Kernmaterial, während mehrere Laminatschichten, innen wie außen, für die notwendige Festigkeit sorgen. Durch diese aufwendige Bauweise konnte eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht erzielt werden. Bereits während des Baus wurden im Bugbereich 110 kg Festballast in Form von Eisenschrot eingebracht, um den korrekten Gewichtsschwerpunkt sicherzustellen.

Die Ausrüstung des Rumpfs erfolgte anschließend in zwei Etappen an der Technischen Universität Berlin und in der Universität Rostock. Im ersten Schritt wurden die elektrischen Pod-Antriebe, die Personenaufnahmeeinheit sowie die komplette Energieversorgung installiert. Diese besteht aus zwei unabhängigen Systemen für die Hauptantriebe (48 V) und die elektrischen Verbraucher (24 V). Für die Versorgung der Hauptantriebe sind Lithium-Akkus verbaut, die derzeit die höchste Leistungsdichte aufweisen und den Antrieben unter Vollast ca. 80 Minuten Laufzeit ermöglichen. Die übrigen elekt-

rischen Verbraucher können sogar 10 Stunden lang betrieben werden. Ferner wurde die Steuerungselektronik für die Pod-Antriebe, die Rudermaschinen und die Korbverstellung sowie die Messtechnik eingebaut. Die zweite Etappe der Ausrüstung umfasste die Systeme der autonomen Navigation, der Kommunikationstechnik sowie die Kameraausrüstung mit Wärmebild- und Tageslichtkameras. Allein drei redundante Antennensysteme verschiedener Frequenzen sollen die Datenübertragung sicherstellen.

Auf Grund diverser Verzögerungen konnten die Versuche mit der Großausführung nicht im vollen Umfang abgeschlossen werden. Die ersten Tests zeigen aber das enorme Potential der Neuentwicklung. Die Steuerung funktioniert selbst ohne Rudermaschinen ausgezeichnet. Bereits mit 50% Leistung werden die im Pflichtenheft geforderten 5 kn erreicht. Unter Volllast wird die Rumpfgeschwindigkeit problemlos überschritten. Mit den derzeit installierten Propellern erreicht das Boot dann 7,5 kn. Propeller größerer Steigung wären zwar verfügbar, können aber nicht mehr innerhalb dieses Projekts getestet werden.

Der von der Technischen Universität entwickelte Rettungskorb verfügt über einen hydraulischen Drehantrieb mit einem Drehmoment von 6000 Nm. Ein Hydraulikaggregat versorgt diesen mit bis zu 200 bar Druck. Die Struktur des Korbs besteht aus Aluminium-Vierkantrohren, die miteinander verschweißt wurden. Diese Bauweise ist erheblich einfacher zu fertigen als ein Kunststoffkorb und, wenn überhaupt, nur unwesentlich schwerer. Ein Großteil der Alu-



Abbildung 5.11: Großausführung (Länge: 4,5 m, Breite: 2,3 m, Rettungsbreite: 1,5 m, Tiefgang 0,5 m, Gewicht 1050 kg)

miniumprofile wurde mit Schaumstoff gepolstert, um eventuelle Stöße der Person zu dämpfen. Das 5 mm starke Sicherheitsnetz mit 50 mm Maschenweite dient als Auffangmaterial für die zu rettende Person. Diese kann nach einer erfolgreichen Rettung mit der entnehmbaren Trage aus dem Fahrzeug gehoben werden.

5.5 Automatisierung des Rettungsfahrzeuges

Das Rettungsfahrzeug muss nach dem Aussetzen durch das Mutterschiff den Verunfallten selbsttätig auffinden und sich in eine günstige Bergeposition bewegen. Dabei ist die Automation des Rettungsfahrzeugs von entscheidender Bedeutung. Nicht nur die verwendeten Sensoren mussten zu einem Navigationssystem integriert werden, sondern ebenso waren die Antriebsorgane in ein komplexes Steuerungssystem einzubinden. Die zentrale Recheneinheit bildet dabei der Navigationsrechner auf Grundlage eines PC/104 Systems, welches mit zusätzlichen Schnittstellenkarten zur Anbindung der nötigen Sensoren und von weiteren Geräten ausgestattet wurde.

Innerhalb des Rettungsfahrzeuges wurde zudem ein Ethernet-Netzwerk etabliert, welches die verschiedensten Geräte miteinander verbindet. Die entwickelten Steuerungen und Regelungen zum Betrieb des Fahrzeuges sind als Software-Routinen auf dem Navigationsrechner untergebracht. Dazu wird das Echtzeitbetriebssystem xPC-Target der Firma Mathworks verwendet, das kompatibel zu MATLAB/Simulink ist. Folgende übergeordneten Steuermodi sind dabei möglich:

- Handsteuerung
- Joysticksteuerung Drehrate
- Joysticksteuerung Heading
- CTS-Steuerung
- Bahnregelbetrieb.

Die Sollwerte der verschiedenen Betriebsmodi werden aus Sicherheitsgründen redundant über verschiedene Funkstrecken an das Rettungsfahrzeug übertragen. Zur Ansteuerung der Antriebe kommuniziert der Navigationsrechner per Ethernet mit einer Steuerbaugruppe, welche die eigentliche Ansteuerung der Antriebe auf Feldebene übernimmt.

5.6 Datenübertragung zwischen POB, Rettungsfahrzeug und Mutterschiff

Die Kommunikation über Luftschnittstellen (Funkverbindung) lässt sich grob in die Bereiche

- Steuerungs- sowie Aktordaten
- Vitaldaten
- Video- und Audiodaten
- AIS Daten

unterteilen. Abbildung 5.12 veranschaulicht den schematischen Aufbau der Kommunikationswege, die zwischen der POB, dem Rettungsfahrzeug und der SAR-Steuerstation bestehen. Die Bereiche POB, Rettungsfahrzeug sowie SAR-Steuerstation sind durch schwarze Stiche getrennt. Zwischen diesen ist die Kommunikation nur über Luftschnittstellen möglich.

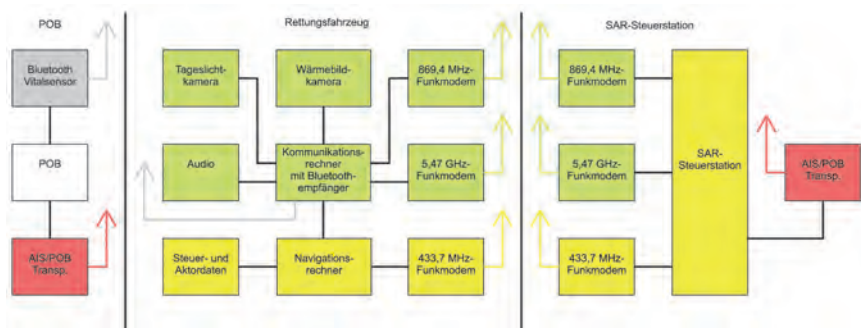


Abbildung 5.12: Schematischer Aufbau der Kommunikationswege

Die gelb dargestellten Elemente sind die Steuerungs- und Aktordaten, sie werden über die 433,7 MHz-Funkmodems übertragen.

Die Vitaldaten sind in der Abbildung grau dargestellt. Zur Übertragung der Vitaldaten verfügt das verwendete Sensormodul über eine Bluetooth-Schnittstelle, die dem Rettungsfahrzeug den kabellosen Abruf der Daten ermöglicht.

Die grünen Elemente beinhalten die Audio- sowie die Videodaten. Des Weiteren werden die Vitaldaten vom Kommunikationsrechner empfangen. Alle diese Daten werden über die 869,4 MHz-Funkmodems bzw. über die 5,47 GHz-Funkmodems übertragen. Speziell für den Bergungsvorgang der POB

gilt es folgende Aufgaben zu lösen. Es sollen in Echtzeit Video-, Audio-, Vital- sowie Steuerungsdaten übertragen werden. Die Schwierigkeit hierbei ist der Datenverlust, der während der Funkübertragung nicht ausgeschlossen werden kann. Daher liegt das Bestreben darin, die Funkmodems gegen Verluste oder sogar gegen einen totalen Ausfall so resistent wie möglich zu gestalten. Um dies umzusetzen, wurde eine zweifach redundante Funkübertragung aufgebaut. Die beiden verwendeten Funksysteme unterscheiden sich wesentlich in den Frequenzbändern, Datenraten und Reichweiten. Die Idee, die sich hinter der Übertragung der Daten über zwei verschiedenen Funkmodems verbirgt, besteht darin, dass die wichtigsten Daten redundant übertragen werden. Somit wird die Ausfallwahrscheinlichkeit der Datenübertragung verringert. Die beiden Funkmodems, die zum Einsatz kommen, sind ein Short-Range-Device- (SRD-) Funkmodem (869,4 MHz) und ein Worldwide-Interoperability-for-Microwave-Access- (WiMAX-) Funkmodem (5,47 GHz). Zu erwähnen ist, dass das SRD-Funkmodem für Distanzen bis 5 km vorgesehen ist und eine maximale Datenrate von 196 kbit/s zulässt und das WiMAX-Funkmodem für Distanzen bis 2 km vorgesehen ist und eine maximale Datenrate von 1,5 Mbit/s zulässt. Um die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen über der Wasseroberfläche zu beschreiben, wurde das Two-Ray-Model herangezogen. Zum einen kann das Model in der Software in the Loop eingesetzt werden und zum anderem können damit Reichweiten der Funkübertragung abgeschätzt und Ausbreitungsphänomene erklärt werden. In Abbildung 5.13 sind das Two Ray Model und die Received Signal Strength Indication (RSSI) Messwerte dargestellt.

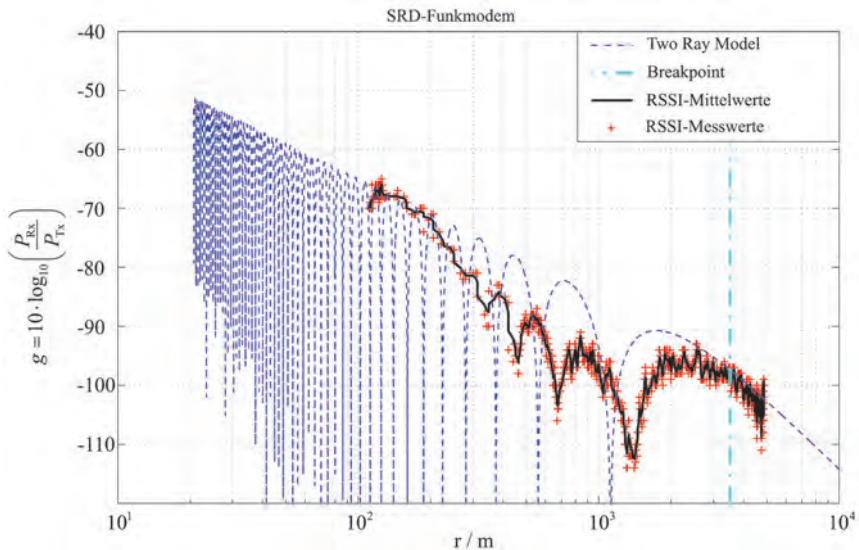


Abbildung 5.13: Two Ray Model und RSSI-Messwerte

Im Diagramm wird der Kanalgewinn über die Distanz dargestellt. Die roten Markierungen sind die RSSI-Messwerte des SRD-Funkmodems, die schwarze Linie ist der Mittelwert der RSSI-Messwerte und die blau gestichelte Kurve stellt den theoretischen Verlauf des Two Ray Models für dieses Szenario dar. Zu erkennen ist, dass die RSSI-Messwerte an der theoretischen Kurve verlaufen. Dadurch ergibt sich der Schluss, dass das Model näherungsweise für das Verhalten der Wellenausbreitung angewandt werden kann.

Eine weitere Herausforderung sind die Übertragungsreichweiten der Funkmodems. Um die oben geforderten Reichweiten von 5 km zu erreichen, wurden im Laufe des Projektes Richtantennen für das SRD- und WiMAX-Funkmodem angeschafft. Mit diesen ist es möglich, die Reichweiten der Funkübertragung zu erhöhen, da die Sendeleistung durch die Richtantennen in eine Vorzugsrichtung abgestrahlt wird. Die Richtantennen wurden im Verbund aufgebaut, so dass immer ein 90°-Sektor bestrahlt wird. Durch das Umschalten auf eine andere Antenne wird der zu bestrahlende Sektor gewechselt. Somit wird sichergestellt, dass das Rettungsfahrzeug sich immer in der Vorzugsrichtung einer Richtantenne befindet. Spätere Reichweitentests, die unter Realbedingungen durchgeführt wurden, zeigten, dass Reichweiten bis zu 7 km für beide Funksysteme möglich sind. In Abbildung 5.14 ist der Sendemast mit Sektorantennen auf einer Scandline-Fähre abgebildet, dieser empfängt die Videodaten vom Rettungsfahrzeug.



*Abbildung 5.14:
Sendemast mit Sektorantennen*

Das Datenaufkommen soll so gering wie möglich gehalten werden. Um das umzusetzen, werden zum einen die Video- und Audiodaten effektiv komprimiert und zum anderen werden Daten nur auf Bedarf übertragen, wie es bei einigen Vitaldaten der Fall ist. Auf dem Rettungsfahrzeug befinden sich zwei Videokameras sowie eine Wärmebildkamera, die für die Navigation eingesetzt wird und mit deren Hilfe die POB im Wasser gesucht sowie angesteuert wird. Der Vorteil der Wärmebildkamera ist, dass Wärmedifferenzen gut wahrgenommen werden können. Solche Wärmedifferenzen sind deutlich zwischen POB und Wassertemperatur zu beobachten. Die zweite Kamera, eine Tag- und Nachtkamera, befindet sich zwischen den Rümpfen des Rettungsfahrzeuges und soll für die Bergung und für die Beobachtung der POB nach der Bergung eingesetzt werden. Für die Digitalisierung der beiden Videostreams steht ein 2-Kanal-Framegrabber zur Verfügung, der in einem PC/104-System integriert ist. Dieser erzeugt zwei Videostreams. Für die Komprimierung der Videos wurde ein Videoencoder, der auf dem H264-Codec basiert, entwickelt. Dieser wurde speziell für geringes Datenratenaufkommen, Echtzeitfähigkeit und auf hohe Ausfallsicherheit optimiert. Zwei unterschiedlich eingestellte Videoencoder erzeugen zwei vom Videoinhalt gleiche Videostreams, die sich aber in der Videoqualität stark unterscheiden. Grund für diese Vorgehensweise sind die unterschiedlichen Datenraten der beiden Funksysteme. Bei dem Video mit geringerer Videoqualität, das über das SRD-Funkmodem übertragen wird, wurde darauf geachtet, dass die essentielle Information des Videos nicht verlorengeht. Die variablen Parameter des Videoencoders sind dabei die Auflösung, die Komprimierung, die Bitrate sowie die Bildwiederholung des Videos. Eine Maßnahme zur Erhöhung der Ausfallsicherheit der Videoübertragung ist die Unterteilung jedes Videobildes in einzelne Slices. Ein Slice ist dabei der Inhalt eines Ethernetdatenpaketes. Der Vorteil der Slices ist, dass ein Verlust eines einzelnen Slice-Datenpaketes nicht zum Verlust des ganzen Bildes führt. Weiterhin kann die Datenpaketgröße über die Größe eines Slices variabel eingestellt werden. Diese Eigenschaft wirkt sich positiv auf die Übertragung von Videoinhalten über Funkkanäle aus. In Abbildung 5.15 sind zwei Standbilder nach der Funkübertragung dargestellt.

Auf der linken Abbildung ist ein Standbild der Wärmebildkamera, die auf dem Dach des Rettungsfahrzeuges montiert ist, dargestellt. Es zeigt eine im Wasser treibende POB. Die rechte Abbildung zeigt ein Standbild der Tageslichtkamera, die zwischen den Rümpfen des Rettungsfahrzeuges installiert ist. Auf dem Standbild ist ein angesteuertes Testobjekt zu erkennen.

Zu Erhöhung der Zuverlässigkeit werden die Steuerungs- und Aktordaten dreifach redundant übertragen. Die Daten, die in den Geräten des Institutes für Automatisierungstechnik auflaufen, sollen über das ISM-Funkmodem (433,7 MHz), das SRD- und WiMAX-Funkmodem übertragen werden. Darüber hinaus kann hierdurch die Verzögerungszeit der Übertragung verringert werden.

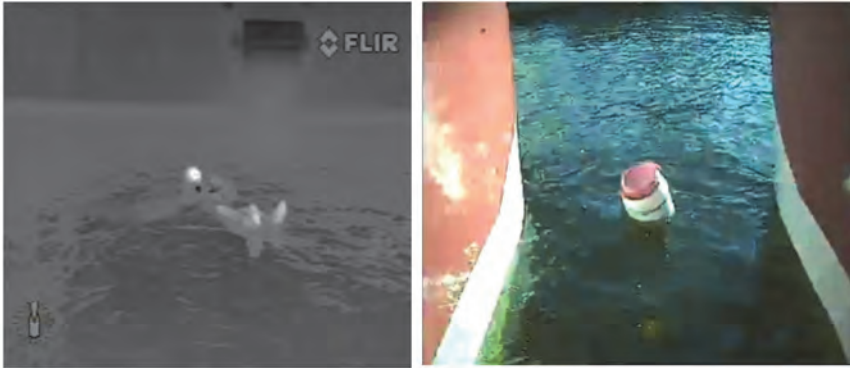


Abbildung 5.15: Links; Standbild der Wärmebildkamera mit POB, Rechts; Standbild der Tageslichtkamera mit Testobjekt

Die ISV-Daten beinhalten die Positionsdaten der POB, die von einem AIS-Transponder ermittelt und übertragen werden, wie bereits im Kapitel der Rettungsweste beschrieben wurde.

5.7 Navigation des Rettungsfahrzeuges

Eine der schwierigsten Aufgaben innerhalb des SAR-Prozesses ist die autonome Ansteuerung des Verunfallten durch das Rettungsfahrzeug. Der gesamte Ansteuerprozess stellt sich als sehr zeitkritisch dar und wird durch unterschiedliche Abschnitte gekennzeichnet. Die eigentliche Ansteuerung im freien Seeraum kann durch unterlagerte Heading- (Richtungs-) und überlagerte Bahn- (Abstands-) Regelungen erfolgen, vergleiche [Be2010]. Eine Besonderheit bildet hier die on-line-Anpassung des Endpunktes auf Grund des möglichen Verdriftens der POB. Nachdem das Rettungsfahrzeug einen bestimmten Abstand zur POB erreicht hat, stoppt es auf und behält diesen Abstand bei, ohne die POB zu gefährden, bis der manuelle Rettungsvorgang eingeleitet wird. Diese Operationen können mit herkömmlichen kaskadierten Bahnführungssystemen nicht verwirklicht werden, da hierfür spezielle Algorithmen notwendig sind [Ko2009]. Beispielsweise müssen Antriebsenergien der Vorwärtsrichtung auch für die Richtungssteuerung eingesetzt werden. Auch besitzen die für einen Reglerentwurf verwendeten Modelle einen komplexeren Charakter. In diesem Zusammenhang wurden innerhalb des Projektes Lösungen entwickelt, um diese unterschiedlichen Regelungsstrategien zu harmonisieren und für den Betrieb in einem autonomen Rettungsfahrzeug zu optimieren [Ku2011].

6 Systemkomponenten auf dem Mutterschiff

6.1 SAR-Steuerstation

Einordnung in den Schiffsführungsprozess

Die SAR-Steuerstation dient zur Darstellung, Steuerung und Überwachung des SAR-Prozesses. Die SAR-Steuerstation ist auf der Kommandobrücke als separater Steuerstand installiert. Sie besteht aus einem PC mit 20" Display und einer Tastatur- und Mausbedienung.

Die SAR-Steuerstation verfügt über mehrere Datenschnittstellen, die es ermöglichen, die SAR-Steuerstation in den Brückenprozess und den Rettungsprozess zu integrieren. Folgende Geräte können an die SAR-Steuerstation angeschlossen werden:

- Schiffsradaranlage
 - ▶ Daten für den Eigenschiffsvektor (Kurs Geschwindigkeit)
 - ▶ Geographische Position des Eigenschiffs (Geographische Länge und Breite)
- AIS-Transponder
 - ▶ Geographische Position von Fremdschiffen im Empfangsbereich des Transponders
 - ▶ Geographische Position des Verunfallten nur bei einer Auslösung durch Salzwassereinfluss
- Funkmodem 433,7 MHz zum Rettungsfahrzeug
 - ▶ Solldaten für die Steuerung des Rettungsfahrzeuges (RF)
 - ▷ Steuerung des Rettungsfahrzeuges
 - ▷ Steuerung der Aufnahmevorrichtung im RF für den POB
 - ▶ Istdaten vom Rettungsfahrzeug
 - ▷ Geographische Position des Rettungsfahrzeuges
 - ▷ Wassertiefe
 - ▷ Heading
 - ▷ Geschwindigkeit
 - ▷ Wassertemperatur
 - ▷ Istdaten der Antriebe

- ▷ Batterieüberwachung
 - ▷ Istdaten der Aufnahmevorrichtung
 - ▷ Statussignale
- Mobiles dezentrales Fernbedienungsmodul zur Handsteuerung des Rettungsfahrzeuges bei optischer Sicht über eine Funkverbindung
 - 869,4 MHz-Funkmodem zur Übertragung von Vitaldaten der POB
 - 5,47 GHz-Funkmodem zur Übertragung von Video- und Audiodaten vom Rettungsfahrzeug

Prozessdarstellung

Die Prozessdarstellung des SAR-Prozesses erfolgt in Echtzeit in einer elektronischen Seekarte (ECDIS), siehe Abbildung 6.1. Dazu befindet sich im linken Teil des Displays ein quadratisches Fenster, in dem alle relevanten Daten vom Prozess in grafischer bzw. numerischer Form in Echtzeit angezeigt werden. Die einzelnen Objekte (Fahrzeuge und POB) werden als Geschwindigkeitsvektoren in einer Zentralprojektion mit dem Eigenschiff im Mittelpunkt angezeigt. Alternativ kann auf das Rettungsfahrzeug oder den Verunfallten umgeschaltet werden. Es besteht die Möglichkeit, zwischen Absolut- und Relativ-Vektoren umzuschalten. Das Rettungsfahrzeug und der Verunfallte werden nur dargestellt, wenn sie sich außerhalb der Schiffskontur des Eigenschiffs befinden.

Im rechten Teil der Anwendung ist ein Rollbalkenmenü angeordnet. Durch dieses können verschiedene zusätzliche Seiten für die Bedienung und Anzeige aufgeblättert werden. Bei der Entwicklung der Bedienoberfläche wurde darauf geachtet, dass es zu keinen verschachtelten Untermenüs kommt, die die Orientierung in der Bedienoberfläche erschweren würden.

An der Oberseite des Displays befindet sich eine durchgehende Leiste, die, getrennt nach Eigenschiff, Rettungsfahrzeug und Verunfalltem, die wichtigsten Daten als permanente Anzeige darstellt. In der Anzeige für den Verunfallten können, nach Aufnahme durch das Rettungsfahrzeug, die wichtigsten Vitaldaten in numerischer und grafischer Form dargestellt werden, inklusive der Vitaldaten (z.B. EKG Daten).

An der Unterseite des Displays befindet sich eine Menüleiste, die die Steuerung der ECDIS erlaubt, u.a. Messbereichsauswahl, Entfernungsmessung mit dynamischen Rulern, Tag- Nacht-Darstellung der ECDIS, Cursor für die geographische Position, usw.

Durch ein zusätzliches Display werden die Kamerabilder der installierten Kameras vom Rettungsfahrzeug angezeigt.



Abbildung 6.1: Darstellung des SAR-Prozesses

Fernsteuerung des Rettungsfahrzeuges

Für die Steuerung des Rettungsfahrzeuges bestehen zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Entweder erfolgt eine Steuerung von der SAR-Steuerstation oder durch das mobile dezentrale Fernbedienungsmodul (MDF). Das MDF ist ein tragbares Bediengerät, das bei einer Sichtverbindung zum Rettungsfahrzeug zum Einsatz kommt. Es ermöglicht eine Handsteuerung des Rettungsfahrzeuges mit unterschiedlichen Handsteuermodi. Die Bedienung erfolgt über ein berührungsempfindliches Display und zwei Joysticks. Abbildung 6.2 zeigt das MDF.



Abbildung 6.2: MDF

6.2 SAR-Brückensystem

Das SAR-Brückensystem als Komponente befindet sich auf der Schiffsbrücke und besteht im Wesentlichen aus SAR-Bildschirm und Rechner-Einheit, die gefilterte Daten von der SAR-Steuerstation übernimmt. Es soll als Entscheidungshilfe für die wachhabende Besatzung dienen und beinhaltet das Modul ECDIS-ROUTE-MONITORING mit integrierten AIS-Daten weiterer SAR-Einheiten (wenn eingesetzt) und den Positions- und Trackingdaten der POB und des Rettungsfahrzeuges.

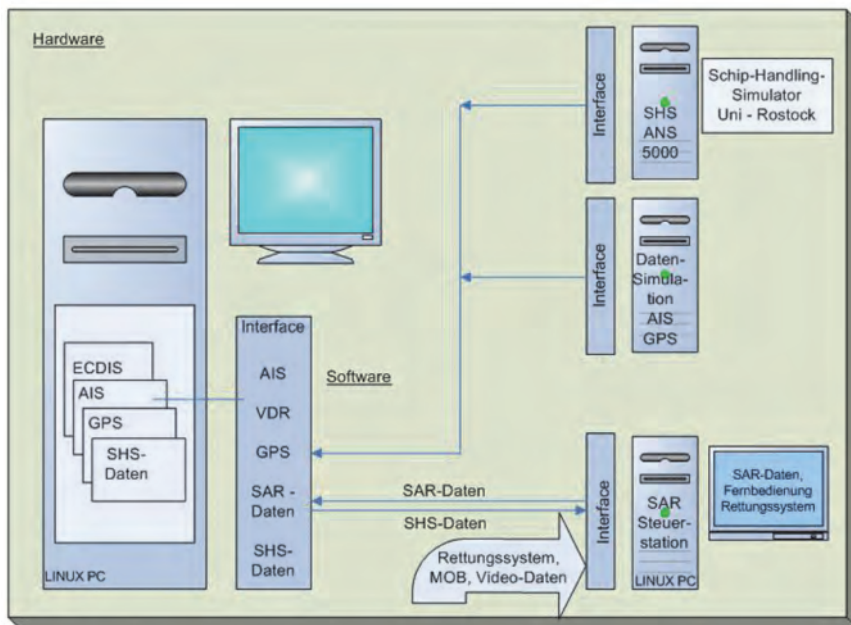


Abbildung 6.3: Übersicht Funktionsweise Brückensystem

6.3 Aussetz- und Aufnahmeeinrichtung

Anforderungen und Schnittstellen zum SAR-Prozess

Um die Kette des autonomen Rettungsprozesses zu schließen, soll auch das Ausbringen und Aufnehmen des Rettungsfahrzeuges (RF) möglichst autonom erfolgen. An die Ausbring- und Aufnahmeeinrichtungen sind im Rahmen des SAR-Prozesses besondere Anforderungen zu stellen.

Die Ausbringeinrichtung muss jederzeit einsatzbereit sein. Nach dem Auslösen des Alarms muss das Rettungsfahrzeug schnellstmöglich und sicher ins Wasser gebracht werden. Die Zeit bis zur manövrierfähigen Einsatzbereitschaft soll so gering wie möglich gehalten werden.

Für den Aufnahmevorgang muss ohne manuelle Hilfe zwischen dem Schiff und dem Rettungsfahrzeug eine Verbindung hergestellt werden, um dann das Fahrzeug sicher und möglichst waagrecht ohne große Beschleunigungen an Bord zu holen. Die Positionierung an Deck soll ein schnelles und sicheres Entnehmen und Behandeln der geretteten Person gewährleisten. Das Rettungsfahrzeug muss dann wieder in den Ausgangszustand gebracht werden, um jederzeit wieder einsatzfähig zu sein.

Besondere Anforderungen an die Ausbring- und Aufnahmeeinrichtung (AAE) sind neben dem autonomen Betrieb, der besonders schnelle Vorgang und die nötige Einsatzbereitschaft bei jedem Wetter und Seegang. Der Vorgang soll eine Höhe von über 5 m überwinden können und das Ausbringen muss bei sämtlichen Schiffsgeschwindigkeiten möglich sein.

Ausbring- und Aufnahmesysteme

Als Lösung für den Aussetzvorgang, kann nur eine Freifalleinrichtung die wichtigsten Anforderungen erfüllen. Der Freifall ermöglicht die Forderung das RF innerhalb von 30 Sekunden nach dem Alarm bei beliebiger Schiffsgeschwindigkeit und beliebigen Kurs einsatzbereit im Wasser zu haben.

Die Rampe der Freifalleinrichtung muss so ausgerichtet sein, dass das RF vom Schiff weg und in seitlicher bis achterlicher Richtung fällt, sie muss aber nicht am Heck angebracht sein. Ein Signal der Steuerstation entriegelt das Fahrzeug, so dass dieses hinabgleiten wird. Die Strom- und Datenverbindungen zwischen Schiff und RF sind ebenfalls in diesem Riegel angebracht, so wie es von üblichen Rettungsbootfreifalleinrichtungen auf Handelsschiffen bekannt ist.

Die Schwierigkeit bei der Aufnahme des RFs besteht darin, die Kopplung zwischen RF und einem Kran auf dem Schiff autonom und bei schlechten Bedingungen herzustellen. Dafür wurden zwei unterschiedliche Systeme entwickelt, die je nach Bedarf und Schiffstyp eingesetzt werden können.

In beiden Varianten kann ein üblicher Bordkran mit Seegangsfolgeeinrichtung verwendet werden, der mit einem speziellen System zur Kopplung zwischen Kranseil und RF ergänzt wird. Diese sind so entwickelt worden, dass eine Kopplung einfach und ohne manuelle Hilfe, schnell und sicher auch bei starkem Seegang möglich ist.

Kranen des Rettungsbootes mit einem Hebering mit Seilzuführung

Die erste Variante verfolgt die Idee, mit Hilfe einer Fangeinrichtung für das Kranseil das RF an Bord des Aufnahmeschiffes zu heben. Die detaillierte Ausarbeitung erfolgte als Unterauftrag durch MARlinX Ing.-GmbH, Hamburg.

Am Deck des RFs ist ein verstellbarer Rahmen mit Hebering angebracht, siehe Abbildung 6.4. In der Position 1 liegt die Aufnahmeeinrichtung gestützt auf einer Rohrhalterung und der Seilzuführung waagrecht auf dem Rettungsboot auf. In dieser Position verbleibt der Rahmen zur Lagerung sowie zur Fahrt auf See.

Zur Aufnahme des Rettungsbootes wird das Kranseil mit einem montierten Kugeladapter vom Aufnahmeschiff herabgelassen. Bei einer Geschwindigkeit von 2 Knoten wird der Haken mit dem Kugeladapter ca. 1 bis 5 m unter der Wasseroberfläche neben dem Schiff geschleppt. Eine Seilzuführung am RF führt das Kranseil beim Heranfahren zum Hebering, der am Rahmen befestigt ist. Durch die Bewegung des Seils wird der Hebering verriegelt. Ist die Verbindung geschlossen, wird das Kranseil aufgeholt, wobei der Kugeladapter sich in die dafür vorgesehene kugelförmige Aussparung im Hebering formschlüssig einpasst. Ein Vorleinenausleger sollte am Kugeladapter angebracht sein, um die Pendelbewegungen beim Aufholvorgang zu reduzieren. Die Halterung erfolgt über zwei Lagerböcke mit einem V-förmigen Hebearm. Der Hebearm dreht über die Lagerböcke um 80° in die Position 2, siehe Bild 6.4. In dieser Position wird der Hebering durch zwei Tragseile nach vorne abgefangen und das RF an Bord des Schiffes gehoben.

Nach der Versorgung der geretteten POB, muss das RF mittels Krans wieder in die Freifallvorrichtung an Bord gehoben werden.

Aufnehmen des RFs mit einem REBUS-Dock-System

Als eine alternative Variante wurde von MSS Safety Systems AB, Mariehamn, Finland, ein Dock-System entwickelt und an die Anforderungen angepasst. In diesem System wird das RF in einer Andockeinheit untergebracht und an Bord betriebsbereit angeordnet. Dieses System ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Der vordere Teil der Andockeinheit kann wie ein Visier hochgeklappt werden, so dass das RF nach Auslösen des SAR-Prozesses aus dieser Andockeinheit mittels Freifall zu Wasser gelassen wird. Das RF wird auf zwei horizontalen Schienen gelagert, deren Oberflächen gleitend sind. Hat es die Andockeinheit verlassen, wird das Visier geschlossen und verriegelt, damit das System dann zur Aufnahme des RFs mittels Bordkran ins Wasser

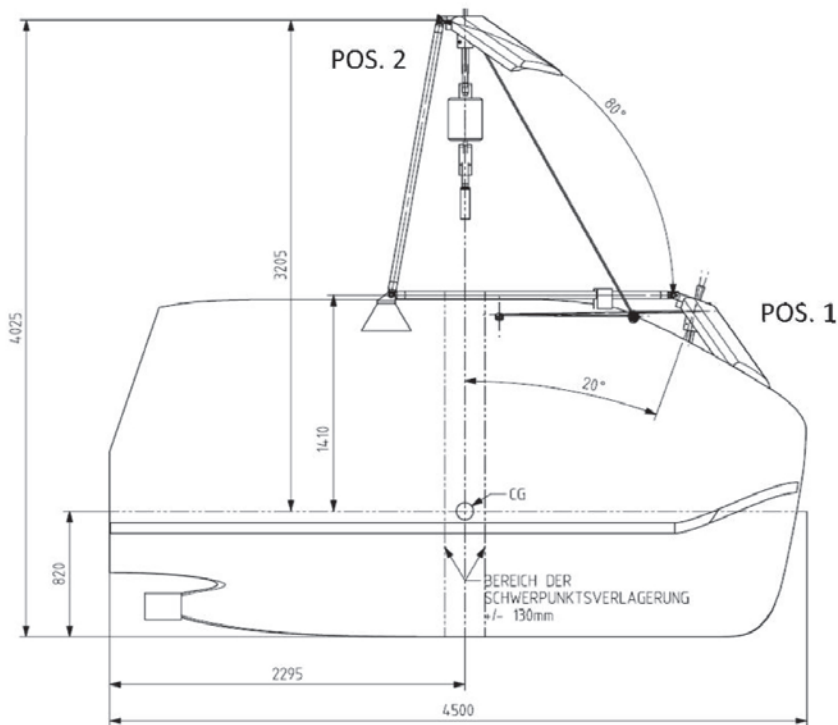


Abbildung 6.4: Hebering mit Seilzuführung am Rettungsfahrzeug

gelassen werden kann. Eine Seegangsfolgeeinheit ist an dem Kran dringend erforderlich, damit die Andockeinheit nicht ungewollt aus dem Wasser gehoben wird.

Zum Aufnehmen soll das RF bei geringer Voraussfahrt in das Dock gesteuert werden. Eine seitlich Führung am hinteren Ende der Andockeinheit leitet es hinein. Durch das geschlossene Visier wird das RF gestoppt und zwei Bremsklappen im Andocksystem werden aktiviert, damit das RF gegen Herausgleiten nach Achtern gesichert ist. An der Traverse des Visiers ist über einen Hahnepot ein Vorleinausleger befestigt, der zum Führen des Systems beim Aufholvorgang dient, um zu starke Schwingungen in Längsrichtung zu verhindern. Wie auch die Bedienung des Krans, geschieht dies manuell. Eine weitere Beiholerleine an der Seite des Andocksystems könnte auch vor zu starken Schwingungen in Querrichtung schützen.

Zur Versorgung der geretteten Person muss das System erst an Deck abgestellt werden, bevor es wieder in Freifallposition gebracht werden kann und für einen nächsten Einsatz bereit ist.

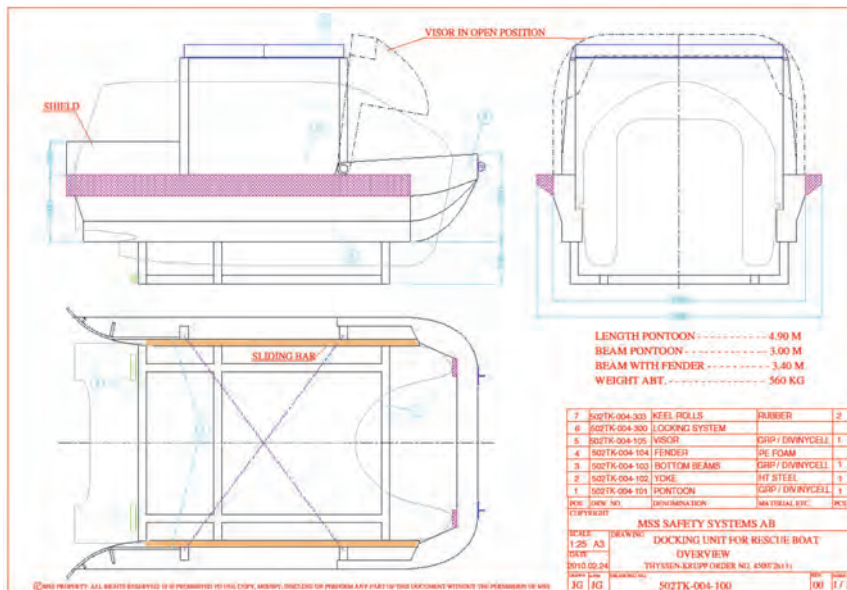


Abbildung 6.5: REBUS-Dock-System für das Rettungsfahrzeug

Vorhersage des dynamischen Verhaltens

Um die Einsatzbereitschaft verschiedener Anordnungen von Ausbring- und Aufnahmeeinheiten bewerten zu können, wurde ein Standardvorgehen zur Simulationen des dynamischen Verhaltens entwickelt und an einem Beispielschiff durchgeführt. Nach der Betrachtung unterschiedlicher Schiffstypen, unter anderem auch eines Doppelrumpfschiffs vom SWATH Typ (Small Water Plan Twin Hull) wurde ein Hochseepatrouillenboot (OPV - Offshore Patrol Vessel) von 84 Metern Länge und einer Verdrängung von 1860 t als mögliche Plattform für dieses Rettungssystem ausgewählt.

Zur Abschätzung der Schiffsbewegung in unterschiedlichen Seegängen wird der Programmcode PDStrip [Sö2007], der auf der linearen Streifentheorie basiert, genutzt. Die Bewegungsgrößen können an verschiedenen signifikanten Punkten berechnet werden und zur Abschätzung der Durchführbarkeit des Aufnahmeverganges dienen. Die Relativbewegungen zwischen Wellen und Schiff geben Aufschluss über die zu überwindenden Bewegungsunterschiede zum RF. Zusätzlich werden die Pendelbewegungen des RFs beim Aufholvorgang berechnet. Es werden die in dem 'Standardization Agreement (STANAG) No 4154' [NATO2000] definierten Seegänge verwendet.

North Sea STANAG 4194			
Sea state number	4	5	6
Mean wind speed [kn]	19	24.5	37.5
H1/3 [m]	1.88	3.25	5
T0 [s] (modal/peak)	7.1	8.6	10.2

Tabelle 6.1: Sea states North Sea (STANAG 4194)

Aus den Berechnungen mit der linearen Streifentheorie wird deutlich, dass zugunsten des Bewegungs- und Manövrierhaltens eine Vorausfahrt von mindestens 2 kn zur Aufnahme des RFs nötig ist, da sonst zu starke Rollwinkel auftreten. Auch dass eine Anordnung möglichst im hinteren Mittel des Schiffes auf der Leeseite angestrebt werden sollte, wird durch die Ergebnisse bestätigt.

Beispielrechnungen zeigen, dass beim Einrumpfschiff Roll- und Stampfbewegungen im Vordergrund stehen, während beim SWATH Tauch- und Stampfbewegungen von größerer Bedeutung sind.

Wird das RF an der Entwurfsposition eines RHIB auf ein Drittel der Schiffslänge von hinten angeordnet, sind Aufnahmevorgänge bei geringer Vorausfahrt und Seegang schräg von vorn auf der Leeseite bis zur Seegangsstärke 6 möglich. Die maximalen relativen Tauchbewegungen betragen um 1 m, in Querrichtung 0,5 m und in Längsrichtung 1,3 m.

Die pendelnde Masse von 1,29 t beim Aufholvorgang hat keinen Einfluss auf die Schiffsbewegungen. Die Pendelbewegungen hingegen können abhängig von der Höhe des Kranaufnahmepunktes und der Länge des Kranseils kritisch groß werden. Eine manuelle Führung durch einen Vorleinenausleger ist also zwingend erforderlich.

7 Erprobung und Ergebnisse

Bei ersten Versuchen im Glattwasser gelang die Rettung einer Testperson problemlos und konnte beliebig wiederholt werden. Das Grundkonzept des Systems ließ sich so bestätigen. Probleme bereiten derzeit noch Verzögerungen der Kamerabilder und innerhalb der Antriebssteuerung. Zwar wurden mehrere erfolgreiche Anfahrten nach Kamerasicht durchgeführt, aber die Kontrolle des Bootes ist dann schwieriger und erfordert Übung.



Abbildung 7.1: Erprobung des Rettungskonzeptes

Die Versuche belegen nachhaltig die Umsetzbarkeit des unbemannten Rettungskonzeptes. Das entwickelte System hat das Potential, den Markt der Offshore Rettungssysteme zu revolutionieren. Es sind allerdings weitere Forschungsarbeiten nötig, um unter anderem die Mensch-Maschine-Schnittstelle zu verbessern, systematische Versuchsreihen zur Identifizierung des Fahrzeugs (Bestimmung der Steuerungsparameter für die Software) mit verschiedenen Propellern sowie Versuche im Seegang durchzuführen. Auch der Rumpf sollte nach jetzigem Kenntnisstand weiter optimiert werden.

Bezüglich der Aufnahme der Vitaldaten wurden verschiedenen Untersuchungen durchgeführt, die die Fähigkeiten des Sensorsystems überprüfen. Dabei wurden die folgenden Schwerpunkte betrachtet:

- die Wasserresistenz des Sensors (auch bei Tauchtiefen bis 4 m),
- die Datenqualität bei der Datenerfassung im Wasser und direkt nach Verlassen des Wassers (Einfluss unterschiedlicher Kleidungsstücke) und
- das Verhalten der Kommunikation im Wasser bei durchnässter Kleidung.

Das Sensormodul wurde für eine Tauchtiefe von bis zu 4 m modifiziert, um die Eintauchphase der POB beim Sturz vom Schiff zu berücksichtigen. Es wurde nachgewiesen, dass das Sensormodul einem kurzzeitigen Eintauchen bis 4 m standhält.

Die Datenqualität des Sensors (primär EKG) und die Kommunikation zum Rettungsfahrzeug werden stark von Wasserumspülungen beeinflusst. Befindet sich die POB jedoch außerhalb des Wassers (z. B. an Bord des Rettungsfahrzeugs) oder in ruhigem Wasser, ist die Datenqualität ausreichend für die Einschätzung des Gesundheitszustandes der POB.

Die Kommunikationsfähigkeit des, im 2,4 GHz-Bereich sendenden, Sensors ist im Wasser nicht gegeben. Nach der Bergung sind gegebenenfalls kurze Verzögerungen zu erwarten, die davon abhängig sind, wie lange das in der Kleidung gespeicherte Wasser benötigt, um abzufließen. Während einer Untersuchung mit einem vollgelaufenen Neopren-Anzug (inkl. Eisweste) sowie zwei Pullovern und der Rettungsweste wurde eine maximale Verzögerung von 40 s gemessen, bis wieder eine Verbindung zwischen Rettungsfahrzeug und Sensorsystem aufgebaut werden konnte.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Innerhalb des Projektes wurde ein neuartiges Search-and-Rescue-System entwickelt, welches den gesamten SAR-Prozess lückenlos abdeckt. Es kombiniert effizient interdisziplinäre Forschungssektoren wie maritime Konstruktionstechnik, Automatisierungs-technik, Steuerungs- und Regelungstechnik, hydrodynamische Simulation, Medizin sowie Informationsverarbeitungs- und Datenübertragungstechnologien. Das entwickelte SAR-System wird es ermöglichen, über Bord gegangene Personen schnell aufzufinden und zu bergen sowie dabei die Vitaldaten der POB zu überwachen. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Sicherheit in der Seeschifffahrt geleistet.

Das vorliegende integrierte SAR-System stellt eine Plattform für die weitere Entwicklung von Modulen für satellitengestützte Rettung mit einem autonomen Katamaranfahrzeug unter nahezu realen Bedingungen dar. Damit können Steuerungs- und Regelungsstrukturen, Mensch-Maschine-Schnittstellen oder Datenverarbeitungssysteme gezielt entworfen und effizient getestet werden. Zusätzlich kann die Mannschaft eines Schiffes SAR-Operationen trainieren, um Erfahrungen in derart extremen Situationen zu gewinnen [Br2011].

9 DANKSAGUNG

Von der Idee bis zum Prototypen – die Entwicklung von AGaPaS führte durch raue See: Insolvenzen von Subunternehmern, Klippen und Untiefen infolge von Lieferverzögerungen und Koordinationsproblemen konnten erfolgreich gemeistert werden – das Rettungsfahrzeug als Großausführung und im Modell präsentieren sich auf der Titelseite. Die Autoren danken dem BMWi für die Finanzierung und dem PTJ für die exzellente fachliche sowie administrative Unterstützung. Ohne die konstruktive Mitwirkung dieser Projektträger und Projektträgerinnen – im wahren und wörtlichen Sinne – hätten wir AGaPaS nicht so erfolgreich entwickeln können.

10 REFERENZEN

- [Be2010] - Berking, B., Huth, W. (Hrsg.): Handbuch Nautik - Navigatorische Schiffsführung, Seehafen Verlag, Hamburg, 2010.
- [Br2011] - Bronsart, R., Buch, T., Haase, M., Ihde, E., Kornev, N., Kurowski, M., Lampe, B.P.: Integrated Software-in-the-Loop Simulation of an Autonomously Acting Rescue Boat, Proc. International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Trieste, Italy, 20.-22.09.2011.
- [CI2010] - Clauss, G.F., Kauffeldt, A., Otten, N., Stuppe, S. Hull Optimization of the unmanned AGaPaS Rescue Vessel. Shanghai, China : 29th OMAE - International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 6-11, 2010. OMAE2010-20386.
- [CI2011] - Clauss, G.F., Kauffeldt, A., Otten, N., Stuppe, S. Identification of favourable Free Fall Parameters for the AGaPaS Rescue Catamaran. Rotterdam, The Netherlands : 30th OMAE - International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 19-24, 2011. OMAE2011-50156.
- [Ha2010] - Haase, M., Bronsart, R., Kornev, N. and Nikolakis, D.: Simulation of the Dynamics of an Autonomously Acting Small Catamaran for Search and Rescue Process, Proceedings of IFAC Conference on Control Applications on Marine Systems (CAMS), Rostock-Warnemünde, 2010.
- [Ha2011] - Haase, M., Winkler, S., Bronsart, R. and Kornev, N.: Experimental Validation of Viscous Free-Surface Flow around Fast NPL Catamarans at Large Drift Angles, INT-NAM, Istanbul, 2011.
- [Ko2009] - Korte H., Kurowski M., Baldauf M., Lampe B.P.: AdaNav - A Modular Control and Prototyping Concept for Vessels with variable Gear Configuration, Proc. 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá (BRA), 16.-18.09.2009, pp. 91-96.
- [Ku2011] - Kurowski, M., Krüger, A., Wulff, M.: Automation eines Search-and-Rescue-Prozesses auf See, Proc. 6th International Symposium on Automatic Control, Wismar, Germany, 13.-14.10.2011.
- [Ma1976] - Mastushkin, Y.M.: Calculating Controllability of Twin-Hull Ships. Shipbuilding no 6, 1976.

- [NATO2000] - North Atlantic Treaty Organization (NATO): Standardization Agreement (STANAG) No 4154 Common procedures for seakeeping in the ship design process, Dezember 2000.
- [Sö2007] - Söding, H., Bertram, V.: Program PDSTRIP: Public Domain Strip Method August 2007.
- [St2008] - Stern, F. and Agdrup, C.: SIMMAN 2008 - Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, Workshop Proceedings, Copenhagen, 2008.
- [Vo1985] - Handbook on Ship theory, editor Prof. Voitkunski, Leningrad, Sudostroenie, Vol. III., 1985.

MPT – Mehrphasenfördersysteme und -anlagen- technik für Kohlenwasserstoffe in Offshore und Onshore – Deutsch-Russische F&E-Kooperation

Mark Reichwage, Gerhard Rohlfing, Jens-Uwe Brandt, Jörg Lewerenz,
Marco Bredemeier (Joh. Heinr. Bornemann GmbH)

1. Einleitung

Dieser Statusreport zum Forschungsverbund der Mehrphasen-Pumpen-Technologie stellt den aktuellen Stand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, basierend auf den Arbeiten des MPA-Verbundforschungsprojektes (1997 bis 2006) und dem darauf aufbauenden MPT-Verbundforschungsprojekt (2008 bis 2011) dar.

Die Joh. Heinr. Bornemann GmbH initiierte die Entwicklungsaktivitäten zu Mehrphasen-Schraubenspindel-Pumpen für den Offshore- und Onshore Einsatz in den frühen 90er Jahren als Projektkoordinator, um für die damals junge Technologie ein theoretisches Fundament zu erarbeiten und den Mehrphasentransportprozess von Kohlenwasserstoffen intensiv zu erforschen. Die nachfolgende Grafik benennt die Projektpartner und ihre Aufgabengebiete im Projekt.

MPT e.V. Multiphase Pump Technology	Experts advice & project coordination
Bornemann Pumps Test facility Rutenbrock supported by Wintershall Holding	R&D of Multiphase Pumps, integrating operational needs
EagleBurgmann	R&D of MP-Mechanical Seals
GISMA Connectors	R&D of Sub Sea Connectors
Technical University Berlin Chair of exploration geology	Reservoir characteristics when producing multiphase flow
Ruhr University Bochum Chair of Machine Parts and Materials Handling	Fatigue strength of MP-compo- nents & numeric calculation
INSTITUTE FOR FAILURE ANALYSIS AND FAILURE PREVENTION (ISSV) c/o University of the Federal Armed Forces Hamburg	Corrosion & wear effects during multiphase production
Leibnitz University Hannover Institute for Thermodynamics	Multiphase transport process in pipeline networks

Abbildung. 1: Projektpartner und ihre Haupt-Aufgabengebiete

Innerhalb der ersten Jahre entstand eine der Hauptsäulen der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, die Multiphasenpumpen-Versuchsanlage in Rütenbrock (Emsland, Deutschland). Diese Versuchsanlage ermöglichte die Entwicklung der Mehrphasenpumpentechnologie in einem realen Produktionsfeld. Die theoretischen Grundlagen und die experimentellen Untersuchungen wurden in enger Kooperation mit den wissenschaftlichen Verbundpartnern erarbeitet, unterstützt durch Fachexperten der Mehrphasentechnik des MPT e.V.. Spezifische Komponenten der Mehrphasenpumpe wurden auf experimentellen Versuchsständen der Fa. Bornemann und den Industrieverbundpartnern entwickelt und im realen Feldeinsatz erprobt.

Die 2003 im Testfeld Rütenbrock installierten zwei Multiphasen-Schraubenspindelpumpen des Typs MPC 268 wurden in jahrelangem Einsatz im Sauer gasfeld für den Off- und Onshore Einsatz ertüchtigt. Das MPA für den Off-shore Einsatz lief in einem simulierten Offshore Bereich bei 1000m Wassertiefe, das MPA für den Onshore Einsatz war direkt in den Förderkreislauf geschaltet. In den 7 Betriebsjahren waren beide MPA insgesamt 78840 h in der Förderanlage eingesetzt. Wintershall und Bornemann haben die Testanlage zusammen betrieben. Während die Wintershall den Betriebsplan und die notwendigen Prüfungen gewährleistete, stellte Bornemann das Betriebspersonal der Multiphasen Pumpen Systeme. Mechaniker, Elektrotechniker und Ingenieure Bornemanns und der Projektpartner setzten das Testprogramm um. Die enge Zusammenarbeit zwischen Bornemann und Wintershall bei Planung, Installation, Betrieb und Service ermöglichte in ausgezeichneter Weise die Berücksichtigung der operativen Anforderungen an Betriebsweise und Technologie bei der Entwicklung.



Abbildung 2 : Multiphasen Versuchsanlage Rütenbrock

Im MPA Verbundforschungsprojekt konzentrierten sich die Arbeiten auf die Entwicklung der Mehrphasenpumpe für den Sub-Sea Einsatz. Im Folgeprojekt stand mehr und mehr die nachhaltige Produktion, der Transport von Kohlenwasserstoffen und die notwendige Systemtechnik im Mittelpunkt. Folgende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden durch Betriebserfahrungen an der Versuchsanlage in Rütenbrock unterstützt umgesetzt.

- Multiphasen-Pumpen-System Komponentenentwicklung
- Verschleiß, Korrosion und Standzeit
- Erweiterung der Baugrößen von Multiphasenpumpen für Off- und Onshore Einsatz
- Interaktion von MP- System, Formation und Transportpipeline

2. Multiphasen-Pumpen-System Komponentenentwicklung

Folgende MP-Systemkomponenten wurden während der Betriebszeit der Versuchsanlage Rütenbrock zur Produktreife geführt:

- Pumpengehäuse
- Rotor und Liner
- Gleitringdichtungen (GLRDs)
- Hilfssysteme für GLRDs
- O-Ring Dichtungen
- Lagerungskonzept
- Steuerungssystem

Der Schweißprozess zur Fertigung dickwandiger Pumpengehäuse mit Wandstärken größer 100mm wurde u.a. für Duplex Stahl entsprechend den Anforderungen der WEG Richtlinie für sauergasbeaufschlagte Systeme und der NACE MR0175 qualifiziert. Das im Verbund entwickelte Know How ist grundlegendes Fundament für die später beschriebene Extrapolation der Pumpenbaugröße und zukünftiger Sub Sea Pumpengehäuse.

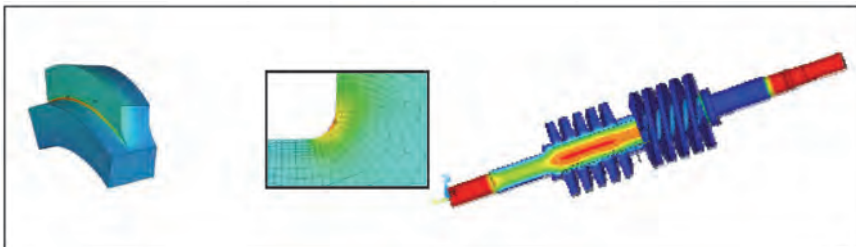


*Abbildung 3:
Pumpengehäuse aus 1.4462 Du-
plex Stahl der Unterwasserpumpe
UW-MPC268 teilgeschweißt für
einen Betriebsdruck von 100bar*

Das Konzept der Pumpengehäuse für Hochdruck Sub Sea Multiphasenpumpen wurde zusammen mit dem Projektpartner LMF, der Ruhruniversität Bochum unter Nutzung numerischer Berechnungsverfahren entwickelt.

Die theoretischen Berechnungsverfahren für das Herz der Multiphasen-Schraubenspindel-Pumpe, das Rotorpaar, wurden weiter entwickelt und ermöglichen die Vergrößerung des Betriebsbereiches. Gemeinsam mit Bornemann hat der Projektpartner LMF die Berechnung der Rotorsteifigkeit, der Dauerfestigkeit der Förderschrauben, des Einflusses von Hochtemperaturanwendungen und verbesserter Einlass- und Auslassgeometrien erarbeitet. Mit Hilfe der Finite Elemente Methode wurden neue analytische Berechnungsverfahren eingesetzt, welche die Rotordimensionierung in deutlich kürzerer Berechnungszeit, mit der erforderlicher Berechnungsgenauigkeit ermöglichen. Parameteruntersuchungen wurden so vereinfacht und erlauben eine der individuellen Anwendung angepasste Rotordimensionierung sowie die Extrapolation der Rotorbaugrößen. Die Entwicklung neuer Rotorgeometrien für hohe Differenzdrücke wurde so unterstützt und erreicht.

Rotoren mit verbessertem Schraubendesign wurden mehrere Jahre erfolgreich unter nicht moderatem Betrieb, unter extremen Bedingungen, bei hohen Druckverhältnissen (größer 12) und langen Gasphasen eingesetzt. Druckpulsationen wurden im Betrieb gemessen und Nachweisverfahren zur Berücksichtigung der resultierenden dynamischen Lasten am LMF entwickelt.



*Abbildung 4: FE-Model des Zahnfußes der Pumpen-Förderschraube und
Wärmeverteilung eines Sub Sea Pumpen Rotors*

2003 startete Bornemann zusammen mit dem Verbundpartner Burgmann die Entwicklung eines zuverlässigen Sub Sea Gleitringdichtungskonzeptes. Das von Bornemann im Verbundprojekt patentierte Smart Seal System (S3), basiert auf einer grundlegenden Funktionstrennung. Eine der Dichtung prozesseitig vorgeschaltete Drosselbuchse reduziert den Betriebsdruck direkt vor der Gleitringdichtung. Das so druckreduzierte Prozessmedium wird zur Einlassseite der Pumpe rezirkuliert. Die Dichtung wird dadurch prozesseitig gespült, während dies prozessabgewandt durch die Umwälzung eines Sperröls erfolgt. Ein Sperrölsystem hält den Sperrdruck immer leicht über dem Prozessdruck und stellt frisches und gekühltes Sperröl zur Verfügung. Die Dichtungen werden so unter idealen Bedingungen betrieben.

Während der Betriebszeit der Multiphasen-Pumpen-Versuchsanlage in Rütenbrock wurden die Gleitringdichtungen kontinuierlich weiter verbessert, um Standzeiten und Service Intervalle für den Sub Sea Einsatz positiv zu beeinflussen. Die thermische Betriebssituation und die Spülung der Dichtung wurden verändert (vermeiden von Toträumen und Einsatz in der Dichtung integrierter Förder Elemente). Die Gleitringdichtungen wurden zur sicheren Schmierung und Kühlung der Gleitflächen mit einer definierten Betriebsleckage versehen, welche im Zuge der Weiterentwicklung präzise eingestellt wurde. Neue Dichtungswerkstoffe und Dichtflächenbehandlungen wurden positiv genutzt. Lohn der beschriebenen Entwicklungsarbeit war, dass die Wellenabdichtung während der gesamten Betriebszeit kein einziges Mal die Ursache für einen Anlagenstillstand war.

Das übergeordnete Dichtungskonzept des Motor/Pumpe-Aggregats wurde schrittweise angepasst.

Während die Dichtungen im konventionellen Dichtungskonzept für Onshore Pumpen das druckerhöhte Fördermedium gegen den auf atmosphärischem Druck befindlichen Ölnebel geschmierten Lagerungs- und Getriebebereich abdichtet, wurde für den Sub Sea Einsatz eine druckbeaufschlagte Ölumlaufschmierung eingesetzt. Sie bietet durch die Füllung mit inkompressiblem Öl Vorteile bei hohen Umgebungsdrücken Sub Sea und ermöglicht durch die Druckbeaufschlagung eine Reduzierung der Differenzdruckbelastung der Gleitringdichtungen. Der ölgefüllte Lagerraum muss nun jedoch an der Antriebswellendurchführung durch eine fünfte Dichtung gegenüber der Atmosphäre abgedichtet werden. Größere axiale Kräfte auf die Antriebswelle können durch verstärkte Axiallager aufgenommen werden.

In der nächsten Entwicklungsstufe wurde ein ölgefüllter Unterwassermotor integriert. Die ebenfalls druckbeaufschlagte Ölfüllung des Unterwassermotors ermöglicht den Ausgleich der hydraulischen Kräfte, welche auf die Antriebswelle wirken. Motor- und Pumpengehäuse sind hermetisch geschlossen.

Eine Umweltgefährdung durch Leckagen an Gleitringdichtungen ist ausgeschlossen.

Im dritten Entwicklungsschritt nutzen Motor und Pumpe dasselbe Schmieröl. Die fünfte Dichtung zwischen Pumpe und Motor kann entfallen. Zur Umsetzung war die Anpassung der Schmierölqualität und die Prüfung der Beständigkeit aller schmierölbenetzten Komponenten erforderlich. Das Isolations-system des Sub Sea Motors wurde diesbezüglich verbessert. Das Dichtungskonzept wurde praktisch in der Unterwasserpumpe im Testfeld Rütenbrock erprobt und bildet die Basis für das aktuelle Sub Sea Pumpen-design. Das so genannte "double pressure compensated cartridge pump design" wurde im Demonstrator des MBS Projektes im Rahmen des 2010 präsentierten ISUP Verbundforschungsprojektes umgesetzt [3] und mittlerweile für Sub Sea Pumpen im Kundenauftrag eingesetzt.

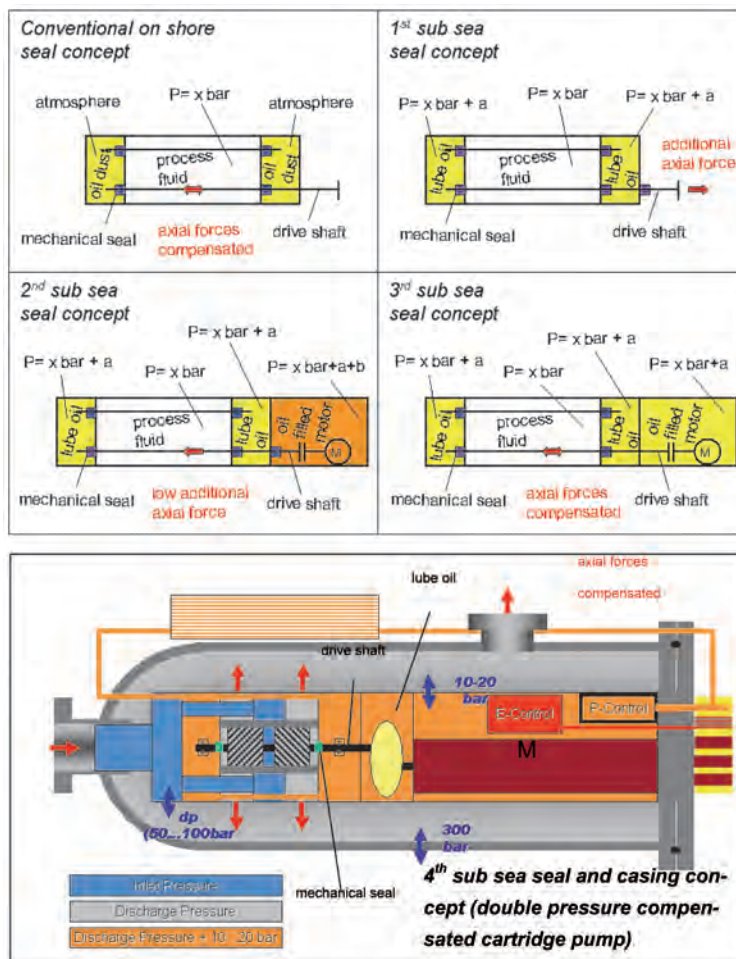


Abbildung 5 : GLRD-Konzept für Sub Sea Pumpen (Entwicklungsstufe 1-4)

Parallel zur Dichtungsentwicklung wurden deren Hilfssysteme in vier Schritten verbessert.

Ende der 90`ger Jahre erfolgte der erste Testbetrieb mit Hilfe eines Blasenspeichers, der eine dynamische Anpassung des Dichtungssperrdrucks an den Referenzdruck im Prozessmedium ermöglichte.

Im darauffolgenden Entwicklungsschritt wurde ein Kolbenübersetzer kombiniert mit einer schaltergesteuerten Nachfüllpumpe entwickelt. Dieser erlaubte neben der dynamischen Sperrdrucknachführung eine der Kolbendifferenzfläche proportionale Druckerhöhung des Sperrdrucks gegenüber dem Prozessdruck.

Im dritten Entwicklungsschritt wurde ein konstanter Überdruck in Bezug auf den Prozessdruck der Pumpe realisiert. Zwei hydraulisch arbeitende Differenzdruck-Regelventile steuern die Ölversorgung und damit den Sperrdruck der Dichtungen. Die benötigte Hydraulikenergie wird aus einem aufgeladenen Blasenspeicher entnommen, wodurch das System unanfällig gegen Stromausfall ist.

Eine grundsätzliche Herausforderung stellt die steigende Anzahl von Teilkomponenten der Hilfssysteme dar, da mit ihr auch die Häufigkeit von Komponentenausfällen steigt.

Die letzte Entwicklungsstufe berücksichtigt diese Betriebserfahrung. Im realisierten elektrohydraulischen System wurden die hydraulischen Differenzdruck-Regelventile gegen zuverlässigere und flexiblere elektrisch angesteuerte Magnetventile ersetzt. Das speziell für Bornemann Sub Sea Pumpen entwickelte Dichtungshilfssystem basiert auf dem aktuellen Bornemann Standard Dichtungshilfssystem (BSOS = Bornemann Seal Oil System) für doppelwirkende Gleitringdichtungen von Onshore Multiphasenpumpen. Das Konzept erlaubt den Anschluss des Ölkühlers auf einem niedrigeren Druckniveau als dem Sperrdruckniveau.

Abbildung 6: Entwicklungsstufen 1 und 2 des Dichtungshilfssystems



Prototype:
bladder
accumulator



2nd stage:
piston type
accumulator

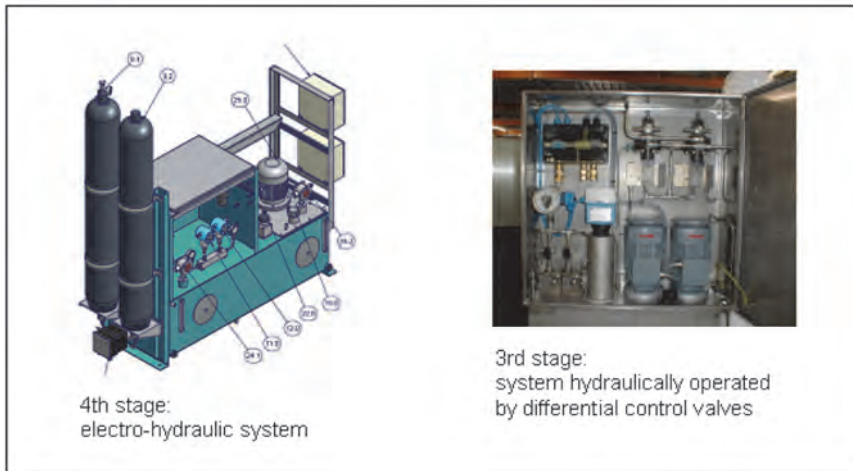


Abbildung 7: Entwicklungsstufen 3 und 4 des Dichtungshilfssystems

Schon kurz nach Beginn der Forschungsaktivitäten wurde der Effekt der explosiven Dekompression (ED) bei statischen O-Ringabdichtungen aus Viton untersucht. Freie Begleitgase diffundierten bei Betriebsdrücken ab 36 barg in den Elastomer und zerstörten ihn bei schlagartiger Druckentlastung.

In Kooperation mit den O-Ring Herstellern wurde ein Elastomer ausgewählt, der resistenter gegen explosive Dekompression ist und positiv in der Multi-phasen-Versuchsanlage in Rütenbrock getestet. Die Start und Stopp Prozeduren der Fördersysteme wurden bezüglich des ED-Risikos verbessert. Die Dekompressionszeiten wurden ausgedehnt um dem Gas mehr Zeit zur Diffusion zu geben und die Anzahl der Druckentlastungen im Normalbetrieb wurde reduziert. Während das System zuvor bei jedem Anlagenstopp druckentlastet wurde, sehen die neuen Prozeduren dieses nur im Notfall oder bei bewusster Anforderung des Betreibers vor.



Abbildung 8: Durch explosive Dekompression geschädigter O-Ring

Das Rotorkonzept der Multiphasenpumpe wurde im Verbundprojekt mit der Zielsetzung, den Lagerabstand zu verringern und dadurch die Rotorsteifigkeit zu erhöhen, weiterentwickelt. Im letzten Entwicklungsschritt ist ein bis zu 11% kürzerer Lagerabstand realisiert worden, der eine Erhöhung der radialen hydraulischen Belastbarkeit in dritter Potenz ermöglicht. Durch Einsatz neuartiger Wälzlagerwerkstoffe, wie z.B. Keramik, wurde die Widerstandsfähigkeit der Lager gegen Schmutzpartikel und somit ihre Lebensdauer erhöht. Abschließend wurde mit dem Toroidalrollenlager ein gänzlich neuer Lagertyp im Betrieb der Sub Sea Versuchpumpe erprobt. Die Lagerkonstruktion realisiert im gesamten Betriebsbereich einen Linienkontakt, der eine höhere statische und dynamische Belastbarkeit ermöglicht. Es kann eine kleinere Lagerbaugröße eingesetzt werden. Das Lager ist toleranter gegen Wellenschiefstellung, ist in seiner Radialtoleranz einstellbar und durch eine spezielle „NoWear Beschichtung“, welche über eine Mikrohärtigkeit von 1200HV verfügt, toleranter gegen Trockenlauf und Verschlechterung der Schmiersituation. Die Erprobungen verliefen positiv. Die Lagerbauart ist in ersten Sub Sea Pumpen im Einsatz.

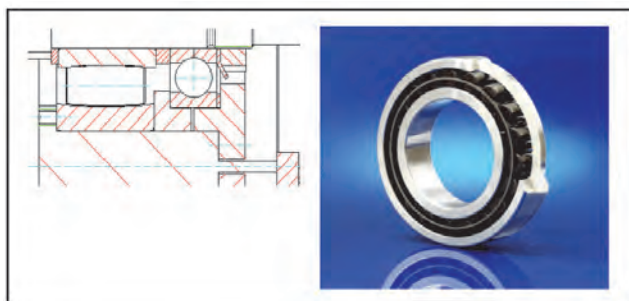


Abbildung 9: Toroidalrollenlager, erprobt im MP-Testfeld (Photo: SKF)

Die Betriebserfahrungen mit dem Steuerungskonzept der Mehrphasenpumpen im Versuchsfeld Rütenbrock waren Grundlage für diverse Entwicklungen, die mittlerweile in den Bornemann Systemstandard übernommen wurden oder die zu neuen Produkten im Bereich des Anlagenfernzugriffs oder der Anlagenzustandsüberwachung geführt haben [2].

Nachfolgend benannte Technologien wurden erprobt und für den Einsatz in Multiphasen-Pumpensystemen qualifiziert:

- Externe I/O-Bus Module (mittlerweile in 2. Generation)
- Profibus dp Kommunikation für mehr als 100 Analogsignale
- Industrial Ethernet Kommunikation

- Leitwartenfunktion via Profibus mit geregelten Zugriffsrechten
- System-Fernzugriff zu den wesentlichen Steuerungsfunktionen (Fernstart aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen) mittels unterschiedlicher Übertragungstechnologien (z.B. Richtfunk, ISDN, Satellit), mit besonderem Fokus auf weltweite Verfügbarkeit und hohe Sicherheit.
- Automatische Kommunikation von Systemzuständen an Betreiber
- Anlagenschutz mittels Schwingungsüberwachung
- Schwingungsüberwachung mit optionaler Anbindung eines Analysecenters [2]
- Videofernüberwachung von Förderplatz und Pumpensystem (abgestimmt mit dem Betriebsrat des Betreibers)
- Umfassendes, unabhängiges Sicherheitskonzept mit Not-Aus Funktion (gekoppelt an das Sicherheitssystem des Förderplatzes).
- Verbesserte Datenkompressionsroutinen für MP-Prozessdaten

Eine der Testpumpen im Versuchsfeld wurde zusätzlich mit einem Messsystem zur Aufnahme hochfrequenter Druckpulsationen ausgerüstet, um das Pulsationsverhalten von Multiphasenpumpen im nicht moderaten Betrieb, an und über der Grenze des normalen Betriebsbereiches zu untersuchen. Die Messungen wurden in enger Kooperation mit der Betriebsführung des Betreibers Wintershall durchgeführt und durch den Verbundpartner LMF der Universität Bochum betreut und ausgewertet. Die gewonnene Betriebserfahrung wurde durch ergänzende Messungen an einem Testsystem im Labor des Verbundpartners IFT, der Universität Hannover in Kooperation mit dem LMF verifiziert. Die Korrelation von Messdaten aus dem realen Förderbetrieb mit den im Labor des IFT durchgeführten Kammerdruck- Schwingungs- und Pulsationsmessungen ergab wichtige Erkenntnisse über den Entstehungsprozess der Druckpulsationen und die Einflussfaktoren. Die Kammeröffnung zur Druckseite führt demnach in Abhängigkeit von Strömungsgasgehalt, Drehzahl und Differenzdruck zur Anregung der Druckpulsationen. Die Reaktion des schwingungsfähigen Systems, bestehend aus Pumpengehäuse, Rohrleitungen, ihrer Halterung und Fundamentierung erfolgt entsprechend stärker im Bereich ihrer Eigenfrequenzen. Während für einen Gasgehalt > 30% ein Anstieg des Schwingungsniveaus beobachtet wurde, nahmen die Schwingungen für reine Flüssigkeitsfüllung und 100% Gas ab.

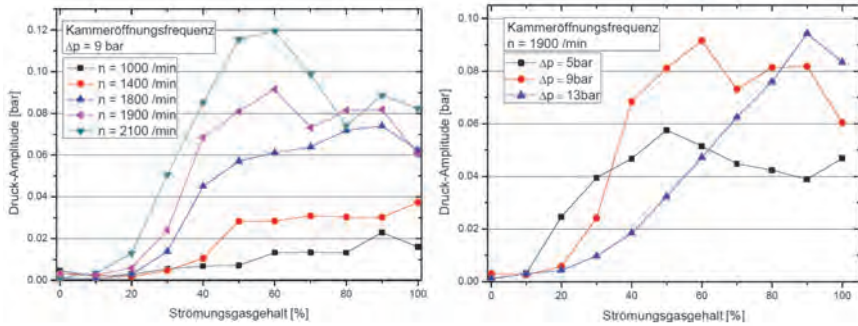


Abbildung 10: Druck-Amplitude über Strömungsgasgehalt in Abh. von Pumpendrehzahl und Differenzdruck bei Kammeröffnungsfrequenz

3. Verschleiß, Korrosion und Standzeit

Insbesondere für anspruchsvolle Multiphasenanwendungen stand die Lebensdauer der Fördererlemente seit Beginn der Forschungsarbeiten im Fokus.

Bornemann und der Verbundpartner ISSV vermuteten früh ein Zusammenwirken von abrasivem und erosiven Verschleiß und Korrosionseffekten. Das ISSV startete deshalb die Entwicklung theoretischer Modelle, die eine Einschätzung der Verschleißsituation unterstützen. Folgende Erfahrungen flossen in die Arbeiten ein:

- Untersuchung der Fördererlemente bei Inspektion der Versuchspumpen in Rütenbrock
- Korrosions- und Verschleißversuche im Labor des ISSV
- Analyse von Probenmaterial im realen Förderstrom (Rütenbrock)
- Experimentelle Tests am Verschleißversuchsstand bei Bornemann

Der bei Bornemann im Projektverlauf entwickelte Verschleißversuchsstand und die erarbeiteten Testprozeduren erlauben reproduzierbare Versuche unter realitätsnahen einstellbaren Betriebsbedingungen, bei Verwendung definierter Feststoffanteile im Fördermedium. Vergleichende Versuche unterschiedlicher Verschleißschutzmaßnahmen wurden unter Berücksichtigung der individuellen Betriebsbedingungen durchgeführt.

Beim Verbundpartner ISSV wurden Testmethoden vorbereitet, die unter Berücksichtigung der individuellen Medienzusammensetzung einer Anwendung und des individuellen Belastungsfalls eine Bewertung der Werkstoffeignung für den Einsatz in MP-Anwendungen unterstützen. Die Grundlagen für diese Methoden wurden unter Nutzung des originalen Lagerstättenwassers des Testfeldes Rb10z der Wintershall in Rütenbrock und später auch mit Fördermedium aus dem deutschen Ölfeld Mittelplate (betrieben durch ein von RWE und Wintershall gebildetes Konsortium) entwickelt.



Abbildung 11: Hochdruck/temperatur SSRT Autoklav (l), Spaltkorrosionsmesszelle (r) zu MPP-spezifischen Korrosionsuntersuchungen

Die Verfügbarkeit originaler Fördermedien und die vom ISSV entwickelten Testanordnungen und Prozeduren ermöglichen erstmalig die zielgerichtete Erforschung der Korrosionssituation und davon beeinflusster Schadensmechanismen speziell für Multiphasenapplikationen und die darin bevorzugt eingesetzten Werkstoffe. Gleichzeitig ist das erarbeitete Know How die Grundlage für die im Verbund durchgeführte Qualifikation neu ausgewählter hoch korrosionsresistenter Werkstoffe für zukünftige Multiphasenanwendungen. So konnten z.B. die bruchrelevanten Prozesse der Spannungsrisskorrosion steuernde vorlaufende anodische Korrosionsprozesse identifiziert werden. Sowohl bei der Beurteilung schadensrelevanter Betriebsbedingungen, als auch bei der Entwicklung oder Auswahl verbesserter Werkstoffe für MP-Einsatz sind diese Erkenntnisse zu beachten. Ein hoher Widerstand gegen anodische Lokalkorrosion und eine ausreichende Werkstoffzähigkeit zur Begrenzung des wasserstoffinduzierten Rissfortschrittes sind zu berücksichtigende Werkstoffeigenschaften in hoch korrosiven MP-Applikationen, wie sie in sibirischen, kasachischen und arktischen Öl und Gas Fördergebieten auftreten.

4. Erweiterung der Baugrößen von Multiphasenpumpen für Off- und Onshore Einsatz

Bereits in den frühen Neunziger Jahren arbeitete Prof. Dr. Schafstall und einige Pioniere der Multiphasentechnologie an verlässlichen Marktprognosen. Zu Beginn des MPA Verbundforschungsprojektes waren diese Marktprognosen die Basis für eine erste theoretische Extrapolation von den bis dahin

verfügbaren Baugrößen der Off- und Onshore Multiphasen-Schraubenspindel-Pumpe auf die vom Markt erwarteten Baugrößen. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der prognostizierten Marktanforderung am Beispiel der verfügbaren und erwarteten Antriebsleistung der Pumpen. Während 1997 Multiphasenpumpen mit maximal 0,8 MW Antriebsleistung verfügbar waren, wurden bereits für 2009 Antriebsleistungen von max. 5 MW prognostiziert.

Innerhalb des MPA Verbundprojektes wurde mit der Entwicklung der notwendigen theoretischen Berechnungsgrundlagen für den konstruktiven Größensprung begonnen. Die etablierte Versuchsanlage in Rütenbrock ermöglichte den Aufbau grundlegender Betriebserfahrung zur Validierung der theoretischen Basis. Das Forschungsvorhaben vereinte die für eine erfolgreiche Produktentwicklung notwendigen unterschiedlichen technischen Disziplinen, welche sich zum heute existierenden Expertennetzwerk für Multiphasentechnologie entwickelten. Die neuen im MPA und MPT Verbundprojekt erarbeiteten theoretischen Berechnungsgrundlagen, die systematisch in den Entwicklungsprozess integrierte Betriebserfahrung und die Expertise der Bornemann Konstruktionsingenieure ermöglichten die Realisierung der visionären Ziele. In exakter Übereinstimmung mit den geplanten Pumpenbaugrößen der frühen Neunziger Jahre zeigt die folgende Abbildung die gefertigte und voll getestete Multiphasenpumpe der Baugröße MW11 für den Off- und Onshore Einsatz, entwickelt für Antriebsleistungen bis 5 MW und zwei Multiphasenpumpen, entwickelt für Antriebsleistungen bis 3 MW und bereits mehrfach im praktischen Einsatz.

Abbildung 12 :
Geplante und
realisierte Multi-
phasen-Pumpen-
Baugrößen



Rückblickend stellen wir fest. Ziel unserer F&E-Arbeiten war die Fertigung eines Produktes, das zur Wertschöpfung beitragen soll. In den zwei Verbundvorhaben 2005 bis 2007 und 2007 bis 2010 wurden alle gesteckten F&E-Ziele und Produkte erfolgreich abgeschlossen.

5. Interaktion von MP- System, Formation und Transportpipeline

Neben der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der Multiphasen Pumpen Systeme konzentrierten sich die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten darauf, die Interaktionen zwischen MP-System, Lagerstätte, up-stream und down-stream Transportleitungen in Ursache und Wirkung weiter zu erschließen. Zusammen mit dem Institut für angewandte Geowissenschaften der Universität Berlin, den erfahrenen Lagerstätteningenieuren der Wintershall Holding, dem Institut für Thermodynamik der Universität Hannover (IfT) und den Fachexperten des MPT e.V. analysierte Bornemann spezielle Betriebssituationen des MP-Systems bezüglich ihres Einflusses auf die Phasenverteilung im Förderstrom und der davon abhängigen Druckentwicklung. Mit Bezug auf die Betriebserfahrungen an der Versuchsanlage Rütenbrock und experimentellen Versuchen zu Ausgasungseffekten im Versuchslabor des IfT-Hannover, wurde der Bedarf von angepassten Startscenarien herausgestellt, abhängig von der Formationsart, der Zusammensetzung des Fördermediums, dem Durchmesser der Transportpipelines und deren geodätischem Höhenprofil. Die Hauptgröße zur Beeinflussung des Startscenarios ist der Druckgradient und das angestrebte Druckniveau. Während ein hoher Druckgradient im Versuchsfeld zu stark wechselnden Förderraten führte, bewirkte eine langsame Druckabsenkung mit 1 bar über mehrere Tage eine Stabilisierung der Gasfördermengen. Es wurde deutlich, dass die erfolgreiche Lösung des Transportprozesses das Know Hows über Lagerstättenverhalten, Phasenverteilung im Fördermedium und hydraulischen Prozessen der Mehrphasenförderung erfordert.

Um die notwendige Erweiterung des Know Hows über den Mehrphasentransportprozess für Offshore, Onshore und schwer zugängliche Applikationen durch Betriebserfahrung aus der Erdöl/Erdgasförderung zu stützen, wurde in den letzten Jahren in den Verbundforschungsprojekten ein technisch/wissenschaftlicher Austausch im Rahmen der Deutsch/Russischen Kooperation etabliert.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Abschluss einer Kooperationsvereinbarung mit russischen Feldbetreibern

- Unterstützung der russischen Partner bei der Konzepterstellung zur Begleitgasnutzung (Vermeiden CO₂ kritischen Abfackelns)
- Engineering Unterstützung bei der Komplettierung zweier russischer Mehrphasen-Pumpen-Versuchsanlagen bis zur Abnahme im Werk in Russland
- Schulung für russisches Service und Betriebspersonal im Rahmen einer Betriebssimulation von zwei parallel laufenden Mehrphasen-Pumpen-Systemen im Werk Bornemann (Obernkirchen)
- Fachaustausch zwischen MPP-Experten der Firma Bornemann und russischen Partnern und Ausarbeitung von Szenarien zur Feldesentwicklung mit Mehrphasen-Schraubenspindel-Pumpen unter Berücksichtigung von varianten Möglichkeiten der Begleitgasnutzung



Abbildung 13: MP-System für schwer zugängliche Gebiete des russischen Partners (3x Baugröße MPC268, wie Versuchsanlage Rütenbrock, Entwicklungsstand integriert)

6. Ausblick

Die möglichst effiziente und ökologische Nutzung der Mehrphasen-Transporttechnik erfordert die kontinuierliche, konsequente Aufrechterhaltung des Mehrphasentransportes von der Formation bis zur Verarbeitung. Die Nutzung der Erdölbegleitgase und das Vermeiden des Abfackelns ist am russischen Markt ein erklärtes Ziel. Erste in der deutsch/russischen Kooperation erarbeitete Szenarien zur Feldesentwicklung mit Mehrphasen-Pumpen-Systemen verdeutlichen den Bedarf von vernetzten Mehrphasen-Transportsystemen und von Multiphasen-Downhole-Pumpenaggregaten. Der mehrphasige Transport entlang der Förderstrecke durch Einsatz von vernetzten Mehrphasen-Pumpen-Systemen wird im neuen Verbundvorhaben „Vernetzte Mehrphasentransporttechnik (VMPT) Subsea, Off- und Onshore, Deutsch-Russische Forschungs- und Entwicklungskooperation“ von 2011 bis 2014 eingehend bearbeitet.

7. Danksagung

Das vorgestellte Verbundforschungsprojekt „MPT - Mehrphasenfördersysteme und –anlagentechnik für Kohlenwasserstoffe in Offshore- und Onshore (deutsch-russische Kooperation)“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und durch den Projektträger Jülich (PTJ) betreut, wofür wir uns herzlich bedanken.

Den Verbundpartnern danken wir für die langjährige und stets konstruktive Zusammenarbeit, der Wintershall Holding für die freundliche und fachkompetente Unterstützung im Rahmen des Betriebs der MP-Versuchsanlage Rüttenbrock.

8. Literaturhinweise

- [1] Status Report MPA-Verbundforschungsprojekte, 2005, BMBF
- [2] Technical Paper, 2nd EMBT Conference 2008, Condition Monitoring as a Tool to Increase Availability of Multiphase Pumps, by M. Reichwage
- [3] ISUP Statusreport, Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik, 2010, Schriftenreihe PTJ

Submarine Gashydrat-Lagerstätten: Erdgasproduktion und CO₂-Speicherung (SUGAR)

von Prof. Dr. Ing. K. Wallmann und den Mitgliedern des SUGAR-Konsortiums

1. Einleitung

Erdgas aus unkonventionellen Vorkommen hat in den letzten Jahren den Weltmarkt grundlegend verändert. Nordamerika ist heute nicht mehr auf den Import von Flüssiggas angewiesen sondern exportiert Erdgas aus unkonventionellen Quellen in andere Regionen und Erdteile. Methanhydrate werden weltweit als nächste unkonventionelle Erdgasressource angesehen. Insgesamt wurde in den letzten 10 Jahren fast eine Milliarde US-Dollar für die Erforschung und Erschließung der Gashydrate ausgegeben. Die regionalen Schwerpunkte waren dabei Südostasien (Japan, Indien, China, Südkorea, Taiwan) und Nordamerika (USA, Kanada). In jüngster Zeit haben weitere Staaten große nationale Programme aufgelegt, um ihre heimischen offshore Hydratvorkommen zu erschließen (z. B. Brasilien, Vietnam, Neuseeland). Allein Vietnam will dabei bis zu 200 Millionen US-Dollar aufwenden, um Erdgas aus heimischen Hydratvorkommen zu produzieren. Weltweit wird in den nächsten 5 Jahren deutlich mehr als eine Milliarde US-Dollar an öffentlichen Mitteln investiert, um offshore Gashydratvorkommen zu erkunden und erste Produktionstests durchzuführen.

Die kommerzielle Förderung von Erdgas aus Gashydraten wird möglicherweise noch in diesem Jahrzehnt beginnen. Gashydrate, die an Land unter mächtigen Permafrostböden vorkommen, werden wahrscheinlich zuerst abgebaut, da die Erschließungs- und Förderkosten an Land geringer sind als im Offshore-Bereich. Der Abbau wird dabei in den Gebieten beginnen, in denen bereits Infrastrukturen für die kommerzielle Erdgasproduktion aus konventionellen Lagerstätten vorhanden sind (z. B. Prudhoe Bay, Alaska). Im nächsten Jahrzehnt könnte dann die kommerzielle Nutzung der Offshore-Lagerstätten einsetzen. Dazu müssen allerdings die Erdgasförraten aus Hydraten durch geeignete technische Maßnahmen weiter gesteigert werden und die anstehenden Offshore-Produktionstests erfolgreich verlaufen. Da die kommerzielle Nutzung noch nicht gesichert ist, investiert die Öl- und Gasindustrie bisher nur relativ wenig in die Gashydratforschung. Die Erschließung der Gashydrate wird aus diesem Grund weltweit ganz überwiegend aus öffentlichen Mitteln finanziert. Dabei sind besonders die Südostasiatischen Staaten und weitere Länder aus dem pazifischen Raum aktiv (Japan, China, Indien, Südkorea, Taiwan, Neuseeland), da diese Region auf den Import

von teurem Flüssiggas angewiesen ist und auf Grund des starken Wirtschaftswachstums einen ständig steigenden Bedarf an Erdgas hat.

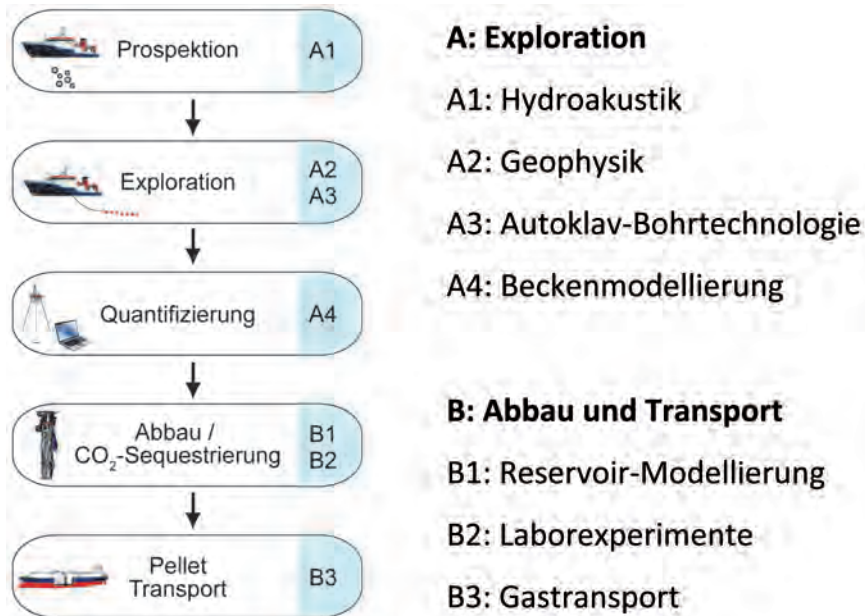
Vor diesem Hintergrund kooperieren im SUGAR-Projekt Partnern aus der Industrie und dem akademischen Bereich, um deutsche Firmen für den Zukunftsmarkt Gashydrate zu ertüchtigen. Da Deutschland über keine eigenen Hydratvorkommen verfügt, zielt das SUGAR-Projekt darauf ab, in Deutschland Technologien für die Erschließung der weltweiten Hydratvorkommen zu entwickeln. Firmen aus den Bereichen Erkundung und Exploration sowie Erschließung und Produktion sind am SUGAR-Projekt beteiligt (s. Abb. 1). Diese Firmen werden damit in die Lage versetzt, das in SUGAR erworbene Know-how weltweit zu vermarkten und so Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen. Einige der beteiligten Firmen unterstützen das Projekt finanziell oder durch die Bereitstellung von Produkten und Personal ohne selbst Fördermittel zu beanspruchen (RWE Dea, Wintershall, IES Schlumberger, BASF). Durch diese strategischen Entscheidungen bestätigen sie das hohe Marktpotential der Gashydrate als zukünftige Erdgasquelle und CO₂-Speicheroption.

Das SUGAR Projekt kooperiert eng mit den nationalen Gashydratprojekten in Japan, Indien, China, Taiwan und Neuseeland. Durch diese Zusammenarbeit erhalten die an SUGAR beteiligten Firmen bereits in einer frühen Phase Zugang zu wichtigen Informationen, potentiellen Kooperationspartnern und Märkten für die kommerzielle Nutzung der SUGAR Technologien. Offshore-Erdgas- und Erdöl-Vorkommen werden überwiegend durch internationale Konsortien ausgebeutet, an denen auch deutsche E & P Firmen wie RWE Dea, EON E & P und Wintershall beteiligt sind. Die Konsortialpartner müssen dabei nachweisen, dass sie über die notwendige technische Expertise für die Produktion im Offshore-Bereich verfügen. Die genannten deutschen Firmen bauen als SUGAR-Partner diese wichtige Expertise auf und steigern damit ihre Chancen, sich an zukünftigen Projekten und Konsortien zur kommerziellen Nutzung der Gashydrate zu beteiligen. Mit der Beteiligung dieser Deutschen E & P-Firmen steigen auch die Chance der mittelständigen SUGAR-Partner aus dem meerestechnischen Bereich, ihre Produkte bei der Exploration, Überwachung und Erschließung der Gashydratlagerstätten vermarkten zu können.

2. Ergebnisse der 1. SUGAR-Phase

Das SUGAR Projekt zielt darauf ab, Gashydrate als neue Erdgasressource zu erschließen und gleichzeitig für die sichere Speicherung von CO₂ zu nutzen. Die 1. Phase des SUGAR-Projekts wurde nach einer dreijährigen Laufzeit im Sommer 2011 erfolgreich abgeschlossen. Es wurden neue Verfahren

zur Lokalisierung und Erkundung von submarinen Gashydratvorkommen entwickelt, numerische Modelle und Drucklabore aufgebaut, um Verfahren zum Abbau von Gashydraten am Computer und im Labor zu testen sowie Ansätze zum Transport von Erdgas in Form von Hydratpellets untersucht.



Projekt	Partner Wirtschaft	Partner Wissenschaft
A1	L3 Communications ELAC Nautik GmbH	IFM-GEOMAR, Universität Bremen
A2	K.U.M. Umwelt- und Meerestechnik GmbH, Magson GmbH, SEND GmbH	IFM-GEOMAR, BGR
A3	PRAKLA Bohrtechnik GmbH	Universität Bremen, TU Clausthal
A4	Schlumberger-IES	IFM-GEOMAR
B1	BASF/Wintershall, Wirth GmbH	IFM-GEOMAR, Fraunhofer UMSICHT, GFZ Potsdam
B2	CONTROS GmbH, BASF, RWE/DEA, BASF/Wintershall, E.ON Ruhrgas, Stadtwerke Kiel	FH Kiel, IFM-GEOMAR, GFZ Potsdam, Fraunhofer UMSICHT, IOW
B3	Lindenau, Aker Yards, Meyer Werft, E.ON Ruhrgas, Linde, BASF, Germanischer Lloyd	IOW

Abbildung 1: Teilprojekte und Partner der 1. SUGAR-Phase

2.1 Ergebnisse im Teilprojekt A1

Im Teilprojekt A1 wurden neue Geräte und Auswerteroutinen für den hydroakustischen Nachweis von Gasblasen in der Wassersäule entwickelt und erfolgreich im Feld getestet. Die meisten wirtschaftlich interessanten Gashydrat-Vorkommen werden durch den Aufstieg von Methangas aus dem tiefen Untergrund gebildet. In vielen Fällen entweicht dabei ein Teil des aufsteigenden Gases in die Wassersäule. Wenn also am Kontinentalhang Methangasblasen am Meeresboden aufsteigen, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass es in der betreffenden Region größere Gashydrat-Vorkommen im Untergrund gibt. Der hydroakustische Gasblasennachweis dient daher der Prospektion und Lokalisierung von Gashydrat-Vorkommen im Untergrund. Gasfahnen und einzelne Gasblasen können von geeigneten akustischen Systemen (Echoloten) von Bord eines Schiffes erfasst werden. Einstrahlecholote, sogenannte „Fishfinder“ verfügen schon lange über die Möglichkeiten die Wassersäule auf kleine Störkörper (Fischblasen) zu untersuchen. Multibeam Systeme mit breiten Fächern bis zu 150° eignen sich jedoch wesentlich besser zur effektiven und exakten Kartierung von Gasaustritten am Meeresboden.

Die prinzipielle Fähigkeit der ELAC SEABEAM Anlage Gasblasen über den gesamten akustischen Fächer von 150° Öffnungswinkel in der Wassersäule zu lokalisieren wurde in einer Gemeinschaftsarbeit von ELAC-Nautik GmbH und IFM-GEOMAR demonstriert und zeigt die Effizienz von Fächerecholoten im Vergleich zu Einstrahlloten. Die Weiterentwicklung moderner Multibeam-systeme erlaubt nicht nur eine flächenhafte Kartierung des Meeresbodens, sondern auch die räumliche Abtastung der Wassersäule (Water Column Imaging, WCI). In der Projektphase SUGAR-I wurden die grundlegenden technischen Eigenschaften für die Erfassung der Wassersäulensignale in Multibeam-systemen gelegt. Ebenso wurde eine erste Software erstellt, die es ermöglicht, diese Daten darzustellen, wiederholt abzuspielen und einem Datenprozessing zuzuführen. Erst hierdurch besteht die Möglichkeit im Postprozessing die detaillierte Analyse von Gasfahnen zu betreiben. Da für die Detektion von Gasblasen in der Wassersäule eine möglichst hochauflösende Erfassung von Messdaten erforderlich ist, wurden von L-3 ELAC Nautik Hardware- und Softwarekomponenten entwickelt, die es ermöglichen, die Wassersäule sendeseitig quasi-simultan mit bis zu vier verschiedenen Frequenzen zu beschallen (Multi-Ping-Funktionalität). Hierdurch lässt sich die Lotrate gegenüber herkömmlichen Fächerecholoten verdoppeln. Alle Komponenten und Algorithmen wurden in ein Fächerecholot vom Typ SeaBeam 3050 mit einer Trägerfrequenz von 50kHz integriert und im Rahmen von SUGAR erfolgreich getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass der Umfang der Datenströme von >1GB pro Minute eine neue Entwicklung der Auswerterouti-

nen und der Entwicklung einer Software im Multi-Threat-Verfahren notwendig macht. Weitere Neuentwicklungen in der Schwingertechnologie werden es ermöglichen, die abgestrahlten Schallfächer zu verschwenken. Damit können Gasfahnen, die in der Regel durch die Umgebungsströmung stark verdriften und damit den akustischen Fächer verlassen, verfolgt und letztendlich volumetrisch erfasst werden.

Am IFM-GEMOAR wurden gleichzeitig eine neue Software zur Objekterkennung entwickelt, die darauf abzielt, aus den umfangreichen Wassersäulen-Daten jene Signale zu erkennen und auszulesen, die durch den Aufstieg von Gasblasen am Meeresboden verursacht werden. Diese automatische Erkennung von Gas-Fahnen am Meeresboden wurde an Hand von hydroakustischen Felddaten entwickelt und weiter verfeinert. Während der SUGAR Testfahrt POS-405 im Dezember 2010 konnten erstmals mit der ELAC SEABEAM Anlage Gasaustritte am tiefen Meeresboden lokalisiert und vermessen werden. Die aufgezeichneten Daten zeigen ca. 200 m hohe Gasfahnen aus dem Donaudelta, die in ca. 400 m Tiefe aus dem methanhaltigen Sediment austreten (Abb. 2).

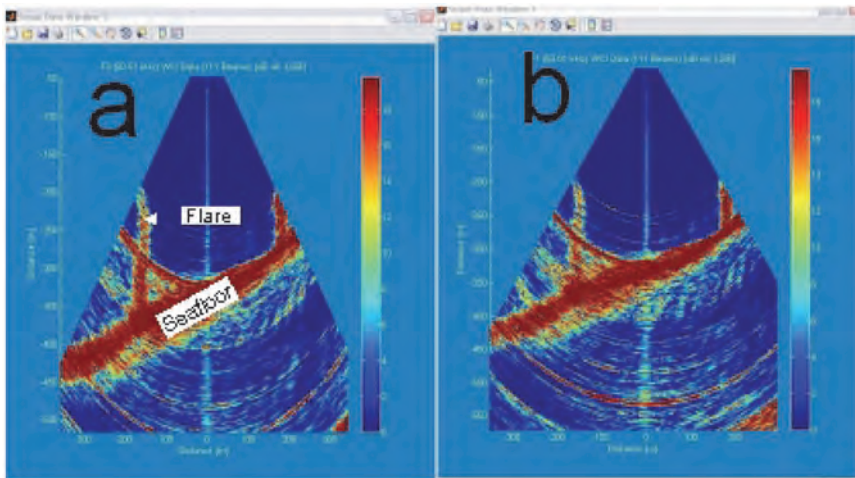


Abbildung 2: (a) 200 m hoch aufsteigender Gas-Flare aufgenommen im Donaudelta. (b) weitere Flares, die den akustischen Fächer jedoch verlassen (© Cord Papenberg).

Mit der Erprobung während der Testfahrt POS-405 wurde gezeigt, dass die Erfassung von Gasblasen in der Wassersäule im ganzen Fächer erfolgt und dass die quasi on-line Darstellung mit dem WCI-Viewer eine Vorabkontrolle während der Messung ermöglicht. Weiterhin wurden diesen Felddaten eingesetzt, um die Algorithmen zur Prozesserkennung zu verfeinern, die Visualisierungsroutinen in 2D und 3D zu testen und die Abstimmung zwischen den Softwaremodulen der Datenerfassung (ELAC) und der Objekterkennung (IFM-GEOMAR) zu verbessern.

Mit der Kombination aus Erfassung von Wassersäulendaten und gleichzeitiger Software für eine Bearbeitung ist für ELAC Nautik derzeit ein Alleinstellungsmerkmal gesichert, da Konkurrenzunternehmen nicht über die Schiene Datenverarbeitung von WCI verfügen. Damit eröffnen sich neue Marktchancen nicht nur im Bereich der Gashydrate sondern auch bei der Überwachung von Erdgas-Pipelines, bei der Erdgasproduktion und bei der CO₂-Speicherung im Offshore-Bereich.

2.2 Ergebnisse im Teilprojekt A2

Im Teilprojekt A2 wurden geophysikalische Geräte für die Exploration von Gashydrat-Vorkommen gebaut und erfolgreich im Feld getestet, um die Verteilung von Gashydraten, Fluid- und Gaskanälen und Sedimentstrukturen im Untergrund abzubilden. Ein Schwerpunkt war dabei die Konstruktion eines tief geschleppten Streamers für die seismische Exploration. Tief geschleppte Streamer (DTMCS) werden etwa 100 m über dem Meeresboden geschleppt. Damit bieten sie gegenüber herkömmlichen Oberflächensystemen einen Auflösungsvorteil durch den kleineren Footprint. Mit dem Einsatz einer üblichen Druckluftquelle (Airgun) an der Meeresoberfläche wird durch die große Schleppentfernung (ca. zweifache Wassertiefe) zudem ein unterschiessen (Weitwinkelreflexion) stark reflektierender Meeresbodenstrukturen ermöglicht. Damit wird z.B. bei Gasmigrationswegen eine Abbildung der internen Struktur ermöglicht, die bei einer Steilwinkelseismik durch den Blanking Effekt nicht abgebildet wird. In Deutschland gab es bisher keinen Hersteller für solche Systeme, die in größerer Tiefe eingesetzt werden können. Aufgabenstellung des Projektes war es einzelne Hydrophonknoten für die digitale Datenerfassung seismischer Signale zu entwickeln. Die Knoten sollten modular verkettet werden können. Jeder Knoten musste mit einem Kompass und Tiefensensor ausgestattet werden. Die Gehäuse sollten im Wasser neutral ausbalanciert sein und bis 3.000 m Tiefe einsetzbar sein. Für die Ansteuerung und eine Qualitätskontrolle war eine Steuerungs- und Übertragungssoftware zu entwickeln. Der Bau des DTMCS wurde wie geplant am IFM-GEOMAR mit Hilfe der Firmen K.U.M. Umwelt- und Meerestechnik GmbH und SEND GmbH umgesetzt. Das Gerät wurde auf Testfahrten mit FS Poseidon und FS Sonne erfolgreich im Schwarzen Meer und vor Neuseeland eingesetzt.

Zudem wurde am IFM-GEOMAR ein neues 3-D seismisches System nach dem P-Cable Prinzip gebaut. Die Finanzierung für die Entwicklung des 3-D Systems wurde außerhalb des SUGAR-Projekts sichergestellt. Auch dieses Gerät wurde mehrfach getestet und erfolgreich im Mittelmeer und vor Neuseeland eingesetzt. Mit beiden Geräten gelang es, die internen Strukturen der dortigen Gashydratvorkommen in zuvor nicht erreichter räumlicher Auflösung abzubilden.

Weiterhin wurden neue Geräte für die elektromagnetische Quantifizierung von Gashydratmengen im Untergrund entwickelt. Für die Bewertung einer Gashydratlagerstätte, sei es aufgrund ihres Energiepotentials oder ihrer Eignung als CO₂ Speicher, ist die Kenntnis von Bedeutung, wie viel Gashydrat sich wo bildet und wie es verteilt ist. Dazu braucht man Messverfahren, die den gesamten Gashydrat-Stabilitätsbereich erfassen. Aktive Elektromagnetik oder controlled source electromagnetic (CSEM) ist eine sehr geeignete Methode, da die elektrische Leitfähigkeit bzw. der elektrische Widerstand sich dort signifikant ändert, wo sich Gashydrate in signifikanten Mengen gebildet haben. Gashydrate sind elektrische Nichtleiter und verdrängen bei ihrer Bildung das elektrisch gut leitende Salzwasser aus den Poren oder ersetzen Teile der Sedimentmatrix. Der elektrische Widerstand der Gashydratformation ist somit entsprechend erhöht. Ziel des Teilprojekts A2 war daher die Entwicklung von CSEM Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung im Meeressediment. Dazu ist an der BGR mit Hilfe der Firma Magson GmbH ein neues, am Meeresboden geschlepptes CSEM Messsystem entwickelt und gebaut worden, welches sich speziell für die Exploration der Gashydratstabilitätszone vom Meeresboden bis zu einige Hundert Meter darunter eignet (s. Abb. 3). Das Messsystem konnte während der Projektlaufzeit fertig gestellt werden und ist auf zwei Testfahrten (St. Lawrence River, Quebec; Schwarzes Meer, Rumänien) und einer Ausfahrt vor Neuseeland (Projekt NEMESYS) getestet und erfolgreich eingesetzt worden. Zudem wurden am IFM-GEOMAR stationäre CSEM Meßsysteme gebaut und erfolgreich am Meeresboden vor Neuseeland eingesetzt.

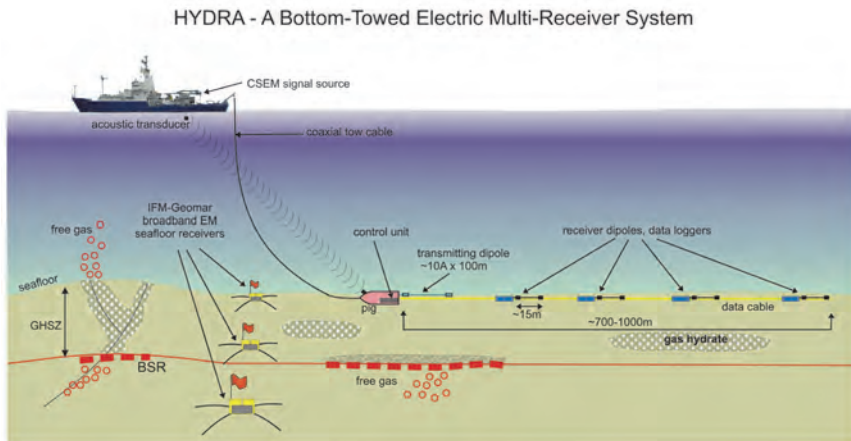


Abbildung 3: Messkonfiguration des an der BGR entwickelten, geschleppten CSEM Messsystems HYDRA und stationäre Breitband-Elektromagnetik-Empfänger des IFM-GEOMAR.

Die im Teilprojekt A2 entwickelten seismischen und elektromagnetischen Geräte ermöglichen eine hochgenaue Vermessung der oberen Sedimenthorizonte (bis ca. 500 m Sedimenttiefe). Da Gashydratvorkommen in der Regel auf diesen flachen Bereich begrenzt sind, können die Sedimentstrukturen und Gashydratmengen mit den in SUGAR entwickelten Geräten sehr gut erfasst werden. Konventionelle Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten treten dagegen in sehr viel größeren Sedimenttiefen auf. Dementsprechend sind die bisher kommerziell verfügbaren Explorationstechnologien auf Sedimenttiefen von mehreren Kilometern abgestimmt und daher nicht in der Lage, die oberen Gashydrat-führenden Schicht räumlich gut aufzulösen. Die SUGAR-Explorationstechnologien schließen diese Lücke und ermöglichen damit eine deutlich bessere Exploration von Gashydratvorkommen.

2.3 Ergebnisse im Teilprojekt A3

Im Teilprojekt A3 wurden neue Autoklav-Systeme für die Bergung von ungestörten Gashydrat-führenden Sedimenten entwickelt, gebaut und im Feld getestet. Damit wird es möglich, die Gashydratmengen im Untergrund lokal zu quantifizieren und die großflächigen Abschätzungen aus den geophysikalischen Daten zu verifizieren. Die TU Clausthal hat bereits in den zurückliegenden Jahren Autoklav-Bohrsysteme entwickelt, die im ODP (Joides Resolution) und von FUGRO auf wissenschaftlichen und kommerziellen Bohrschiffen erfolgreich eingesetzt wurden. Die Kernaussbeute war jedoch besonders in tonigen Sedimenten und in Sedimenten mit Ton-Sand-Wechsellagen nicht immer zufriedenstellend. Um diese Situation zu verbessern, wurde von TU Clausthal im Rahmen von SUGAR ein neues Formationsun-

abhängiges Autoklav-Bohrsystem mit kontrollierter Vorschubgeschwindigkeit entwickelt. Das Gerät wurde in Clausthal gebaut und getestet und im Jahr 2010 von FUGRO in den Gashydratprovinzen vor Südkorea eingesetzt. Schon bei diesem ersten Einsatz wurden mit dem Gerät deutlich höhere Kernaussbeuten erzielt als mit den auf dem FUGRO-Bohrschiff verfügbaren Standardsystemen.

Am MARUM in Bremen wird seit einigen Jahren ein mobiles Bohrsystem entwickelt (MeBo), das auf konventionellen Forschungsschiffen verwendet werden kann. Damit können bis zu ca. 70 m lange Sedimentkerne geborgen werden ohne spezielle Bohrschiffe einsetzen zu müssen, die in Deutschland leider nicht verfügbar sind. Für dieses MeBo wurden im Rahmen von SUGAR speziell angepasste Autoklav-Bohrsysteme entwickelt und gebaut. Im Frühjahr 2011 konnten damit erstmals auf dem Forschungsschiff Meteor Gashydrat-führende Sedimente im Schwarzen Meer geborgen werden. Das Druckerhaltungssystem kam dabei noch nicht zum Einsatz. Es wird im Frühjahr 2012 erstmals in den Gashydratgebieten vor Westafrika im Feld getestet.

2.4 Ergebnisse im Teilprojekt A4

Im Teilprojekt A4 wurde das Beckenmodell PetroMod der Aachener Firma IES-Schlumberger weiter entwickelt, um die Entstehung von Gashydrat-Lagerstätten numerisch zu simulieren und die räumliche Verteilung von Gashydrat-Vorkommen auf Basis geologischer und geophysikalischer Daten vorhersagen zu können. Diese Art der Beckenmodellierung ist in der Erdöl- und Erdgasindustrie weit verbreitet. Sie wird eingesetzt, um die Anzahl von kostenintensiven Erkundungsbohrungen zu minimieren und damit die Explorationskosten zu verringern. Das von IES-Schlumberger angebotene PetroMod-Packet hat sich dabei in den letzten Jahren zum industriellen Standard entwickelt. Im Rahmen von SUGAR wurde dieses Modell erweitert, um erstmals die Gashydratentstehung bei der Beckenbildung zu simulieren. Wesentliche Meilensteine waren hierbei (1) die Entwicklung eines sogenannten „Nested model“, was die Berechnung in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ermöglicht, (2) die Berechnung des Stabilitätsfeldes von Gashydraten in PetroMod sowie (3) der Einbau entsprechender Kinetiken, die die Bildung von Methan und somit potentiell Gashydrat steuern. Da die Entstehung von Gashydrat-Lagerstätten auf wesentlich kürzeren Zeitskalen abläuft, als dies bei Erdöl- und Erdgaslagerstätten der Fall ist, und es sich zudem um kleinräumige Bildungen handelt, war die Entwicklung eines „Nested model“ eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Fortgang des Projektes. Es ist hiermit möglich, einzelne Zeitschritte in der Berechnung auf bis zu 100 Jahre zu verringern und die Kantenlänge einzelner Zellen auf bis zu 1 dm zu verkleinern (Lokal Grid Refinement). Im weiteren Verlauf des Projektes wurden eine Vielzahl von Parametern zur Berechnung physikalischer Eigenschaften von

Gashydraten sowie biogeochemische Prozesse in den Programmcode implementiert. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es somit möglich, Berechnungen zur Stabilität von Gashydraten durchzuführen und anhand entsprechender biogener und thermogener Kinetiken Methan zu bilden. Bildet sich das Methan im Stabilitätsfeld von Methanhydrat oder migriert es entlang von Aufstiegswegen in diesen Bereich hinein, so wird es dementsprechend ausgefällt. Erste konkrete Berechnungen wurden für einen Teilbereich des „Alaska-North-Slope“ durchgeführt, wo der USGS (United States Geological Survey) zusammen mit zahlreichen Universitäts- und Industriepartnern seit 2001 intensiv die dortigen Gashydratvorkommen exploriert und ab 2012 den Hydratabbau in 2 Feldtests erproben wird. Für das Gebiet bei Prudhoe Bay lag bereits ein 3D-Basismodell in PetroMod vor. Derzeit werden die Ergebnisse mit verfügbaren Daten über die Verteilung von Gashydraten im Untergrund (z.B. aus Bohrungen) abgeglichen. Insgesamt ist der weitere Entwicklungsbedarf vor allem in der Verbesserung der quantitativen, räumlichen Prognose zu sehen. Die umfangreichste Aufgabe besteht somit darin, das derzeit verfügbare Modell an weiteren, geeigneten Fallstudien zu testen und zu kalibrieren. In der neuesten kommerziell verfügbaren PetroMod-Version, die im Jahr 2010 erstellt wurde, sind wesentliche Ergebnisse der SUGAR-Arbeiten bereits implementiert. So kann erstmals die zeitliche und räumliche Entwicklung der Gashydratstabilitätszone bei der Beckenbildung simuliert werden. IES-Schlumberger verfügt damit über ein weltweit einzigartiges Produkt, das in den nächsten Jahren eine Vielzahl neuer Kunden anziehen wird.

2.5 Ergebnisse im Teilprojekt B1

Im Teilprojekt B1 wird der Abbau von Gashydraten numerisch simuliert. Dazu werden Reservoir-Modelle entwickelt und eingesetzt, um die Erdgasausbeuten bei verschiedenen Produktionsverfahren auf Reservoir-Skala vorherzusagen und damit die am besten geeigneten Verfahren zu identifizieren. In der ersten Projektphase wurden die Grundlagen zur Simulation der Erdgasproduktion aus Gashydrat-Lagerstätten bei gleichzeitiger Speicherung von CO₂ entwickelt. Hierzu wurden von IFM-GEOMAR die weltweit bekannten Lagerstätten charakterisiert und mathematische Modelle erstellt, mit denen die physikalisch/ chemischen Vorgänge bei der CO₂-Einspeisung und dem CH₄-Abbau numerisch simuliert werden können. Es wurden Module erstellt, mit denen die thermodynamischen Daten zur Stabilität und Löslichkeit der Gashydrate als Funktion von Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung berechnet werden können. Weiterhin wurden kinetische Gleichungen definiert und Parameter bestimmt, um die Geschwindigkeit der Gashydratumwandlung und -zersetzung für verschiedene Reservoir-Bedingungen berechnen zu können. Am GFZ wurden Parameter der Bildung und Zersetzung sowie Austauschreaktionen von Gashydraten mit verschiedenen Gasen und Gasmischungen bestimmt. Am Fraunhofer Institut UMSICHT wurden die Produk-

tion von Methan aus Methanhydraten und die Speicherung von CO₂ im Sediment als CO₂-Hydrat simuliert. In den Produktionsszenarien wurden sowohl die Druckentlastung, wie auch die thermische Stimulation für den Abbau der Methanhydrate berücksichtigt. Dazu wurden die von IFM-GEOMAR und GFZ bestimmten Detailmodelle zu Phasengleichgewichten, Zersetzungs- und Bildungskinetik, thermophysikalischen Daten etc. in die Simulationscodes implementiert. Dadurch stehen nun zwei Programme zur Verfügung:

- kommerzielle Software CMG-STARS; geeignet zur Simulation von großräumigen realen Lagerstättenszenarien der Erdöl- und Erdgasförderung. Ohne geeignete Modellimplementierungen zur hier erforderlichen CO₂/CH₄-Hydrat-Thematik
- wissenschaftlicher Code SUGAR-HyReS; geeignet zur Simulation geometrisch kleiner Gebiete mit wissenschaftlich fundierten, im SUGAR-Projekt entwickelten Modellen zur Hydratthematik

Die Werkzeuge unterscheiden sich hauptsächlich in der Adaptierbarkeit an vorliegende Hydrat-Problemstellungen. Ein wesentliches Ergebnis der ersten SUGAR-Phase ist es, dass durch die detailgetreue Simulation mit SUGAR-HyReS die Modelle des STARS- Programms sinnvoll justiert wurden, so dass nun auch eine Simulation der Speicherung und Methangewinnung aus Hydratlagerstätten in großen Gebieten näherungsweise erfolgen kann.

Simulationen gekoppelter Methanföderung aus Hydraten und Speicherung von CO₂ mit CMG-STARS zeigen, dass die Austauschreaktion auch unter Lagerstättenbedingungen prinzipiell möglich ist (Abb. 4). Bei den angenommenen Betriebsparametern wird Methanhydrat großräumig zersetzt und CO₂-Hydrat in der Lagerstätte gebildet und eingelagert.

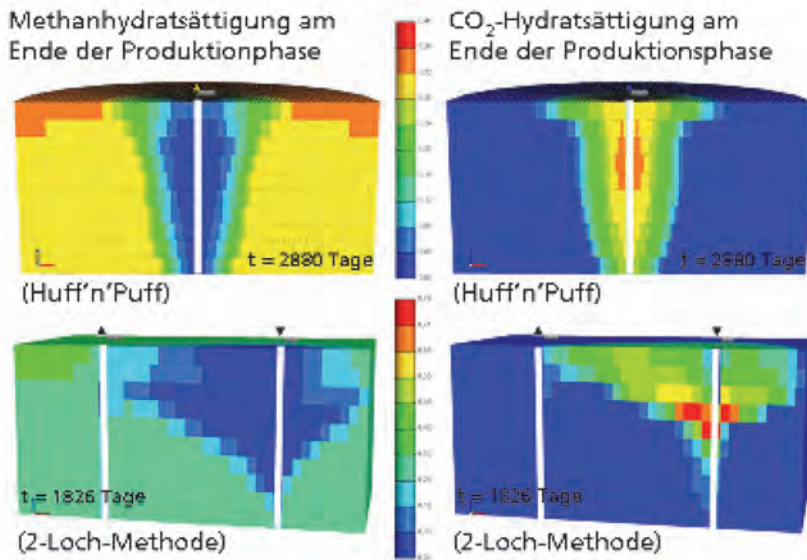


Abbildung 4: Simulationsergebnisse (CMG-STARs, Gebiete ca. 900.000 m³)
 Oben: Huff'n'Puff: Einlochverfahren (Radius = 120m, Höhe = 20m): Injektion von CO₂ für 1 Jahr, Wartezeit 0,5 Jahre, CH₄-Förderung durch Druckabsenkung 6 Jahre, Unten: Zweilochverfahren (Kantenlängen 200m, 20m): Simultanes Einspeisen von CO₂ (rechte Bohrung, CH₄-Förderung durch Druckabsenkung über linke Produktionsbohrung, 8 Jahre

Die wesentliche Kenngröße zur Bewertung der Produktivität der Lagerstätten und der Technologieansätze ist die Förderrate eines Bohrloches in Normkubikmeter Methangas pro Zeiteinheit. Als Richtgröße für eine wirtschaftliche Produktion wird seitens der Industriepartner eine mittlere Förderrate von 5.000 Nm³/h (120 000 Nm pro Tag) pro Bohrloch angegeben. Die Förderraten wurden daher für eine Vielzahl von Szenarien berechnet. Dabei zeigte sich, dass die höchsten Ausbeuten (ca. 2.500 Nm³/h) mit einem 2-Bohrloch-Verfahren erzielt werden, bei dem an der Produktionsbohrung der Druck abgesenkt wird während über eine zweite Bohrung flüssiges CO₂ eingebracht wird. Der CO₂-Anteil im produzierten Methan lag dabei stets unter 5 %. Diese Abschätzung liegt im Bereich der in der Literatur veröffentlichten Mess- und Simulationsergebnisse für unterschiedliche Hydratlagerstätten und Berechnungsgebiete. Die in der ersten Phase erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Verfahren zur Erdgasproduktion aus Gashydraten noch weiter verbessert werden müssen, um wirtschaftlich lohnende Erdgasförderraten zu erzielen. Dazu sollen in der zweiten Phase Konzepte zur Aktivierung des Reservoirs simuliert werden (Injektion von Polymeren und überkritischem CO₂, in-situ Verbrennung) und optimierte technische Konzepte zur Erschließung der Lagerstätte entwickelt und bewertet werden.

2.6 Ergebnisse im Teilprojekt B2

Im Teilprojekt B2 wurden Laborexperimente unter in-situ Druck- und Temperatur-Bedingungen durchgeführt, um neue Verfahren für die Erdgasgewinnung aus Gashydraten zu entwickeln und zu bewerten. Dabei wurden Experimente zur Untersuchung der Effekte auf mikroskopischer, also auf molekularer und Porenskala, sowie auf makroskopischer Skala bis zu ca. 200L Volumen durchgeführt. Der Abbau von natürlichem Gashydrat durch Injektion von CO₂ stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, das darin gebundene Methangas als eine insgesamt CO₂-neutrale Energiequelle zu erschließen. Die Methangewinnung bei gleichzeitiger CO₂-Deponierung ist daher anderen Hydrat-Abbaumethoden vorzuziehen. Da aus Laboruntersuchungen bekannt war, dass der direkte Austausch von Methan als Gastmolekül im Hydrat durch CO₂ recht langsam verläuft, wurden in der 1. Phase von SUGAR unterschiedliche Verfahren zur Beschleunigung der Umwandlungsreaktion entwickelt, um geeignete Methoden für den industriellen Hydratabbau zu identifizieren. Im Einzelnen waren dies: die in-situ Methanverbrennung (GFZ Potsdam), die Warmwasserzufuhr mittels des Mammut-pumpen-Prinzips (Fraunhofer UMSICHT), die Zugabe von Polymeren (BASF) und die Injektion von warmem CO₂ (IFM-EOMAR).

Für die in-situ Verbrennung wurden neue auf Katalyse beruhende Verbrennungseinheiten entwickelt und erfolgreich im Labormaßstab getestet. Damit ist es jetzt möglich, das Gashydrat-Reservoir durch die teilweise Verbrennung von Methan im Reservoir thermisch zu stimulieren. Weiterhin wurden neue Polymere synthetisiert und auf ihre Eigenschaften untersucht. Dabei zeigte sich, dass bestimmte Polymertypen in der Lage sind, die Zersetzung von Gashydraten um bis zu 300 % zu beschleunigen. Durch die Einbringung dieser bioabbaubaren Polymere in das Gashydrat-Reservoir können also die Erdgasausbeuten entscheidend erhöht werden. Schließlich konnte im Labor nachgewiesen werden, dass die Methanhydrate durch warmes überkritisches CO₂ sehr viel schneller zersetzt werden als durch kaltes flüssiges CO₂. Die Methanausbeute konnte im Labor durch den Einsatz von überkritischem CO₂ um fast eine Größenordnung erhöht werden. Zusammenfassend haben die Laborarbeiten gezeigt, dass die Anwendung der etablierten Verfahren zur Erdgasproduktion aus Methanhydraten, nämlich Druckerniedrigung, Wärmezufuhr oder Injektion von kaltem CO₂, nur zu mäßigen Förderaten führen wird. Dieses Ergebnis wird durch die numerischen Abbau-Simulationen in B1 sowie den Simulationen internationaler Kollegen bestätigt. Demgegenüber deuten die bisherigen SUGAR-Ergebnisse an, dass durch eine geeignete Kombination der in-situ Verbrennung mit der Injektion von überkritischem CO₂ und Polymeren eine stark verbesserte Erdgasproduktionsrate erzielt werden kann. Alle diese neuen Ansätze zur wirtschaftlichen Nutzung der Gashydrate wurden mittlerweile von den

SUGAR-Partnern patentiert, so dass die weitere Entwicklung und Verwertung geschützt sind.

2.7 Ergebnisse im Teilprojekt B3

Im Teilprojekt B3 wurden verschiedene Konzepte für den Erdgastransport untersucht und weiterentwickelt. Die Aufgabenstellung bestand darin, geeignete Transportverfahren für Gashydrat-Lagerstätten zu identifizieren, die in ca. 100 km Entfernung von der Küste bei Wassertiefen von ca. 1000 m lokalisiert sind und an denen Erdgas mit einer Förderrate von mindestens 100 000 Nm³ pro Tag und Bohrloch produziert wird. Im Zentrum stand dabei ein Verfahren, bei dem das Erdgas vor Ort in Gashydrat-Pellets umgewandelt und dann durch geeignete Transportschiffe an Land verbracht wird. Diese Idee wurde ursprünglich von norwegischen und japanischen Wissenschaftlern entwickelt. Eine Pilotanlage zur Produktion von Hydratpellets wird seit einigen Jahren von Mitsui in Japan betrieben. Die Pellets sind bei Normaldruck und ca. -20°C über einen Zeitraum von mehreren Monaten stabil und eignen sich daher als ein relativ energie günstiges Medium für den Gastransport. Im Rahmen von SUGAR wurde von der Linde AG ein verbessertes Verfahren zur Pellet-Produktion entwickelt bei dem nur wenige Prozent des Energiegehalts im Erdgas bei der Pelletierung verbraucht werden. Am IOW wurde in Laborexperimenten nachgewiesen, dass die Pellets von einer dünnen Eisschicht belegt sind, die für ihre Stabilisierung sorgt. Die BASF untersucht, ob die Pellets durch Polymereinsatz weiter stabilisiert werden können. Keine der eingesetzten Polymere führte jedoch zu einer nennenswerten Stabilisierung. Die Meyer Werft konzipierte ein geeignetes Transportschiff für die Pellets und die FH Kiel plante eine Anlage für den Pellet-Umschlag. Die Sicherheitsaspekte und die mögliche Zertifizierung der neuen Verfahren wurden vom Germanischen Lloyd bearbeitet. Weiterhin schätzte die Linde AG die Kosten für die Pelletierung, den Pellet-Umschlag und den Transport ab. Die Kosten wurden in einem zweiten Schritt mit den Kosten alternativer Gastransportverfahren verglichen. Dabei zeigte sich, dass der Gastransport in Form von LNG und komprimiertem Gas für die meisten Szenarien deutlich wirtschaftlicher und sicherer ist als der Gastransport in Pelletform. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu anderen weniger fundierten Studien, die zuvor von norwegischen und japanischen Wissenschaftlern veröffentlicht wurden. Zudem zeigten die Laborstudien, dass die Pellets beim Transport schnell versintern, wodurch die Entladung entscheidend erschwert wird. Das Konzept wird daher in der zweiten Phase des SUGAR-Projekts nicht weiter verfolgt.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Das SUGAR-Projekt blickt auf eine ungewöhnlich erfolgreiche erste Phase zurück. Im Bereich Exploration (Teilprojekte A1 – A4) wurde eine Vielzahl an neuen Geräten und Verfahren für das Aufspüren und die Vermessungen von Gashydratvorkommen entwickelt, gebaut und im Feld eingesetzt. Zudem wurde erstmals eine kommerzielle Software für die Vorhersage der Gashydratverteilung im Untergrund entwickelt. Das SUGAR-Projekt nimmt mit diesem Explorationspaket eine weltweite Spitzenposition in der Erkundung von Gashydratvorkommen ein. Zudem wurden vielversprechende neue Ansätze für die Erdgasgewinnung aus Gashydraten bei gleichzeitiger Speicherung von CO₂ entwickelt und patentiert (Teilprojekte B1 – B2), die es ermöglichen werden, Gashydratvorkommen wirtschaftlich zu nutzen. Die beteiligten Firmen entwickelten im Rahmen von SUGAR neue Ansätze und Produkte mit klaren Alleinstellungsmerkmalen, die weltweit vermarktet werden können.

In der zweiten Phase des SUGAR-Projekts, die seit Sommer 2011 läuft, wird auf diese Erfolge aufgesetzt. Die Spitzenposition im Bereich Exploration soll durch die weitere Verbesserung der seegängigen Geräte, der Datenauswertungsverfahren und Vorhersagemodelle ausgebaut werden. Zudem sollen die chemischen Ansätze zur Gashydratzersetzung im Untergrund im Labor und am Computer weiterentwickelt werden, um die Erdgasförderraten auf deutlich mehr als 100 000 Nm³ pro Tag zu erhöhen und damit eine wirtschaftliche Nutzung der Gashydratvorkommen zu ermöglichen. Weiterhin wird in der zweiten Phase an neuen Bohr- und Erschließungstechnologien gearbeitet. Es ist zwar mit konventioneller Fördertechnik möglich, Erdgas aus Gashydraten zu gewinnen, nachdem das Hydrat im Untergrund in Gas verwandelt wurde. Die verfügbare Förder- und Bohrtechnik ist jedoch auf Fördertiefen von mehreren Kilometern ausgelegt während die Gashydrate meist in nur wenigen Hundert Metern Sedimenttiefe anzutreffen sind. Durch speziell angepasste Fördertechnik sollen hier einerseits Kosten gespart und andererseits den Gashydrat-spezifischen Sicherheitsaspekten Genüge getan werden. Schließlich wird die zweite Phase genutzt, um einen internationalen Produktionstest vorzubereiten, in dem abschließend die SUGAR-Fördertechnologien am Meeresboden getestet werden sollen.

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

