



STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2019

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER 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 und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber und Vertrieb

Forschungszentrum Jülich GmbH

Zentralbibliothek, Verlag

D-52425 Jülich

Telefon 02461 61 - 53 68

Telefax 02461 61 - 61 03

E-Mail zb-publikation@fz-juelich.de

Internet www.fz-juelich.de/zb

Satz und Layout

Projektträger Jülich

Bildnachweis

©Horst Gerlach/iStock

Druck

Weiss-Druck GmbH & Co.KG, Monschau

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-95806-439-3

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JuSER) unter:
www.fz-juelich.de/zb/openaccess.

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.

STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2019

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH



GRUSSWORT

Die aktuelle Situation der maritimen Branche ist geprägt durch rasche Veränderungen und eine hohe Dynamik. Zwei wichtige auslösende Faktoren hierfür sind die fortschreitende Digitalisierung und sich verändernde Rahmenbedingungen, motiviert durch Umweltschutz und Klimawandel.

Ich bin davon überzeugt, dass wir nur dann auf unvorhersehbare künftige Ereignisse gut vorbereitet sein werden, wenn wir heute darauf setzen, neue Fähigkeiten und Technologien zu entwickeln. Denn in einer Phase, in der es keine langen Planungshorizonte gibt, kommt es umso mehr auf Vorsorge an.

Die Bundesregierung hat das erkannt und deshalb im Finanzplanzeitraum 2020–2023 das Maritime Forschungsprogramm auf etwa 191 Mio. € aufgestockt.

Mit der einmal jährlich stattfindenden Statustagung bietet das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) eine Informations- und Diskussionsplattform an, auf der sich Vertreterinnen und Vertreter der maritimen Branche austauschen und sich über die jüngsten Forschungsergebnisse informieren können. Denn nur durch die Vernetzung der Branche untereinander und über Sektorgrenzen hinaus ist es möglich, wirtschaftliche Potenziale voll zur Entfaltung zu bringen.

Die Statustagung ist ein Spiegel aktueller Technologietrends innerhalb der maritimen Branche. Die Themen Automatisierung und das autonome Schiff haben im vergangenen Jahr massiv an Fahrt aufgenommen. Darum widmen wir uns im Rahmen der diesjährigen Podiumsdiskussion dem Thema „Auf dem Weg zum autonomen Schiff – Technologien und Rahmenbedingungen“.

Diesem Tagungsband entnehmen Sie interessante Forschungsergebnisse ausgewählter, maritimer Projekte, die das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert hat. Ich wünsche Ihnen viel Freude und neue Impulse beim Studieren dieses Tagungsbandes.

Norbert Brackmann

Koordinator der Bundesregierung für die maritime Wirtschaft

INHALTSVERZEICHNIS

MEmBran

**MODELLIERUNG VON EMISSIONEN UND BRENNSTOFFVERBRAUCH
BEIM MANÖVRIEREN VON SCHIFFEN**

11

HAUPTAUTOREN:
NILS KÜLPER
F. DAHMS
GERD MILBRANDT
GEORG FINGER

WEITERE AUTOREN:
DIRK DREISSIG, AIKE DIRKS, OLIVER SCHRÖDER,
CLAUS BORNHORST, MICHAEL RESKA, JÜRGEN NOCKE
EGON HASSEL, MICHÈL SCHAUB

IMOKAT

**ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN METHANOXYDATIONS-KATALYSATORS
ZUR SENKUNG DER ABGASEMISSIONEN VON SCHIFFEN IM GASBETRIEB**

27

JOHANNES RAAB
FRANZ KOSCHANY
ANDREAS DÖRING
CLARA WATERMANN
HEIKO LOHMANN
STEFAN KALUZA
MARTIN MUHLER
KAI-OLAF HINRICHSSEN

SHAKERKÜHLUNG

SHAKERKÜHLUNG IN GASMOTORENKOLBEN FÜR DEN MARITIMEN EINSATZ

39

SEBASTIAN OHLER
THOMAS MEIER
SIEGFRIED BLUDSZUWEIT
SLAWOMIR CHROBAK

BASALTFASERFLOCK

**BEFLOCKUNGSTECHNOLOGIE FÜR MARITIME BAUKÖRPER PRÜFUNG VON
WIRKUNG UND ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON BASALTFASERN**

55

JÖRG ZSCHÄTZSCH
BERND DAEHNE
MARLIES GÜNTHER
STEFFEN DIETSCH
KLAUS HEINEMANN
TORSTEN BLUM
TORSTEN KUNZ

FINISH			
EXAKTE UND SCHNELLE GEOMETRIERFASSUNG SOWIE DATENAUSWERTUNG VON SCHIFFSOBERFLÄCHEN FÜR EFFIZIENTE BESCHICHTUNGSPROZESSE	63		
BERNHARD URBAN AARON BACHMANN JAN STEINMETZ-HELLERSTEDT CHRISTIAN HESSE INGO NEUMANN JENS HARTMANN VOLKER BÖSS ROBERT KENNEWEG MICHAEL GEIST FABIAN GIERCHNER TINA AMBROSAT			
HYKOPS			
ENTWICKLUNG EINES FRAMEWORKS ZUM ENTWURF HYDRODYNAMISCHER KOMPONENTEN FÜR INNOVATIVE MANÖVRIER- UND PROPULSIONSORGANE	77		
THOMAS STOYE ANDRÉ KLEINWÄCHTER CLEMENS NEITZEL-PETERSEN			
PRICE			
VORHERSAGE VON EIS-SCHIFF-INTERAKTION (PREDICTION OF ICE-SHIP INTERACTION)	95		
ADELE LÜBCKE MALTE HAHN LARS JOHNSEN THOMAS RUNG SÖREN EHLERS MICHAEL HUISMAN SANDRO ERCEG HENRIK ALPO SJÖBLOM WEI CHAI BERNT J. LEIRA			
COMOGEAR			
CONDITION MONITORING OF MARINE GEARBOXES BASED ON WIRELESS SENSOR NODES	109		
THOMAS KRUSE ALEXANDER POSCHKE JONAS ESCH DIANA KETTNER PETER PEITSCH			
MOPS			
METHODENBANKSYSTEM FÜR OFFSHORE- UND POLARSYSTEME	121		
STEFAN KRÜGER OLIVER LORKOWSKI ADELE LÜBCKE HENDRIK VORHÄLTER KLAAS OLTSMANN			
MARESX			
MARITIMES RADAR MIT ELEKTRONISCHER STRAHLSCHWENKUNG IM S- UND X-BAND	133		
ARNE F. JACOB NILS HANSEN STEFAN RADZUEWSKI JAN-PHILIP MOHNCKE AXEL SCHAAB CARSTEN REITER PETER NÖCKER KAY KALLERHOFF			
HERMES			
WEITERENTWICKLUNG DER HARMONISCH-ERREGTE-ROLLSCHWINGUNG-METHODE ZUR BESTIMMUNG DER ROLLDÄMPFUNG UND DER PROPULSIONS-LEISTUNG VON ROLLENDEN SCHIFFEN MIT UND OHNE DÄMPFUNGSTANKS ZUR OPTIMIERUNG DER SCHIFFSBETRIEBSKOSTEN UND SCHIFFSSICHERHEIT	145		
BASTIAN MARQUARDT ARNDT SCHUMACHER PATRICK SUMISLAWSKI SMOUSTafa ABDEL-MAKSOUd			
INNOSHIP			
ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN MEHRZWECKSCHIFFES FÜR WARTUNG UND REPARATUR VON OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN	163		
ROLF ROHDEN PROJEKTPARTNER: MICHAEL PALM OUD EL MOCTAR			
HYSTOH			
OPTIMIERUNG EINES HALBTAUSCHERS FÜR OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN	173		
MELANIE ABBONDANZIERI TILO KLEIN TORSTEN FREY PAUL MÜLLER			

MEMBRAN – MODELLIERUNG VON EMISSIONEN UND BRENNSTOFF- VERBRAUCH BEIM MANÖVRIEREN VON SCHIFFEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX405

HAUPTAUTOREN:

NILS KÜLPER	MARSIG mbH, Rostock
FELIX DAHMS	Universität Rostock
GERD MILBRADT	Hochschule Wismar
GEORG FINGER	Hochschule Wismar

WEITERE AUTOREN:

DR.-ING. DIRK DREISSIG	MARSIG mbH, Rostock
AIKE DIRKS	Reinmetall Electronics GmbH
OLIVER SCHRÖDER	Reinmetall Electronics GmbH
CLAUS BORNHORST	Reinmetall Electronics GmbH
MICHAEL RESKA	Universität Rostock
DR.-ING. JÜRGEN NOCKE	Universität Rostock
PROF. DR.-ING. HABIL DR. H. C	Universität Rostock
EGON HASSEL	
MICHÈLE SCHAUB	Hochschule Wismar

1. EINLEITUNG

Globales Ziel des Projektes ist die Reduktion von Brennstoffverbrauch und Emissionen in der Seeschifffahrt durch effizienteres und vorausschauendes Navigieren und Manövrieren.

Dieses Ziel sollte zum einen durch neuentwickelte Systeme und Prozesse zur Überwachung, Berichterstattung und Nachweisführung von Brennstoffverbrauch und insbesondere CO₂-Emissionen, sowie zur Performanceüberwachung im operativen und technischen Schiffsbetrieb und zum anderen durch die Modellierung des transienten Maschinenbetriebs und Integration dieses Teilsystems in das Gesamtsystem Schiff in Echtzeit sowie Fast-Time Simulationen erreicht werden.

2. ASSISTENZSYSTEM UND PROZESSE

Ein Schwerpunkt der Projektbearbeitung durch MARSIG und den Projektpartner HAMBURG SÜD lag auf Prozessen zur Überwachung, Berichterstattung und Nachweisführung von Brennstoffverbrauch sowie deren Implementierung in ein Assistenzsystem für die Schiffsführung und beteiligte Personen auf der Landseite. Das Ziel ist die Nachweisführung bezüglich der gesteigerten Energieeffizienz im operativen und technischen

Schiffsbetrieb, unterschieden zwischen absoluten Auswirkungen eines Manövers, sowie dessen relative Auswirkungen in Bezug auf den Reiseverlauf. Die Prozesse und das System wurden gemeinsam von MARSIG und der „Marine & Terminal Operation“ Abteilung bei HAMBURG SÜD bis zum Abschluss der Übernahme durch die MAERSK Gruppe entwickelt. Zum 30.11.2017 wurde bei HAMBURG SÜD der Ausstieg aus der geförder- ten Projektpartnerschaft und damit verbunden, die Wandlung der Rolle zum assoziierten Partner vollzogen. Die Arbeiten wurden anschließend bei MARSIG weitergeführt.

2.1 Zentralisierung der Kommunikation

Das Assistenzsystem bündelt die Kommunikation über Situationen und Vorkommnisse auf der ganzen Reise und erfasst die relevanten Informationen. Das Informationskonzept hinter dem Assistenzsystem soll schiffs- und landseitige, sowie dritte Informationen technisch verknüpfen, systematisch steuern und auswertbar machen. Die Transparenz von entscheidungskritischen Informationen wird an Land wie an Bord verfügbar sein und ein einheitliches Lagebild schaffen.

2.2 Beurteilung und Steuerung

Mit dem Assistenzsystem und den integrierten Prozessen werden auf einem Reiseabschnitt operative Schiffsdaten erfasst und mit den Daten des transparenten Informations- austausch zwischen den involvierten Akteuren auf dem Schiff und an Land verknüpft. Diese Informationen werden durch das System statistisch aufbereitet und erweitern die Beurteilungsprozesse im Zuge einer Störung des geplanten Ablaufs. So können diese Daten als Rahmenbedingungen in der Manöverplanung bzw. der Reiseplanung Berücksichtigung finden. Zusammen mit den operativen Schiffsdaten werden Modelle, wie schiffsspezifischen Leistungskurven, für die Planungsprozesse abgeleitet. Diese Modelle werden innerhalb des Systems im Zuge der Planung, z. B. auf Basis einer Wegpunktliste und Wetterdaten, für Vorhersagen genutzt. Somit kann für jedes Ereignis zu einem bestimmten Zeitpunkt der zusätzliche Treibstoffverbrauch prognostiziert werden.

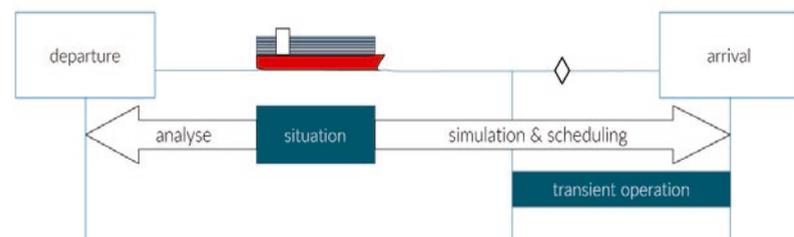


Abb. 1: Prozesse auf einem Reiseabschnitt, die durch das Assistenzsystem unterstützt werden.

2.3 Nachweisführung

Das System erfasst operative Schiffsdaten, Situationen und Vorkommnisse. Die Verknüpfung dieser Daten erweitert die Informationslage über den Reiseverlauf und fördert die Identifizierung von Auswirkungen einzelner Situationen und Vorkommnisse. Diese

Auswirkungen, positiv wie negativ, können durch die Informationen im System gezielter ihren Ursachen zugewiesen werden und in der Nachweisführung berücksichtigt werden. Weiterhin werden diese Daten statistisch erfasst und in Modelle für Planungsprozesse über- führt. Nach Abschluss einer Reise ermöglicht das System den Nachweis der Effizienz des Schiffes auf Basis der definierten Referenzwerte aus der Planung, wobei die statischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

2.4 Einsatz des Systems

Das entwickelte Assistenzsystem wird Ende 2019 an Bord bei assoziierten Partnern eva- luiert. In den Interviews mit beteiligten Akteuren seitens der involvierten Reedereien wurde hervorgehoben, dass die Prozesse mit dem Assistenzsystem Informationen bereit- stellen, die so bisher nicht erfasst werden und sinnvolle Verknüpfungen herstellen. Weitere Langzeiteinsätze sind geplant und sollen mit den assoziierten Partnern realisiert werden, um die Steigerung der Effizienz im operativen Betrieb nachweisen zu können. MARSIG wird die Weiterentwicklung des Assistenzsystems und der Prozesse im Anschluss an das Vorhaben weiterführen und die Ergebnisse in ein Produkt überführen.

3. MODELLIERUNG DES TRANSIENTEN MASCHINENBETRIEB

Der Schwerpunkt der Arbeiten von Reinmetall, Universität Rostock und Hochschule Wismar lag auf der Modellierung des transienten Maschinenbetriebs und der Integration dieses Teilsystems in das Gesamtsystem Schiff in Echtzeit sowie Fast-Time Simulationen. Das Ziel besteht in der Simulation von Emissionsentstehung und Brennstoffverbrauch beim Manövrieren für den praktischen Einsatz in der Lehre und als Assistenzsystem an Bord von Schiffen.

Während die Dynamik von Verbrauch und Emissionen der Hauptmaschinen bei konstanter Geschwindigkeit auf hoher See vergleichsweise gering ausfällt, sind die Betriebszustände beim Manövrieren in Küstenzonen und insbesondere in Hafengebieten stark instationär. Schnell wechselnde Maschinen- und Ruderkommandos zum aktiven Beschleunigen, Bremsen oder Wenden des Schiffes beim Manövrieren resultieren in fluktuierenden Lastanforderungen, wodurch ein erhöhter Verbrauch und Emissionen folgen. So kann ein starkes Beschleunigungskommando zu einer kurzzeitig hohen Ruß- emissionen mit einer unerwünschten, sichtbaren schwarzen Rauchfahne führen (Vgl. Abb. 2).

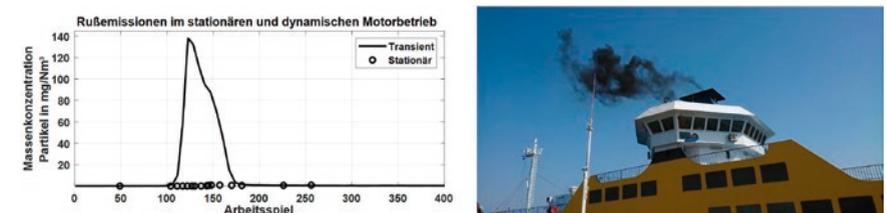


Abb. 2: Exemplarischer Anstieg der Rußemissionen eines typischen, dynamischen Motorbetriebs mit starkem Lastgradienten (links), Resultat: sichtbare schwarze Abgasfahne infolge eines starken Beschleunigungskommandos (rechts)

Das Projekt „MEmBran“ behandelt diese Problematik und beinhaltet hierzu eine detaillierte Betrachtung der instationären Maschinenbetriebszustände während des hochdynamischen Manörierens. Die Bewertung und Prädiktion verschiedener Manöverstrategien verspricht Potential zur Senkung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen in der Schifffahrt. Der gewünschte Mehrgewinn besteht schließlich in einem prädiktiven, effizienteren und umweltfreundlicheren Manörieren.

Als Methode zur Untersuchung des dynamischen Betriebes wurde ein Ansatz gewählt, der drei grundsätzliche, unterschiedliche Schwerpunktthemen umfasst: der Realschiffsbetrieb, die Motorprüfstandsversuche an Schiffsdieselmotoren und die Prozesssimulation (vgl. Abb. 3).



Abb. 3: Überblick über die angewandte Methodik zur Untersuchung des dynamischen Hauptmaschinenbetriebes: Referenzmanöver des realen Schiffsbetriebes, Motorprüfstandsversuche, Prozesssimulation

Aus dem realen Schiffsbetrieb eines Referenzversuchsträgers lassen sich im Rahmen von Onboard-Messungen Referenzmanöver und typische Maschinenlastverläufe definieren. Diese kennzeichnen sich im Wesentlichen durch die zeitliche Änderung von Motor-drehmoment und -drehzahl.

Ausgehend von Referenzmanövern wurden umfangreiche experimentelle Versuche an Motorprüfständen durchgeführt, um Messdaten des transienten Motorbetriebes zu generieren.

Diese Messdaten stellen die Basis für die Prozesssimulation dar, indem sie als Randbedingungen dienen sowie zur Modellkalibrierung und -validierung genutzt werden. Die dabei entwickelten detaillierten Modelle werden schließlich in einen Schiffsmaschinensimulator implementiert.

3.1 Potentialanalyse

Um eine Einordnung zu ermöglichen, wieviel Potential hinter dem gewählten Methodenansatz steckt, wurden von der Hochschule Wismar zunächst Manöver durchgeführt und deren Energiebedarf im Simulator berechnet. Ein Augenmerk lag auf der Benutzung verschiedener Assistenzsysteme. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien entwickelt, die erfahrene Seeleute als Probanden abarbeiten mussten. Für jedes Szenario standen den Probanden unterschiedliche Hilfsmittel zur Verfügung. So wurde ein Teil der Szenarien mit dem Einsatz eines Planungstools (MP) zur Erstellung von Manöverpunkten ausge-

führt, ein weiterer Teil der Szenarien erfolgte mit einem Prädiktionswerkzeug (P) zur Vorhersage der Schiffsbewegung während der Fahrt und es gab Szenarien gänzlich ohne Unterstützung durch Assistenzsysteme. In der Simulation wurden folgende, über die Probanden gemittelte Energiebedarfe am Propeller berechnet (vgl. Abb. 4).

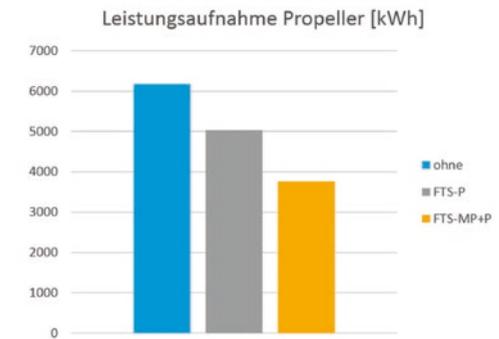


Abb. 4: Energieaufnahme der Propulsionsorgane über die durchgeführten Szenarien in Abhängigkeit von der Unterstützung durch Assistenzsysteme (FTS-P: Prädiktion, FTS-MP: Manöverplanung)

3.2 Referenzmanöver aus dem realen Schiffsbetrieb

Um die Emissionen im realen Schiffsbetrieb und unter Verwendung der realen Versuchsmotoren testen zu können, wurde im ersten Schritt ein gemeinsamer Versuchsträger definiert. Die Erarbeitung von Referenzmanövern bildete die Grundlage für mehrere nachfolgende Abschnitte der Projektbearbeitung. Dabei waren die Referenzen einerseits auf den Umgang mit Antriebsmaschinen im transienten Betrieb bezogen, andererseits auf das Manörieren von Schiffen, welche unter Einsatz dieser Referenz-Maschinenmanöver bewegt werden. Somit galt es frühzeitig reale Messdaten zu den Maschinenmanövern zu erhalten und daraus Referenzmanöver für den Maschinenbetrieb abzuleiten. Aus diesem Grund wurde in der ersten Projektphase daran gearbeitet, Brücken- und Maschinendaten von der Scandlines Fähre „Berlin“ als Versuchsträger in diesem Forschungsvorhaben aufzuzeichnen und auszuwerten. Nähere Daten zu diesem Versuchsträger finden sich nachfolgend (siehe Abb. 5).

Route	Rostock-Gedser
Typ	RoPax
Baujahr	2016
Tonnage	22.319
Werft	FAYARD A/S, Dänemark
Heimathafen	Rostock
Flagge	Deutsch
Motoren	4 Stk. MaK, Typ 9M32CCR 1 Stk. MAN
Energiespeichersystem	1 Stk. Siemens 1.700 kWh
Abgaswäscher	SOx Scrubber 4 x 4.500 kW
KW	19.500
Länge	169,5 m
Breite inkl. Fender	25,4 m
Geschwindigkeit	21 Knoten
PKW Kapazität	460
LKW Kapazität	96
Passagierkapazität	1.300

Abb. 5: Scandlines Hybridfähre „Berlin“ als Versuchsträger des Projektes mit Daten [1]

Ein Beispiel für ein solches Manöver zeigt Abbildung 6. Die Fähre „Berlin“ wendet unmittelbar vor dem Anlegen im Rostocker Hafen.

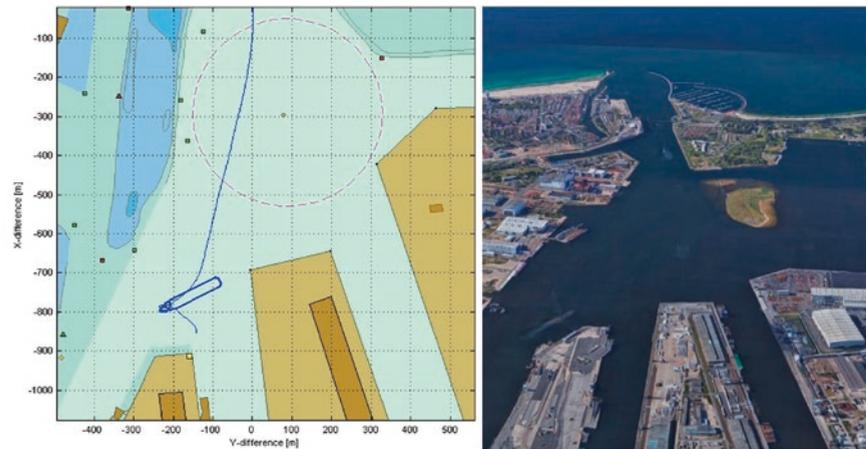


Abb. 6: Trajektorie der Fähre „Berlin“ während der Fahrt zum Liegeplatz im Hafen Rostock (links), Hafen von Rostock (rechts)

Alle Leistungsanforderungen an Bord wie die geforderte Leistung des Backbord-POD-Antriebes oder der Thruster und äußere Einflüsse auf die Schiffsbewegung wie Wind (vgl. Abb. 7) beeinflussen das Verhalten der Schiffsmotoren. Deren Automatisierungsanlage und Steuergeräte müssen Drehzahl und Drehmoment anpassen, um die erforderlichen Einstellungen zu erfüllen.

Alle Schiffsmanöver werden durch Reihenfolgen von Ruder-, Triebwerks- oder Motorbefehlen definiert. Der Motorbefehl stellt die erforderliche Motordrehzahl (Motordrehzahl) oder die Propellerteilung ein. Neue Steuerbefehle oder Ruderwinklereinstellungen führen zu einem neuen Widerstand des Schiffsrumpfs. Dadurch ändern sich die Geschwindigkeitskomponenten des Schiffes, die ihrerseits das Propellermoment beeinflussen. Das Propellermoment ist das Gegenmoment des Motors. Ein Ungleichgewicht zwischen Motor- und Propellermoment führt zu einer kurzzeitigen Änderung der Motorparameter. Schließlich hängt die Abgaszusammensetzung vom transienten Motorverhalten ab.

Zur Bestimmung eines realen Lastpunktes eines Motors im Gesamtsystem Schiff ist es nötig, die äußeren Maschinendaten im laufenden Betrieb zu kennen. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens eine Schnittstelle zum Automatisierungscomputer des Fährschiffes „Berlin“ hergestellt. Mit einer am Bereich Seefahrt entwickelten Software wurde es möglich, Daten in der Taktung von 1 Hz zu erfassen. Somit können sowohl die äußeren Navigationsdaten eines Schiffes, wie beispielsweise Geschwindigkeit, Stellung der Engine Order Telegraphen und Ruderkommandos, erfasst werden, als auch die direkten Auswirkungen wie Kraftstoffverbrauch, Ladeluftdruck, Drehzahl und Motormoment. Dies ermöglicht nicht nur eine Methode zur Auswertung

des Fahrprofils der einzelnen nautischen Schiffsoffiziere, sondern bietet auch ein Werkzeug zur Optimierung.

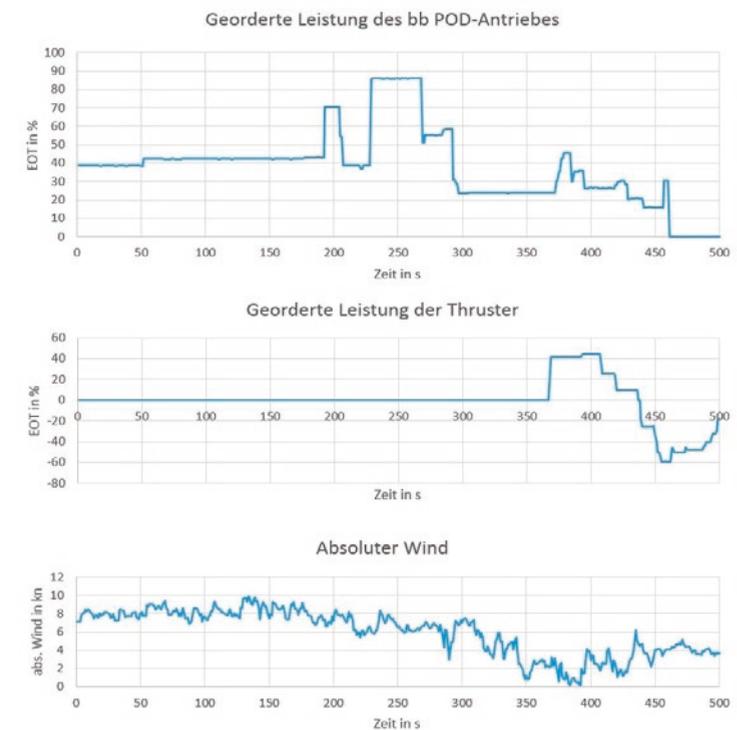


Abb. 7: EOT Verlauf für den Backbord POD, EOT für die Thruster und die Stärke des absoluten Windes während der Fahrt der Fähre „Berlin“ zum Liegeplatz im Hafen Rostock.

3.3 Motorprüfstandsversuche zur Charakterisierung des transienten Motorbetriebes

Die Prüfstandsversuche wurden zum einen an einem Forschungsprüfstand der FVTR GmbH, der auf einem Motor Caterpillar MaK 6M20 basiert, in Zusammenarbeit mit der Universität Rostock durchgeführt. Und zum anderen an einem Betriebsprüfstand der Hochschule Wismar mit einem MAN B & W 4-Takt Schiffsdieselmotor, dessen Ausrüstung moderner Hochseeschiffe entspricht, durchgeführt. Die jeweiligen Motordaten sind nachfolgender Tabelle entnehmbar.

Der Schwerpunkt der Messungen lag neben Indizierdaten (Kurbelwinkelaufgelöster Zylinderdruck, Ladedruck, Abgasgegendruck, Drehmoment und Drehzahl) auf dem Kraftstoffverbrauch und der Abgaszusammensetzung inklusive Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) sowie der Schadstoffemissionen Stickoxide (NOX) und Feinstaubpartikel (PM). Umfangreiche detaillierte und hochaufgelöste Messdaten konnten so generiert und für die Charakterisierung des transienten Motorbetriebes genutzt werden. Die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten oblag der Universität Rostock bzw. der Hochschule Wismar.

Tabelle 1: Spezifikationen der für die Versuche zum transienten Motorbetrieb eingesetzten Prüfstandmotoren

Bezeichnung	Forschungsmotor basierend auf einem Caterpillar MaK 6M20 CR	Betriebsprüfstand basierend auf einem MAN B & W L23/30
Typ	Mittelschnelllaufender 4-Takt Schiffsdieselmotor	Mittelschnelllaufender 4-Takt Schiffsdieselmotor
Bauform	6 Zylinder in Reihe	6 Zylinder in Reihe
Einspritzsystem	Common-Rail	Pumpe-Leitung-Düse
Hub/Bohrung	300 mm/200 mm	300 mm/225 mm
Hubvolumen	56,4 l (9,4 l/Zyl.)	71,4 l (11,9 l/Zyl.)
Verdichtungsverhältnis	14,8	13,5
Nennleistung	1020 kW (170 kW/Zyl.)	960 kW
Nenndrehzahl	1000 min ⁻¹	900 min ⁻¹
Effektiver Mitteldruck	21,7 bar	17,9 bar



Die Verläufe des transienten Motorbetriebs, bei denen sich die Betriebspunkte zeitlich ändern, wurden dabei mit Stationärbetriebspunkten verglichen, bei denen der Lastpunkt konstant gehalten wird. Exemplarisch wird dies für diesen Beitrag für einen Motorhochlauf auf der Generatorkennlinie (konstante Drehzahl) gezeigt, bei dem die Last innerhalb von etwa 25 Sekunden von 5% auf 40% Last vergleichsweise moderat erhöht wird (vgl. Abb. 8). Eine detaillierte Abhandlung dieser Thematik findet sich in [2] und auch [3].

Bedingt durch die Lasterhöhung, die arbeitsspielaufgelöst aufgetragen ist, ist eine höhere Kraftstoffmasse notwendig. Allerdings fällt durch den in diesem Beispiel geringen Lastgradienten der Kraftstoffverbrauch im transienten Betrieb (durchgezogene Linie) im Vergleich zum stationären Motorbetrieb (Punktmarker) nicht signifikant höher aus. Ebenso wird ein Anstieg der Schadstoffemissionen (Stickoxide und Ruß- bzw. Partikelemissionen) deutlich, wobei aus dem transienten Betrieb insbesondere für die Rußemissionen kurzzeitig ein bedeutend höherer Ausstoß infolge der Lasterhöhung resultiert.

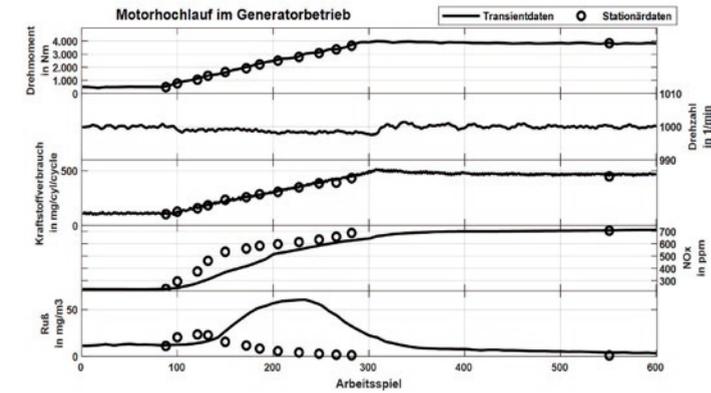


Abb. 8: Exemplarischer Motorhochlauf auf der Generatorkennlinie mit dem Vergleich dieses transienten Motorbetriebs mit Messdaten des stationären Motorbetriebs

3.4 Prozesssimulation

Das nachfolgend dargestellte Gebiet "Prozesssimulation", teilt sich in das Kapitel "Detaillierte Motorprozesssimulation", bearbeitet durch die Universität Rostock und die durch die Hochschule Wismar bearbeiteten Kapitel "Schiffsmodell und Fast-Time Simulation", "Vereinfachtes Motormodell" und "Implementierung und Anwendung der Modelle im Simulator" auf.

3.4.1 Detaillierte Motorprozesssimulation

Ein essentieller Bestandteil des Teilprojektes besteht in der Motorprozesssimulation, die insbesondere eine detaillierte thermodynamische Modellierung des Motorinnenprozesses inklusive umfassender Modellierung von Schadstoffemissionen und des dynamischen Verhaltens aller Motorkomponenten (Turbolader, mechanische Bauteile, Zusatzaggregate) beinhaltet. Der Aufbau des Simulationsmodells für den detaillierten Ansatz mit einigen der Motorkomponenten ist in nachfolgendem Schema abgebildet (vgl. Abbildung 9 links).

Mit diesem Entwicklungsansatz kann die Charakteristik des dynamischen Motorbetriebes, die in den Motorprüfstandsversuchen identifiziert werden konnte, per Motorsimulation hochgenau nachgebildet werden. Das heißt, alle motorischen Randbedingungen, die sich insbesondere im dynamischen Motorbetrieb und anders als im Stationärbetrieb ändern und die Auswirkungen auf die Bedingungen im Brennraum für den Motorprozess haben, werden berücksichtigt. In Konsequenz können der Kraftstoffverbrauch respektive Wirkungsgrad und die Emissionen inklusive Schadstoffe für den transienten Motorbetrieb der Schiffshauptmaschinen vorausberechnet werden kann. Ein Validierungsbeispiel zeigt hierzu exemplarisch das Ergebnis der berechneten Rußemissionen des Simulationsansatzes mit Vergleich der Messdaten der transienten Motorprüfstandsversuche (siehe Abbildung 9: rechts).

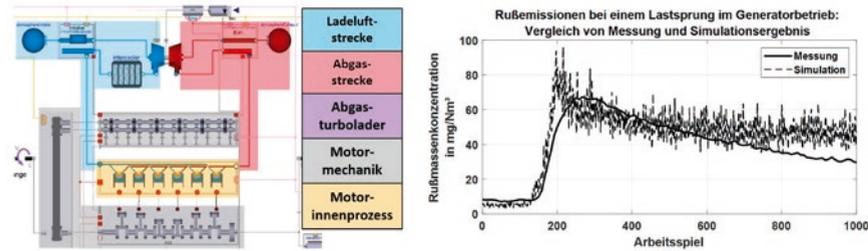


Abb. 9: Schema des Aufbaus der Motormodellierung mit Ladefluft- und Abgasstrecke, Turbolader, Motormechanik und Motorinnenprozessmodell (links), exemplarisches Validierungsbeispiel der mit dem Simulationswerkzeug berechneten Rußemissionen im Vergleich mit den Messungen der Motorprüfstandsversuche (rechts)

Die Schadstoffmodellierung erfolgt zum einen mittels detaillierter reaktionskinetisch basierte Modellansätze oder phänomenologischer Modellbildung. So werden für die Bildung von thermischen Stickstoffmonoxid (NO) während der Verbrennung detaillierte Reaktionsmechanismen [4], [5] implementiert, während die Rußemissionen über Zwei-Schritt- [6] oder Mehrschritt-Modelle [7] berechnet werden. Diese werden über die Messdaten der Prüfstandsversuche sowohl für den stationären als auch dynamischen Betrieb kalibriert und validiert.

Für den Einsatz in den Simulatoren sind die komplexen Modelle vor dem Hintergrund notwendiger Kriterien wie Modellrobustheit und Echtzeitfähigkeit nicht geeignet und müssen entsprechend vereinfacht werden. Als erster Schritt sind Methoden wie die Zusammenfassung der Reaktionsmechanismen als Bruttoreaktionsgleichung bereits im detaillierten dynamischen Motorprozessmodell implementiert und getestet. Darüberhinausgehende Schritte werden in einem für die Simulatoranwendung vereinfachten Motorenmodell vollzogen, welches in nachfolgenden Kapiteln beschrieben wird.

3.4.2 Schiffmodell und Fast Time Simulation

Das für die vorliegenden Studien verwendete mathematische Schiffmodell der Hochschule Wismar ermöglicht Bewegungen mit 3 Freiheitsgraden (3 DOF): Längsbewegung, Querbewegung und Rotation um die vertikale Achse. Die erarbeitete datenbasierte Modellierung wurde in ein solches Schiffmodell überführt und bietet die Grundlage eines digitalen Zwillings. Mit SAMMON (Simulation Augmented Manoeuvring, Design & Monitoring System) steht eine leistungsstarke Schiffsmanöversimulationstechnologie zur Verfügung, welche basierend auf einem System von stark nichtlinearen Gleichungen das hydrodynamische Verhalten von Schiffen nachbildet. Verschiedene Schiffstypen können parametrisiert und für Planungs- und Prädiktionszwecke verwendet werden.

Der Kern von SAMMON besteht aus einer Fast-Time Simulationstechnologie (FTS). Innerhalb von nur einer Sekunde Echtzeit lassen sich bis zu 24 Minuten des Simulationsprozesses vorausberechnen. Jede Vorhersage berücksichtigt die aktuellen Zustände der Schiffsbewegung, die Umwelteinflüsse sowie die geordneten Steuerungs- und Antriebswerte.

3.4.3 Vereinfachtes Motorenmodell

Das oben erwähnte HSW-Schiffmodell enthält eine Schnittstelle zu einem vereinfachten Motormodell. Dieses besteht aus einem Lookuptable, welche mit der Eingabe der Soll-Ist-Differenz der Motordrehzahl ein Motormoment ermittelt. Für eine Simulation der Schiffsbewegung ist diese Methode ausreichend. Abbildung 10 (links) zeigt die geordnete Motordrehzahl, das resultierende Motordrehmoment und die resultierende Schiffsgeschwindigkeit mit der herkömmlichen Berechnungsmethode, während Abbildung 10 (rechts) die berechneten Daten der gleichen Beschleunigung basierend auf dem neu implementierten Motormodul zeigt. Im Gegensatz zum tabellengestützten Ansatz basiert die neue Methode auf einem PI-Regler zur Berechnung der erforderlichen Kraftstoffmenge.

Die resultierenden Geschwindigkeitskurven sind annähernd gleich, die Bewegung des Schiffes wird nicht signifikant durch das geänderte Motormodul beeinflusst. Die Motordrehmomentkurven unterscheiden sich jedoch erheblich. Der PI-Regler kann entsprechend dem tatsächlichen Verhalten des Schiffsmotors eingestellt werden. Basierend auf dem resultierenden Kraftstoffverbrauch oder Motormoment und in Kombination mit der Motordrehzahl kann ein datenbasiertes Emissionsmodell für CO₂ erstellt werden.

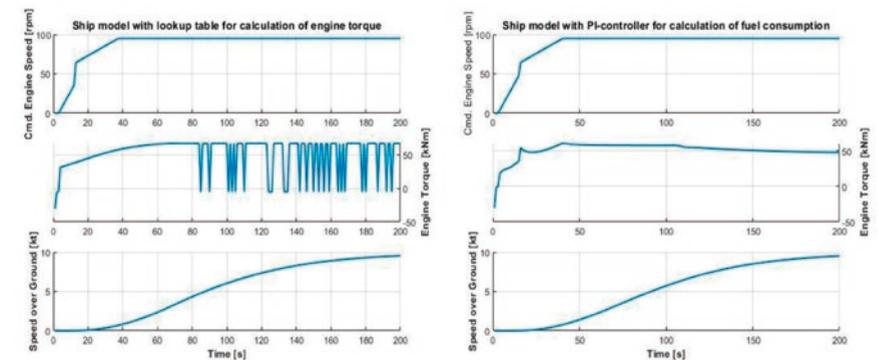


Abb. 10: Zeitverläufe für das fiktive Schiff "MEmBran2HM" bestehend aus Motoren der Prüfstandsversuche mit einfachem (links) und verbessertem Motormodell (rechts)

Das hier vorgestellte Verfahren wird mit Hilfe von Daten aus Prüfstandsversuchen überprüft. So können sehr umfangreiche Daten transienter Motormanöver und zuverlässiger Emissionsmessungen zeitgleich aufgenommen werden. Das hier verwendete Schiffmodell „MEmBran2HM“ ist keine Nachbildung eines echten Schiffes. Dieses fiktive Schiff ist mit zwei Antriebsmotoren vom Typ „Prüfstandmotor 6L23/30“ ausgestattet. In weiteren Untersuchungen mit realen Schiffsdaten muss die hier vorgestellte Methode weiter validiert werden.

Während das zunächst implementierte Modell ausreichend ist, um Aussagen über Brennstoffverbräuche und den daraus folgenden CO₂ Ausstoß zu treffen, ist es zur Berechnung von Stickoxid und Rußemissionen unzureichend. Die Schadstoffmodelle des detaillierten Motorprozessmodells werden entsprechend der Kriterien zur Echtzeitfähigkeit, Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit sowie Modellrobustheit angepasst und vereinfacht.

Ein möglicher Ansatz sind dabei datenbasierte Modelle, welche keine Informationen zu den physikalischen, chemischen oder anderen Gesetzen benötigen, welche die zu modellierenden Prozesse bestimmen. Die Datenbasis muss dabei qualitativ hochwertig sein und möglichst viele Ein- und Ausgabekombinationen abdecken. Derartige Daten können aus Simulationsmodellen oder aus Prüfstandmessungen stammen. Eine weitere Option stellen datenbasierte Modellarchitekturen dar. Dazu wurde im Projekt eine Artificial Neural Network (ANN) -Architektur ausgewählt, welche in Bezug auf Eingangsdimensionen und ihrer relativ guten Interpolationseigenschaften die Auswahlkriterien erfüllen, wie es in projektbezogenen Untersuchungen gezeigt wurde [8]. Eine exemplarische Validierung eines kalibrierten neuronalen Netzes für Partikelemissionen und die Anwendung im Kontext des dynamischen Motorbetriebs sind in Abbildung 11 dargestellt.

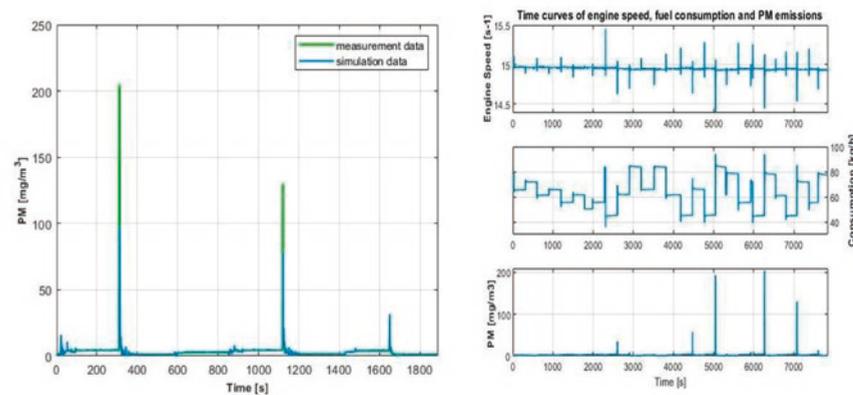


Abb. 11: Exemplarische Validierung eines neuronalen Netzes (links) und Zeitverläufe des dynamischen Motorbetriebes mit Eingabedaten: Motordrehzahl und Ausgabedaten: Rußkonzentration (rechts)

Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass das Abgas im stationären Generatorbetrieb nahezu keine Partikel enthält. Sobald jedoch im dynamischen Betrieb die Motordrehzahl stärker abfällt infolge einer starken Erhöhung des Motordrehmomentes, steigt die Partikelkonzentration auf das Hundertfache der stationären Werte an.

Die vorgestellten Modellansätze werden in Zusammenarbeit mit Rheinmetall Electronics auch in die Simulatoren zur Ausbildung von Schiffsoffizieren (Ship Engine Simulator & Ship Handling Simulator) überführt.

3.4.4 Implementierung und Anwendung im Simulator

Das Projektziel bei der Implementierung und Anwendung im Simulator von Rheinmetall Electronics bestand darin die genauen Emissions- und Brennraummodelle von Universität Rostock und Hochschule Wismar in die Echtzeitsimulation der Full-Mission-Simulatoren zur Ausbildung von Schiffsoffizieren zu integrieren. Als Grundlage dafür wurde eine Simulationsumgebung basierend auf dem Prüfstandmotor der Hochschule Wismar MAN 6L23/30 erstellt [9]. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Darstellung in der Umgebung des Ship Engine Simulator (SES), um den Simulationsteilnehmern eine Entscheidungsbasis zu liefern, die dem Stand der Technik in der Seefahrt entspricht.



Abb. 12: SES - Schiffsmaschinensimulator (links) und SHS – Schiffsbrückensimulator (rechts)

3.5 Schlussfolgerungen

Allgemein konnte durch die in diesem Projektrahmen durchgeführten experimentellen Untersuchungen festgestellt werden, dass starke Lastgradienten der Hauptmaschinen für einen höheren Kraftstoffverbrauch und signifikant höhere Emissionen im transienten Motorbetrieb ursächlich sind. Diese stark dynamischen Lastanforderungen sind insbesondere im Manöverbetrieb von Schiffen unvermeidbar.

Eine Begrenzung der Auswirkungen von Lastsprüngen ist möglich durch eine Entkopplung der antriebsseitigen Energieerzeuger und Verbraucher. Ein erster Schritt erfolgt mit dem Betrieb der Maschinen im Generatormodus als diesel-elektrische Antriebe, der diesbezüglich Vorteile gegenüber dem diesel-mechanischen Antrieb aufweist. Diese ergeben sich unter Anderem bereits daraus, dass die Beschleunigung bewegter Massen bei Drehzahländerungen weitestgehend wegfällt. Ein weiterer Schritt zur antriebsseitigen Entkopplung bezüglich Energieerzeuger- und Verbraucherseite bieten Hybridsysteme mit zusätzlichen Batteriespeichern wie auf dem untersuchten Versuchsträger, der Hybridfähre „Berlin“. Mit einer optimalen Ausnutzung solcher Systeme sind Betriebsstrategien zur Lastspitzenvermeidung (Peak shaving) möglich, deren Untersuchung allerdings nicht Inhalt des hier vorgestellten Projektes ist. Jedoch sind die entwickelten dynamischen Motormodelle ein notwendiger Bestandteil für diesbezüglich denkbare nachfolgende Forschungen [10].

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von starken Lastgradienten wäre ein je nach Manöversituation sensibles Verhalten des Maschinennutzers. Eine solche Sensibilisierung des nautischen Personals ist in der Aus- oder Weiterbildung mit Training an solchen Simulatoren möglich, welche den dynamischen Betrieb entsprechend detailliert abbilden können. Die Weiterentwicklung eines Maschinensimulators zur Prädiktionsfähigkeit von dynamischem Kraftstoffverbrauch und Emissionen war eines der Ziele des vorgestellten Projektes. Die Aus- und Weiterbildung von nautischen Schiffsoffizieren profitiert von einer Verbesserung des bereits bestehenden in diesem Beitrag beschriebenen SAMMON-Systems durch zusätzliche Informationen zum Kraftstoffverbrauch und zu verschiedenen Emissionen wie CO₂, NOX, SOX und PM. Weitere Emissionen können in Zukunft hinzugefügt werden, sobald die vorgestellte Methode für die Aus- und Weiterbildung zugelassen ist. Darüber hinaus bietet die Online-Überwachung von Simulatorschiffen und an Bord mithilfe von Mehrfachvorhersagen eine neue und fundierte Grundlage für die Entscheidungsfindung, da die Konsequenzen jeder Aktion sofort aufgezeigt werden [11].

4. SCHLUSSZUSAMMENFASSUNG

Im MEMBRAN-Projekt wurden Systeme und Prozesse zur Überwachung, Berichterstattung und Nachweisführung für den gesamten Schiffbetrieb entwickelt und die Zusammenhänge für Brennstoffverbrauch und Emissionen im dynamischen Schiffsmaschinenbetrieb charakterisiert und für die Prozesssimulation und Anwendung im Simulator aufbereitet. Das gemeinsame Projektziel besteht in der Reduktion von Brennstoffverbrauch und Emissionen in der Seeschifffahrt durch ein effizienteres und vorausschauendes Navigieren und Manövrieren.

Bei MARSIG wurden, zusammen mit den involvierten Reedereien, ein Assistenzsystem und Prozesse entwickelt, die im Anschluss an das Vorhaben weiterentwickelt und in ein Produkt überführt werden.

Auf Seiten von Rheinmetall Electronics, der Hochschule Wismar und der Universität Rostock wurden basierend auf Referenzmanövern des realen Schiffsbetriebes experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Dazu zählen umfangreiche Prüfstandsversuche des dynamischen Motorbetriebs, deren Ergebnisse für die Entwicklung von Prozesssimulationsmodellen dienen, die schließlich in Maschinensimulatoren zur Aus- und Weiterbildung des nautischen Personals Anwendung finden.

DANKSAGUNG

Das Verbundprojekt MEMBRAN wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ermöglicht. Hierfür möchten sich die Autoren im Namen des gesamten Konsortiums herzlich bedanken. Dieser Dank gilt ebenso den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich für die gute administrative Unterstützung des Vorhabens während der Projektlaufzeit.

Des Weiteren bedankt sich das Konsortium bei den Mitarbeitern der assoziierten Partner Reederei HAMBURG SÜD und SCANDLINES und insbesondere bei der Besatzung der Hybridfähre "BERLIN".

LITERATUR

- [1] <https://www.scandlines.com/about-scandlines/press/press-kit>
- [2] Dahms, F., Reska, M., Püschel, M., Nocke, J., Hassel, E., "Fuel Consumption and Emissions in Transient Operation During Ship Maneuvering", Proceedings of the 2018 Fall Conference of ASME Internal Combustion Engine Division, ICEF2018-9602, November 4-7 2018, San Diego, California, USA. DOI: 10.1115/ICEF2018-9602
- [3] Dahms, F., Reska, M., Nocke, J., Hassel, E., Schaub, M., Reissig, M., "Characterizing of Transient Engine Operation with Investigation on Particle Size Distribution on a Four-Stroke Medium-Speed Engine", CIMAC Congress 2019, June 10-14 2019, Vancouver, Canada
- [4] Zeldovich, J.: „The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions“. Acta physicochim U.R.S.S. 21(4):577-628, 1946.
- [5] Miller, J.; Bowman, C.: „Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion“. Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 15, p. 287-338, 1989.
- [6] Hiroyasu, H. et al.: „Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines“, SAE Technical Paper 760129, 1976.
- [7] Tao, F., Reitz, R. D., Foster, D. E., Liu, Y., „Nine-step phenomenological diesel soot model validated over a wide range of engine conditions“
- [8] Schaub, M., Finger, G., Dahms, F., Hassel, E., Jeinsch, T., Kirchhoff, M.: „Databased prediction of particle emissions during manoeuvring of ships,“ OCEANS Congress 2019, June 17 - 20 2019, Marseille, France
- [9] Finger, G., Schaub, M., Dahms, F., Hassel, E., Riebe, T., Milbradt, G., Wehner, K., „On-Board Support System for the eco-friendly ship operation in coastal and port areas“, OCEANS Congress 2019, June 17-20 2019, Marseille, France
- [10] Baldauf M, Mehdi R., Schaub M, Benedict K, Milbradt G; Finger G, Fischer S (2018): "Simulation-based Support to Minimize Emissions and Improve Energy Efficiency of Ship Operations." In: Ölcer A et al (eds) Trends and Challenges in Maritime Energy Management. Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-74576-3
- [11] Baldauf M, Benedict K, Kirchhoff, M, Schaub M, Gluch M, Fischer S (2018): "Energy-efficient Ship Operation - The Concept of Green Manoeuvring." In: Froholdt LL (ed.) Corporate Social Responsibility in the Maritime Industry. Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-69143-5_11 pp. 185-218

IMOKAT – ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN METHANOXYDATIONS- KATALYSATORS ZUR SENKUNG DER ABGASEMISSIONEN VON SCHIFFEN IM GASBETRIEB

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX438

JOHANNES RAAB	MAN Energy Solutions SE, Augsburg Technische Universität München
DR.-ING. FRANZ KOSCHANY	MAN Energy Solutions SE, Augsburg
ANDREAS DÖRING	MAN Energy Solutions SE, Augsburg
CLARA WATERMANN	Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
DR.-ING. HEIKO LOHMANN	Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
PROF. DR. STEFAN KALUZA	Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen Hochschule Düsseldorf
PROF. DR. MARTIN MUHLER	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Technische Chemie
PROF. DR.-ING. KAI-OLAF HINRICHSSEN	Technische Universität München, Lehrstuhl für Technische Chemie I

1 EINLEITUNG

Durch die Emissionrichtlinie *IMO Tier III* werden maritime NO_x Abgasemissionen stärker begrenzt, um einen wertvollen Beitrag zum Umwelt und Klimaschutz zu leisten. [1] Eine Möglichkeit den Ausstoß an gesundheits- und umweltschädlichen Stoffen wie Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickoxiden (NO_x), Schwefeloxiden (SO_x) oder Feinstaubpartikeln (PM) zu reduzieren, ist der Wechsel von konventionellen Dieselmotoren hin zu Gasmotoren oder Dual Fuel (DF) Motoren. [2] Allein aufgrund des besseren Kohlenstoff zu Wasserstoff Verhältnisses in Natural Gas (NG) lassen sich die CO_2 Emissionen bei der Verwendung von Gasmotoren um etwa 20% verringern. [3]

Bei der Verwendung eines NG-basierten Kraftstoffes treten jedoch neue Herausforderungen zu Tage. Ursächlich dafür ist die unvollständige Verbrennung des Methans (CH_4) und der damit verbundene hohe Anteil an Methan im Abgas. Ein CO_2 Äquivalenzwert von 28 [4] zeigt den großen Einfluss, welchen Methan beim Thema Treibhausgase und globale Erwärmung hat, weshalb die Reduzierung der Methanemission einen entscheidenden Beitrag zur Absenkung von Treibhausgasen leisten kann. Aufgrund der hohen Stabilität von Methan läuft die rein thermische Umwandlung mit Sauerstoff zu CO_2 und Wasser erst bei Temperaturen von weit über 750°C zufriedenstellend ab. [5] Um auch in optimierten Gas und DF Motoren, in denen Temperaturen von 400°C stromabwärts bzw. 550°C stromauf-

wärts der Abgasturbine vorliegen, zufriedenstellende Methanumsätze zu erreichen, sind Katalysatoren nötig, welche die Reaktionstemperatur absenken. Allerdings leiden die aktuell für die Methanoxidation eingesetzten edelmetallhaltigen Katalysatoren unter einer starken Vergiftung aufgrund des im Kraftstoff und Motoröl enthaltenen Schwefels, so dass es noch nicht zu einem Serieneinsatz dieser Katalysatoren bei mager betriebenen Gas oder DF Motoren gekommen ist. Das Ziel des Projekts IMOKAT besteht darin, ein Verfahren zu entwickeln, das den Einsatz edelmetallfreier und damit schwefelresistenter Katalysatoren zur Methanoxidation ermöglicht. Im Gegensatz zur üblichen Oxidation mit Hilfe von im Abgas enthaltenen Sauerstoff werden beim Projekt IMOKAT Stickoxide als Oxidationsmittel eingesetzt.

2 STAND DER TECHNIK

Zur Oxidation von Methan mit Hilfe von Sauerstoff kommen heutzutage typischerweise Katalysatoren zum Einsatz, welche mit Platingruppenmetallen (PGM) beladen werden. Diese, üblicherweise mit Palladium (Pd) oder Platin (Pt) Oxiden versetzten Katalysatoren, erreichen im frischen Zustand Methanumsatzraten von über 90% bei Temperaturen unter 500°C und somit im relevanten Temperaturbereich der Motoren. [6–9] Aufgrund der hohen PGM Beladung in der Größenordnung von 130–200 g/ft³, kombiniert mit dem hohen Preis der Edelmetalle, entfallen ca. 30–70% der Kosten eines Vollmotors allein auf den Edelmetallanteil der Katalysatoren. Betrachtet man die Marktentwicklung der letzten Jahre für Edelmetalle, so sind die Kosten schwer kalkulierbar und unterliegen einer starken Preissteigerung. So hat sich der Preis für Palladium in den letzten zwei Jahren beinahe verdoppelt. [6] Zusätzlich zum bereits angesprochenen Kostenfaktor leiden PGM Katalysatoren häufig unter starker Deaktivierung bei der hydrothermalen Alterung (HTA) und sind anfällig für chemische Vergiftung aus Rückständen im Kraftstoff oder des Schmieröls wie Schwefel, Phosphor oder Zink. [7, 10–15]

Die bekannten Probleme der PGM Katalysatoren sind trotz jahrzehntelanger Forschung auch heute noch nicht abschließend gelöst und weiterhin Gegenstand der Forschung. Hierbei werden sowohl die Grundstabilität des Katalysatormaterials als auch mögliche Regenerationszyklen in Betracht gezogen.

Zur Verringerung der nötigen PGM Beladung wird beispielsweise ein Einbau des Katalysators stromaufwärts der Abgasturbine vorgeschlagen, da an dieser Stelle im Abgastrakt höhere Temperaturen herrschen. Aktuelle Studien zur Methanumsatzrate von PGM Katalysatoren unter Bedingungen wie sie vor der Turbine herrschen zeigen hohe Methanumsatzraten, das Problem der starken Deaktivierung durch Schwefel im Kraftstoff besteht jedoch weiterhin. [16]

Besonders die Deaktivierung des Katalysators durch bereits äußerst geringe Mengen Schwefel im Abgas stellt ein Problem dar. Daher werden vielfältige Regenerationsstrategien untersucht, um die Aktivität des verbauten PGM Katalysators wiederherzustellen. Eine Regenerationsmöglichkeit ist, Wasserstoff oder einen länger-kettigen Kohlenwasser-

stoff zuzugeben und am Katalysator reduzierende Bedingungen herzustellen. Dadurch leidet jedoch die Effizienz des Gesamtsystems und es entstehen kurzzeitig höhere Abgasemissionen. Abbildung 1 zeigt die sofort einsetzende Deaktivierung eines PGM Katalysators bereits unter dem Einfluss von lediglich 0,5 ppm SO₂ sowie die anschließende Regeneration durch ein pulsierendes Dosieren von Propan zum Gasgemisch. [17]

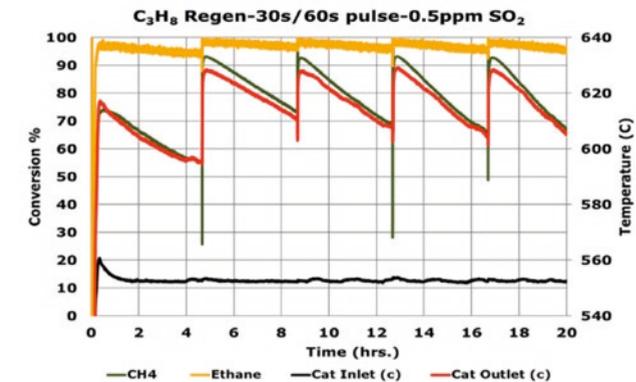


Abb. 1: Verlaufskurve zur Regeneration eines unter SO₂-Deaktivierung leidenden PGM Katalysators mittels Propan. [17]

Nachteilig ist zudem, dass das Schiff zusätzlich Propan mit sich führen muss, da der Katalysator nicht mit Hilfe des als Kraftstoffs eingesetzten Methans vollständig regeneriert werden kann. [17]

Ein erhöhter Kraftstoffverbrauch, damit einhergehende höhere Betriebskosten und vermehrter – wenn auch kurzzeitiger – Ausstoß von Kohlenwasserstoff und H₂S Emissionen, ist ein wesentlicher Faktor bei der Betrachtung von Regenerationsmodellen. Auch bei der von Majed Shreka et al. vorgestellten Plasma-induzierten Regenerationsstrategie muss die zur Regeneration notwendige elektrische Energie zuerst erzeugt werden. [18] Wie bereits oben beschrieben, kommen bei dem in IMOKAT untersuchten Verfahren vom Motor generierte Stickoxide als Oxidationsmittel zum Einsatz. Dies ermöglicht den bis dato nicht möglichen Einsatz von edelmetallfreien Katalysatoren zur Methanoxidation.

3 KATALYSATORFORSCHUNG AM FRAUNHOFER INSTITUT UMSICHT

Da Metalloxide im Vergleich zu edelmetallbasierten Katalysatoren eine kostengünstige Alternative darstellen, wurden derartige Systeme am Fraunhofer UMSICHT genauer untersucht. Die Spanne reicht hierbei von Cobalt/Nickel-Mischoxid-Katalysatoren, welche schon von Shao et al. im Temperaturbereich von 390 bis 437°C erprobt worden sind und dabei Umsätze von 90% erreicht haben, [19] über Cer-haltige Mischoxide (z. B. MnOx – CeO₂), [20] bis hin zu metallhaltigen Zeolithen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Katalysatorsysteme mit Cobalt, Mangan und Cer durch Kofällung synthetisiert. Hierbei handelt es sich um CoNi, MnNi, CeMn und CeMnCo Mischoxide sowie das oben erwähnte Mischsystem aus MnOx und ZrO₂. Zudem wurde mittels Ionenaustausch ein Übergangsmetallhaltiger Zeolith präpariert. Die so entstandenen Katalysatorsysteme wurden im Teststand, siehe Abbildung 2, mit einer Gas Mischung aus 10 % Sauerstoff, 10 % Wasser, 500 ppm Methan in Argon untersucht. Auf diese Weise konnte ein erster Überblick über die jeweilige Methanoxidationsrate gewonnen werden.



Abb. 2: Katalysator-teststand zur Bestimmung des Methanumsatzes.

Abbildung 3 zeigt den Methanumsatz der getesteten Katalysatorsysteme aufgetragen gegen die Zeit und über eine Temperaturrampe. Der CoNi Katalysator erreicht bereits bei 500°C Vollumsatz, wohingegen die Umsatzraten der Systeme CeMn und MnZrO₂ bei der gleichen Temperatur ca. 40% betragen. Der Übergangsmetallhaltige Zeolith erreicht nur 1% Umsatz.

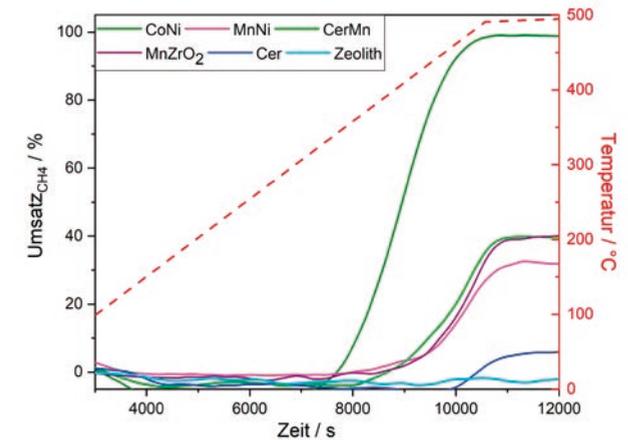


Abb. 3: Methanumsatz verschiedener Katalysatorsysteme in Abhängigkeit der Temperatur (rot gestrichelter Graph: Temperaturrampe).

Mischt man dem Katalysatorsystem außer Cer und Mangan auch noch Cobalt bei, so führt dies zu einer Steigerung des Umsatzes auf 50% (siehe Abbildung 4).

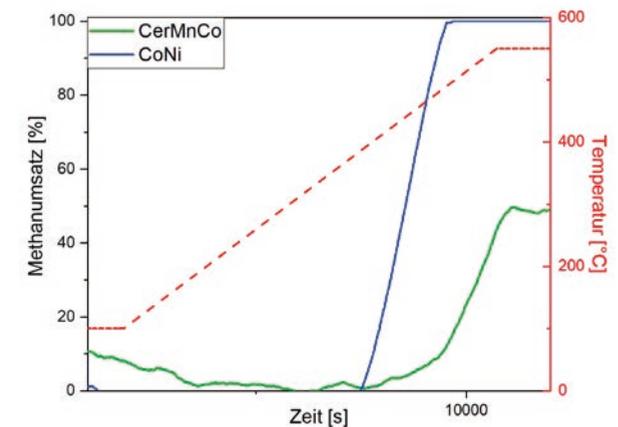


Abb. 4: Methanumsatz der frischen CeMnCo- und CoNi-Katalysatorsysteme in Abhängigkeit der Temperatur (rot gestrichelter Graph: Temperaturrampe).

Auch wenn der CoNi Katalysator sehr hohe Aktivität zeigt und dementsprechend für die technische Anwendung reizvoll wäre, so wurde aufgrund der gesundheitsschädlichen Eigenschaften von Nickel nach unbedenklichen Alternativen gesucht.

Als besonders aussichtsreiche Alternative wurden zwei verschiedene, cerhaltige Katalysatorsysteme identifiziert und synthetisiert. Das System 1, bestehend aus Cer, Mangan und Cobalt, wurde durch Variation der Metallverhältnisse in vier unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt. System 2 besteht nur aus Cer und Mangan. Durch unterschiedliche Cer/Mangan Verhältnisse wurden hier fünf Variationen für einen Umsatztest synthetisiert.

Abbildung 5 zeigt die vier CeMnCo Systeme im frischen Zustand im Vergleich. Ihre Methanumsätze bei 550°C wurden gegeneinander aufgetragen und der höchste, erreichte Umsatz liegt bei 40%. Dies wurde mit einem Katalysatorsystem erzielt, welches einen moderaten Anteil an Cer aufweist. Eine zu hohe oder zu geringe Beimischung von Cer führt zu einem Rückgang des Methanumsatzes.

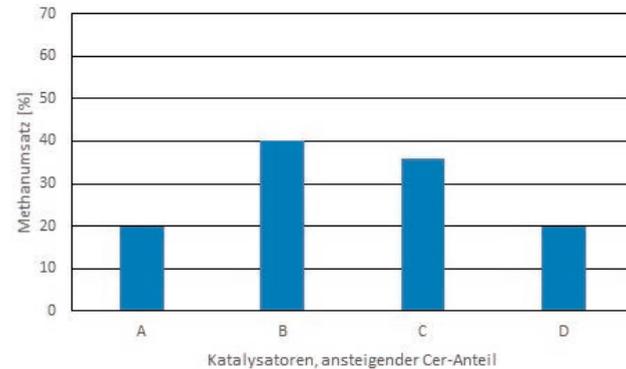


Abb. 5: Methanumsatz der frischen CeMnCo- in Abhängigkeit der Zusammensetzung).

In Abbildung 6 sind die Methanumsätze der CeMn Katalysatorsysteme, ebenfalls bei 550°C, abgebildet. Mit steigendem Cer Anteil nimmt die Aktivität ab, so dass der höchste Umsatz von 60% bei dem Katalysatorsystem mit dem geringsten Cer Anteil erzielt wurde.

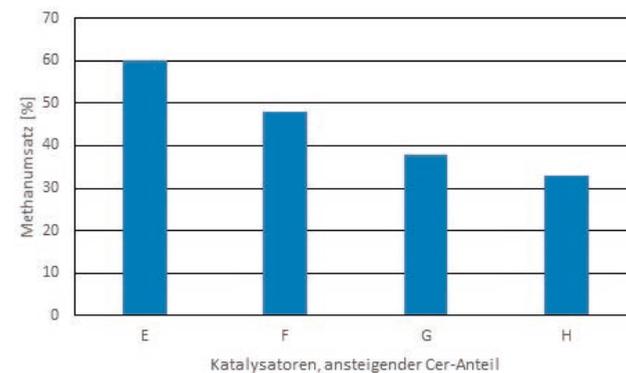


Abb. 6: Methanumsatz der frischen CeMn-Katalysatorsysteme in Abhängigkeit der Zusammensetzung.

4 KATALYSATORFORSCHUNG BEI MAN ENERGY SOLUTIONS SE

Parallel zu den von Fraunhofer UMSICHT durchgeführten Arbeiten zur Synthese und Erforschung von neuartigen Katalysatorsystemen wurden von MAN Energy Solutions weitere Wabenkatalysatoren in das Projekt eingebracht und untersucht. Die Aktivität eines Katalysators wird zuerst am Methanumsatz im Frischzustand gemessen. Hierzu werden mittels Kernbohrer aus den Katalysatorwaben Proben entnommen, welche im Synthesegasprüfstand verbaut und untersucht werden können. Hierbei lassen sich Gaszusammensetzungen und Temperaturen verändern, um Verhältnisse herzustellen, welche die im Abgastrakt eines Motors repräsentieren.

Die Gaszusammensetzung vor und nach Katalysator wird mittels FT-IR gemessen. Daraus ergeben sich Rückschlüsse auf das katalytische Verhalten des jeweiligen Materials. Die Umsätze der getesteten Katalysatoren werden mit denen eines PGM Katalysators mit der Beladung 150g/ft³ verglichen um Aussagen über ihre Leistungsfähigkeit zu treffen. Hierzu wurde ein standardisiertes Messprogramm entwickelt, um die Methanumsatzraten der Katalysatoren vergleichen zu können.

4.1 DIE FRISCHAKTIVITÄT

Die von MAN Energy Solutions vermessenen Katalysatoren lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Edelmetallhaltige Referenzkatalysatoren sowie edelmetallfreie Katalysatorsysteme, welche unter anderem vom Projektpartner Fraunhofer UMSICHT bereitgestellt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass der PGM Referenzkatalysator I in frischem Zustand, und bei entsprechenden Temperaturen, Vollumsatz zeigt. Dies lässt sich durch die hohe Beladung mit Edelmetall erklären. Die besten hier untersuchten edelmetallfreien Systeme kommen bei gleichen Bedingungen im Frischzustand auf ca. 90% Methanumsatz und bieten damit bereits eine gute Grundlage für weitere Forschung und Optimierung der Systeme. Besonders zu beobachten ist auch eine hohe Temperaturabhängigkeit, weswegen die zuvor bereits angesprochene Platzierung des Katalysators stromaufwärts der Abgasturbine notwendig ist, um die dort herrschenden hohen Temperaturen zur Verbesserung der katalytischen Methanumsetzung zu nutzen. Abbildung 7 zeigt ein Umsatzdiagramm für eine Auswahl von sechs getesteten Katalysatoren bezogen auf das edelmetallhaltige Referenzsystem I. Die Katalysatoren K, L und N sind edelmetallfreie Katalysatoren. Ein mit Katalysatormaterial von Fraunhofer UMSICHT beschichtetes Katalysatorsubstrat M zeigte auch bereits vielversprechende Ansätze, weshalb die Forschung in diesem Bereich intensiviert wurde und zu den bereits zuvor gezeigten Ergebnissen führte. Katalysator O ist ein edelmetallhaltiger Oxidationskatalysator mit geringerer PGM Beladung, wie sie häufig als Diesel Oxidations Katalysator (DOC) eingesetzt werden. Insgesamt wurden von MAN 13 Katalysatoren unterschiedlicher Art getestet.

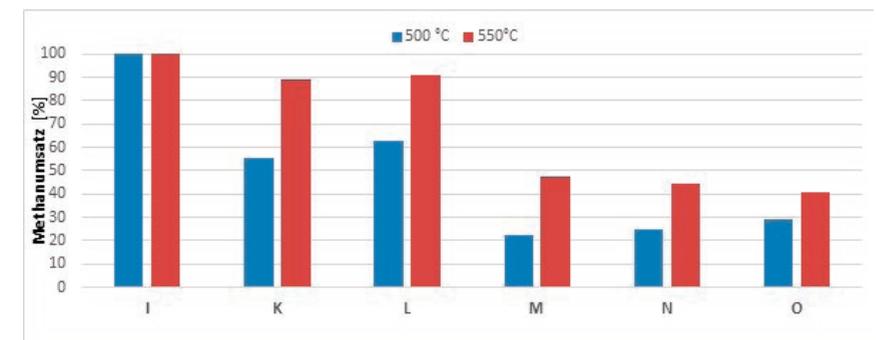


Abb. 7: Methanumsatzraten einer Auswahl an getesteten Katalysatorsystemen im Frischzustand und bei gleichen Reaktionsbedingungen.

Neben der in Abbildung 7 bereits herausgestellten Temperaturabhängigkeit, zeigten die Versuche auch den Einfluss von NO_x auf die Umsatzraten. Mit steigendem NO_x/CH_4 -Verhältnis, steigen auch die Umsatzraten, wie in Abbildung 8 dargestellt, an.

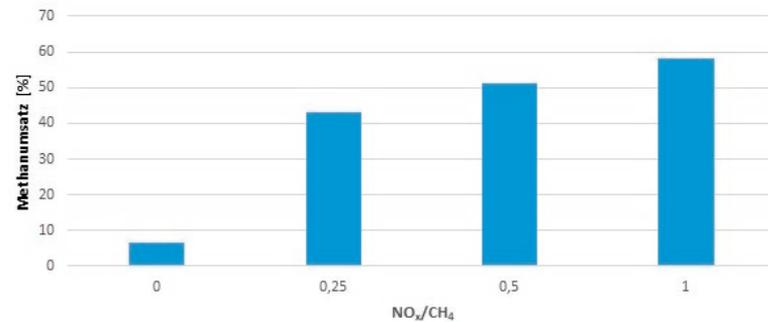


Abb. 8: Methanumsatzraten des Katalysators K in Abhängigkeit des NO_x/CH_4 Verhältnisses gemessen bei 500°C .

Hier zeigt sich jedoch auch, dass die Zunahme des Methanumsatzes nicht direkt proportional zum steigenden NO_x/CH_4 Verhältnis ist, jedoch ohne NO_x der Methanumsatz äußerst gering ausfällt.

4.2 HYDROTHERMALE BESTÄNDIGKEIT

Ein wichtiger Faktor in der Wirksamkeit eines Katalysators ist seine Beständigkeit bei längerem Betrieb. Um hierüber eine Aussage treffen zu können, wurden die Katalysatoren nach der Frischvermessung für 100 Stunden bei 600°C im Luftstrom mit 10% Wasser gealtert und anschließend erneut getestet. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der hydrothermalen Alterung (HTA) für das Katalysatorsystem K.

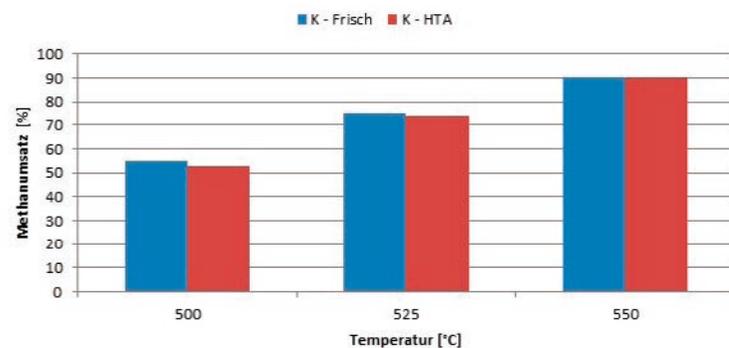


Abb. 9: Ergebnisse der hydrothermalen Alterung. Alterung durchgeführt bei 600°C mit 10% H_2O .

Im Gegensatz zu PGM-basierten Methanoxidationskatalysatoren ist der in Abbildung 9 dargestellte Katalysator K über den gesamten vermessenen Temperaturbereich stabil gegenüber hydrothormaler Alterung.

4.3 SCHWEFELALTERUNG

Auch wenn der Schwefelanteil in Natural Gas sehr gering ist, so ist besonders für Dual Fuel Motoren die Stabilität der Katalysatoren bei Schwefel im Abgas ein entscheidender Faktor. Beim Betrieb mit Diesel oder Heavy Fuel Oil kann der Katalysator mit großen Mengen Schwefeloxiden (SO_x) in Kontakt kommen. Hierdurch kann es zur Deaktivierung des Katalysators durch Sulfatbildung auf der Oberfläche, aber auch zur sauren Vergiftung und Strukturänderung durch gasförmige Schwefelsäure kommen. Wie bereits in der Einführung erwähnt, haben vor allem Edelmetallkatalysatoren ein Problem mit der Beständigkeit unter Schwefeleinfluss.

Abbildung 10 zeigt eine Verlaufskurve der Methanumsatzraten des PGM Referenzkatalysators I im Vergleich mit dem edelmetallfreien Katalysator K. Zu Beginn wird I mit 10 ppm Schwefel im Abgas gealtert. Dies entspricht einer Schwefelmenge im Kraftstoff von ca. 0.04% und liegt damit bei ungefähr dem halben Schwellenwert für Ultra Low Sulfur Fuel Oil im Dieselbetrieb eines Dual Fuel Motors. Bereits hier zeigt sich, dass der edelmetallhaltige Methanoxidationskatalysator besonders in den ersten 24 Stunden bei Kontakt mit Schwefel stark an Umsatz einbüßt und nach nicht einmal 200 Betriebsstunden unter 60% der ursprünglichen Methanoxidationsrate sinkt. Auch nach dieser Zeit wurde noch kein stabiler Endwert erreicht. Im Gegensatz dazu zeigt der von MAN Energy Solutions eingebrachte Katalysator K stabile Umsätze, obwohl bei der Alterung mit SO_2 die 12,5 fache Menge – also 125 ppm (entspricht 0,5% Schwefel im Kraftstoff) eingesetzt wurde. Über einen Zeitraum von 100 Stunden wurde diese Stabilität im Rahmen der Messungenauigkeit bestätigt. Sowohl für den Referenzkatalysator I, als auch den Katalysator K, wurden die Aktivitätsmessungen nach der Alterung weiterhin mit 10 ppm SO_2 im synthetischen Abgas durchgeführt, um dem geringeren Schwefelgehalt im Natural Gas Rechnung zu tragen. Eine kurzzeitige Alterung des edelmetallhaltigen Katalysators mit 125 ppm SO_2 zeigt bei anschließender Messung mit niedrigerer SO_2 Konzentration eine verstärkte Deaktivierung.

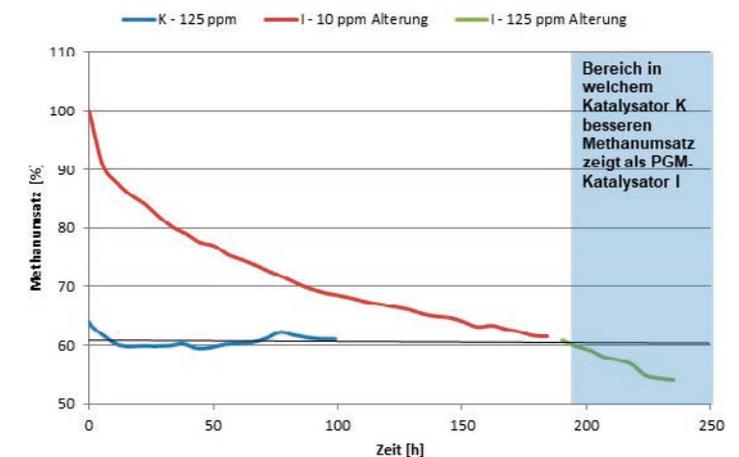


Abb. 10: Methanumsatzkurven der Katalysatoren I und K im Vergleich bei der Alterung mit SO_2 . Die jeweilige Aktivitätsmessung wurde für beide Katalysatoren bei gleichen Bedingungen durchgeführt.

Aus Abbildung 10 wird ersichtlich, dass die Deaktivierung des edelmetallhaltigen Referenzkatalysators nach 200 Alterungsstunden noch nicht abgeschlossen ist. Ferner zeigt sich deutlich, dass bei Dual Fuel Motoren die Deaktivierung bei der Verwendung von Diesel als Kraftstoff im Vergleich zur Verwendung von Gas -mit geringerem Schwefelanteil- verstärkt ist.

Mit der sehr hohen Aktivität und Stabilität des Katalysators K werden alle Projektziele und Meilensteine des Projekts IMOKAT erreicht.

ZUSAMMENFASSUNG

Am Standort Augsburg der MAN Energy Solutions SE wurde in Zusammenarbeit mit Fraunhofer Umsicht, Standort Oberhausen, ein Verfahren zur Methanoxidation mit edelmetallfreien Katalysatorsystemen entwickelt und mit dem Reaktionsverhalten eines edelmetallhaltigen Referenzkatalysators verglichen. Die hierbei von Seiten der MAN Energy Solutions SE eingebrachten Katalysatoren zeigen sehr gute Methanumsatzraten von bis zu 90%. Ferner unterscheiden sie sich vom edelmetallhaltigen Referenzkatalysator durch ihre Stabilität gegenüber hydrothermalen Alterung und insbesondere auch der Stabilität gegenüber der Alterung durch im Abgas enthaltenes SO_2 . Es konnte gezeigt werden, dass die eingesetzten Katalysatorsysteme für den Einsatz vor der Abgasturbine geeignet sind und von den dort herrschenden hohen Temperaturen profitieren. Ein direkter Zusammenhang zwischen NO_x zu CH_4 Verhältnis und Methanumsatz wurde aufgezeigt und die daraus resultierende mögliche Einflussnahme auf den Methanumsatz wurde untersucht. Die von Fraunhofer UMSICHT entwickelten Katalysatoren auf Basis von Cer und Mangan zeigen großes Potential im Bereich der Methanoxidation. Mit diesen Katalysatoren konnte im frischen Zustand ein Methanumsatz von bis zu 60% erreicht werden.

DANKSAGUNG

Unser Dank geht an die Projektträger Jülich GmbH sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Unterstützung unseres Forschungsprojekts.

LITERATUR

- [1] [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx) (abgerufen am 10.07.2019).
- [2] Mitianiec, Wladyslaw, Perspective of applying of Natural Gas in internal combustion engines in respect to environmental protection: Review, Conference Paper: Konmot, 2014.
- [3] International Maritime Organization (IMO), Second IMO GHG Study, 2009.
- [4] Myhre, G., et al., Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, S. 714.
- [5] K. Gosiewski, et al., Chem. Eng. J., 2009 (154), S. 9-16.
- [6] Abgeleitet aus: <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts> (abgerufen am 23.07.2019).
- [7] J. K. Lampert, et al., Appl. Catal. B: Environmental, 1997 (14), S. 211-223.
- [8] J.H. Lee, et al., Fuel Process. Technol., 1995 (42), S. 339-359.
- [9] K. Sekizawa et al., Catal. Today, 2000 (59), S. 69-74.
- [10] M. Honkanen et al., Appl. Catal. B : Environmental, 2016 (182), S. 439-448.
- [11] M. Monai et al., Appl. Catal. B : Environmental, 2016 (197), S. 271-279.
- [12] D. L. Mowery, et al., Appl. Catal. B: Environmental, 2001 (34), S. 287-297.
- [13] J. C. van Giezen et al., Catal. Today 47, 1999 (47), S. 287-293.
- [14] M. S. Wilburn, et al., Appl. Catal. B: Environmental, 2017 (206), S. 589-598.
- [15] T. Yu, et al., Appl. Catal. B: Environmental, 1998 (18), S. 105-114.
- [16] C. Haas et al., CIMAC, 2019, Paper No. 240.
- [17] J. McCarney et al., CIMAC, 2019, Paper No. 398.
- [18] M. Shreka et al., CIMAC, 2019, Paper No. 110.
- [19] C. Shao, et al., Energy Technol., 2017, (5), S. 604-610.
- [20] Z. Hong, et al., Catal. Sci. Technol., 2017, (7), S. 3440-3452.

SHAKER KÜHLUNG –

SHAKER KÜHLUNG IN GASMOTORENKOLBEN FÜR DEN MARITIMEN EINSATZ

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX415

DR.-ING. SEBASTIAN OHLER	Caterpillar Energy Solutions GmbH, Mannheim
M.SC. THOMAS MAIER	Caterpillar Energy Solutions GmbH, Mannheim
PROF. DR.-ING. HABIL. SIEGFRIED BLUDSZUWEIT	MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Rostock
DIPL.-ING. SLAWOMIR CHROBAK	MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Rostock

EINLEITUNG

Die Erhöhung der Leistungsdichte ist eine in der Motorenentwicklung nach wie vor zentrale Zielstellung der Großmotorenhersteller. Die Herausforderung der Wärmeübertragung vom Brennraum zum Kühlöl besteht darin, dass sich eine Verringerung des Wärmedurchgangswiderstandes durch Reduzierung der Wandstärke des Kolbenbodens nicht als zielführend erweist. Die damit einhergehende Steigerung der Oberflächentemperatur auf der Kühlraumseite erhöht das Verkokungsrisiko für das Kühlöl an den hochtemperierten Oberflächen des Kolbenbodens.

Um die Risiken, die sich aus der Erhöhung der Leistungsdichte ergeben, schon im Design-Prozess der Kolbenbaugruppe zu erkennen, ist es notwendig neuartige Simulationsmethoden zu entwickeln. Diese numerischen Simulationsmodelle beschreiben realitätsnah den Gesamtprozess der Wärmeübertragung vom Brennraum zum Kühlraum des Kolbens. In Abb. 1 werden in einem Querschnitt durch einen Gas-Großmotor alle Komponenten dargestellt, die den Wärmefluss im Kolben beeinflussen.

Die physikalische Komplexität des Wärmeübertragungsprozesses vom Brennraum durch den Kolben zum Kühlöl erzwingt den Einsatz von interdisziplinären Kompetenzen und die Anwendung von mehreren numerischen Simulationstools aus diversen technischen Bereichen: Computational Fluid Dynamics (CFD) für die Berechnung des Verbrennungsprozesses und der Öl-Shaker-Kühlung sowie die Finite Elemente Methode (FE) für die Bestimmung der dreidimensionalen instationären Temperaturverteilung im Kolbenoberteil während des gesamten Viertaktmotorzyklus. Obwohl die heutigen numerischen Simulationsmethoden sehr etabliert und zuverlässig sind, ist ein Abgleich des Berechnungsmodells mit den Messwerten aus dem Versuch zur Validierung wesentlich.

In dem Projekt ist Caterpillar Energy Solutions GmbH als Gasmotorenhersteller mit über 140-jähriger Erfahrung in der Entwicklung von Otto-Motoren für den Aufbau, die Durch-

führung und die Datenerfassung von Versuchen auf dem eigenen Einzylinder-Forschungsmotor sowie für die numerische Berechnung des Verbrennungsprozesses verantwortlich. MET Motoren- und Energietechnik GmbH mit ihrer über 25-jährigen Kompetenz in der Beschreibung von physikalischen Phänomenen durch numerische Berechnungsmodelle beschäftigt sich mit der Entwicklung des numerischen Gesamtmodells für die Wärmeübertragung vom Brennraum durch das Kolbenoberteil bis zum Kühlöl und deren Validierung anhand der Messdaten, die am Einzylinder-Forschungsmotor erfasst worden sind.

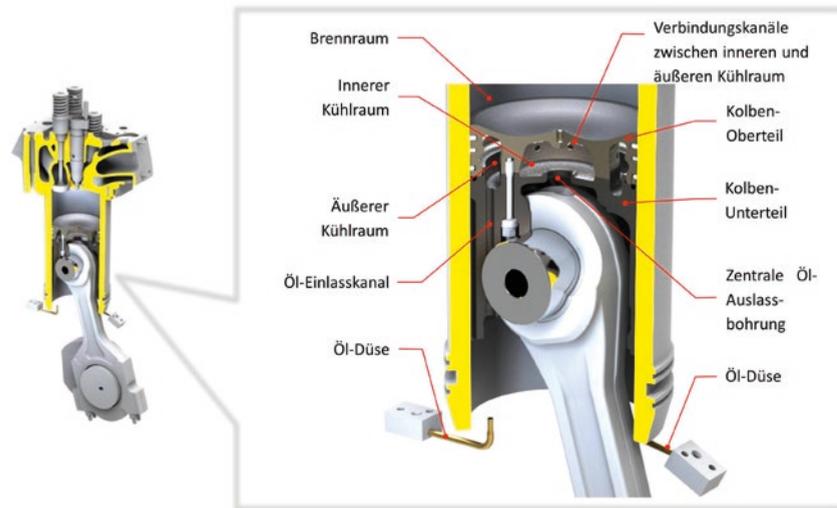


Abb. 1: Querschnitt eines Gas-Großmotors mit Bezeichnung der Konstruktionselemente, die für die Analyse des Wärmetransportes durch den Kolben von Bedeutung sind

CFD-BERECHNUNG DER GASSEITE DES KOLBENS

Für die thermische Berechnung des Kolbens muss der Wärmeeintrag aus dem Brennraum bestimmt werden. Mittels CFD-Simulation von Ladungswechsel und Verbrennung wurden die thermischen Randbedingungen auf der Gasseite des Kolbens berechnet. Hierfür wurde in drei Schritten vorgegangen:

- > Aufbau und Abgleich eines 1D-Motormodells mit Messdaten des Versuchsträgers
- > 3D-CFD-Berechnung mit aus dem 1D-Modell entnommenen detaillierten Randbedingungen und Angleich der Verbrennung mittels Skalierungsfaktoren
- > Iterativer Abgleich des Wärmeübergangs zum Kolben mit der FE-Simulation

Da in der 3D-CFD-Berechnung des Brennraums nur ein kleiner Ausschnitt des realen Einzylinder-Forschungsmotors betrachtet werden kann, sind die erforderlichen Randbedingungen an den Systemgrenzen der CFD-Simulation nicht direkt aus den vorhandenen Versuchsdaten übertragbar. Basierend auf dem Forschungsmotor wurde daher ein 1D-Motormodell aufgebaut, welches alle relevanten geometrischen Informationen zu Kurbeltrieb, Ventiltrieb sowie zu den Abmessungen der Ein- und Auslasskanäle und des Brennraums enthält.

Mittels Drei-Druck-Analyse wurde ein Abgleich mit den im Brennraum sowie in Ein- und Auslasskanälen gemessenen Druckverläufen durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurde die Vorkammer als zusätzlicher Brennraum implementiert und der gerechnete Vorkammer-Druckverlauf an den gemessenen Verlauf angeglichen (siehe Abb. 2).

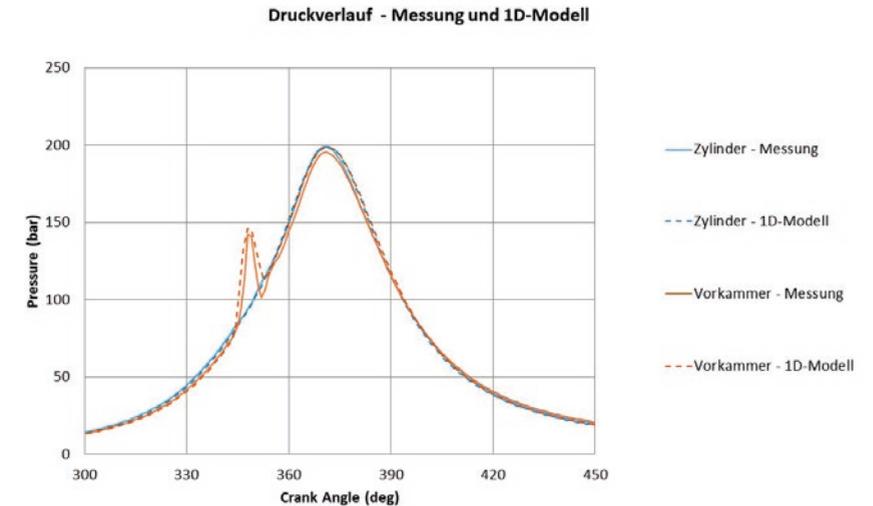


Abb. 2: Druckverläufe der Messung und des angeglichenen 1D-Modells

Im nächsten Schritt dient das fertig abgestimmte 1D-Motormodell dazu, alle nötigen Rand- und Initialbedingungen für die 3D-CFD-Berechnung zu generieren. Mit der Geometrie der Kanäle sowie des Brennraums wurde ein bewegtes, dreidimensionales Netz erzeugt, welches ein komplettes Arbeitsspiel des Viertakt-Motors abdeckt (siehe Abb. 3). Einlass- und Auslass-Randbedingungen wurden kurbelwinkelaufgelöst aus dem 1D-Modell auf die CFD-Berechnung übertragen:

- > Massenstrom, Temperatur sowie Gas- bzw. Gemischzusammensetzung am Einlasskanal und der Gaszuführung zur Vorkammer
- > Druck am Auslasskanal

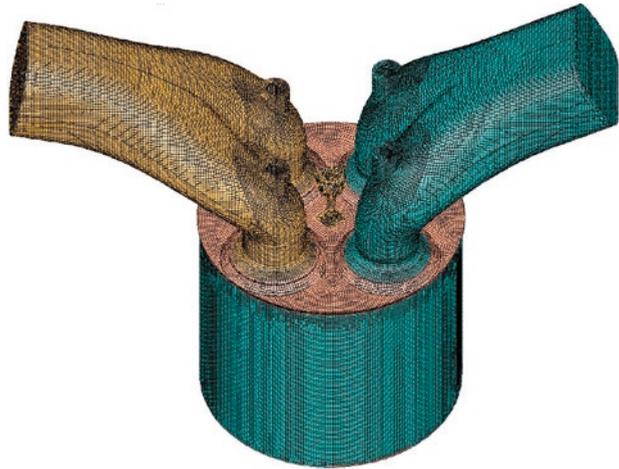


Abb. 3: Rechenetz mit Ein- und Auslasskanälen und Vorkammer

Die Verbrennung wurde mittels eines Flamelet-Verbrennungsmodells abgebildet. Dieses bildet die lokale Verbrennungsgeschwindigkeit als Funktion der laminaren Flammgeschwindigkeit ab (siehe Abb. 4). Diese ist abhängig vom lokalen Verbrennungsluftverhältnis sowie von Druck, Temperatur und Restgasgehalt und der Beschleunigung durch die Auffaltung der laminaren Flammenfront aufgrund der Turbulenz im Brennraum.

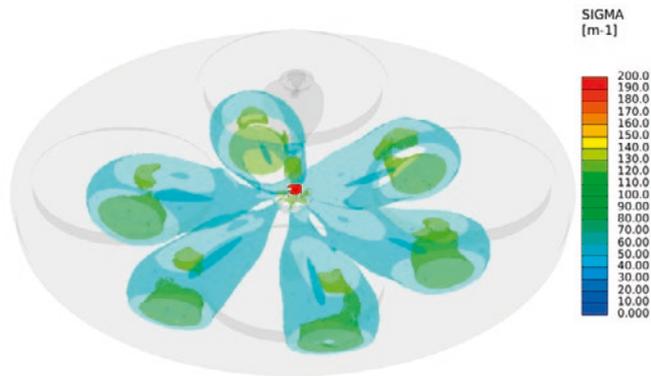


Abb. 4: Flammenfrontdichte im Brennraum, 10°KW nach Zündzeitpunkt

Mittels eines Skalierungsfaktors wurde die turbulente Beschleunigung der Flamme so eingestellt, dass die Druckverläufe aus Vorkammer und Zylinder in Simulation und Messung gut übereinstimmen (siehe Abb. 5).

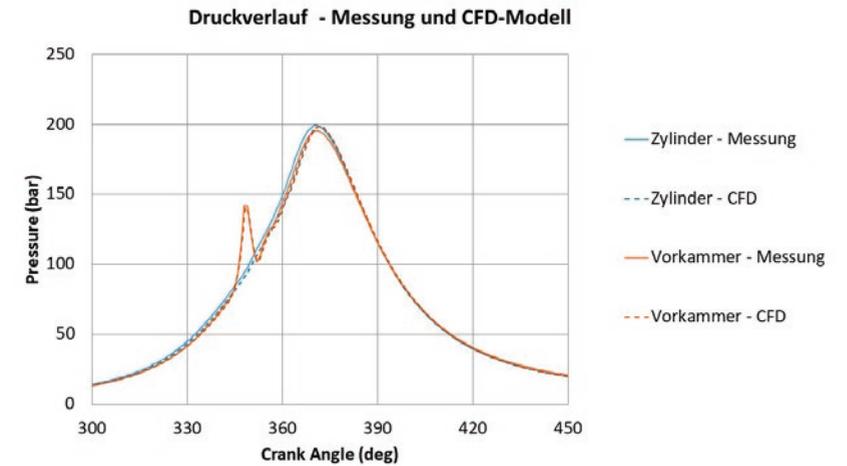


Abb. 5: Gemessener und simulierter Druckverlauf in Zylinder und Vorkammer

Für die Berechnung des Wandwärmestroms in Abhängigkeit des lokalen Strömungszustandes wird der Ansatz nach Angelberger [1] verwendet. Die Wärmeübergangszahl α_{Gas} an der Kolbenoberfläche wird aus dem Wandwärmestrom und der lokalen Temperaturdifferenz gebildet:

$$\alpha_{Gas}(x, y, z) = \frac{\dot{q}(x, y, z)}{T_{Gas}(x, y, z) - T_{Wand}(x, y, z)} \quad (1)$$

Für den Austausch mit dem FE-Modell des Kolbens wurden die räumlich und zeitlich aufgelösten wandnahen Gastemperaturen und α -Werte ausgegeben und in das Kolbenmodell zur weiteren Berechnung eingelesen. Anschließend wurde die zeitlich gemittelte Temperaturverteilung aus dem Kolbenmodell zurück auf die Kolbenoberfläche im CFD-Modell gemappt und die CFD-Berechnung mit der veränderten Temperatur-Randbedingung wiederholt (siehe Abb. 6).

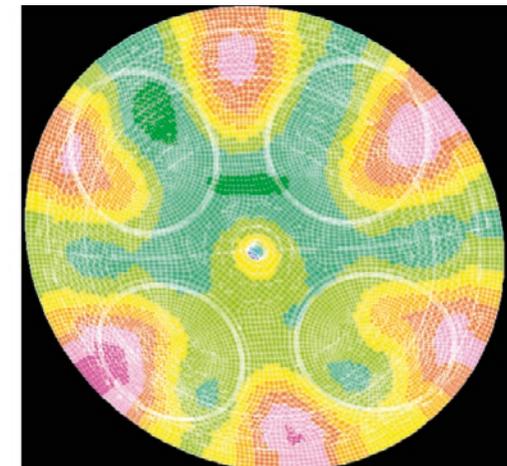


Abb. 6: Auf das CFD-Modell gemapptes Temperaturfeld am Kolben

Bei jedem Rechendurchgang müssen die gerechneten Druckverläufe überprüft und bei Bedarf wieder an die gemessenen Verläufe angeglichen werden. Dieses Vorgehen wurde iterativ so lange durchgeführt, bis die Kolbentemperatur zwischen zwei Iterationsschleifen nahezu unverändert blieb.

SIMULATION DER ÖL-SHAKER-KÜHLUNG

Die Kolben von modernen Großmotoren werden während des Betriebes gekühlt, um die thermische Überlastung des Kolbens zu vermeiden. Eine etablierte Kühlmethode des Kolbens ist die Öl-Shaker-Kühlung, die durch eine hohe Wärmeübertragung charakterisiert ist. Bei diesem Kühlvorgang wird das Öl in die Kühlräume des Kolbens mit einer oder mehreren Öldüsen eingespritzt, die am Motorblock angebracht sind (Abb. 1 u. Abb. 7). Der Ölabbfluss aus dem Kolben wird durch eine zentrale Auslassbohrung oder durch die am Umfang angeordneten Auslassbohrungen realisiert. Der Arbeitshub des Kolbens verursacht eine chaotische Bewegung des Öl-Luft-Gemisches in den Kühlräumen des Kolbens. Bei jedem Hub des Kolbens stoßen die Ölpartikel mit einem großen Impuls an die Wände der Kühlräume und verursachen dadurch eine hohe Wärmeübertragung zum Kühlöl.

Bei der Herleitung des numerischen CFD-Modells wird zu Beginn die Fluidomain, basierend auf der Kolbengeometrie, erstellt (Abb. 7, rechts). Diese Domain beinhaltet den inneren und den äußeren Kühlraum, die Verbindungskanäle zwischen den Kühlräumen, so wie das Öleinlass- und Ölauslasssystem. Die auf diesem Weg erzeugte Fluidomain (Abb. 7, links) wurde in einem 3D-Berechnungsnetz diskretisiert. Bei der Erzeugung des Meshes wurden die Anforderungen von beiden physikalischen Phänomenen berücksichtigt: die zweiphasige turbulente Strömung des Öl-Luft-Gemisches und die Wärmeübertragung zwischen den Medien (Öl und Luft) und den Wänden des Kolbens. Der gesamte Fluidraum wurde mit ca. 3.5 Millionen Elementen vernetzt.

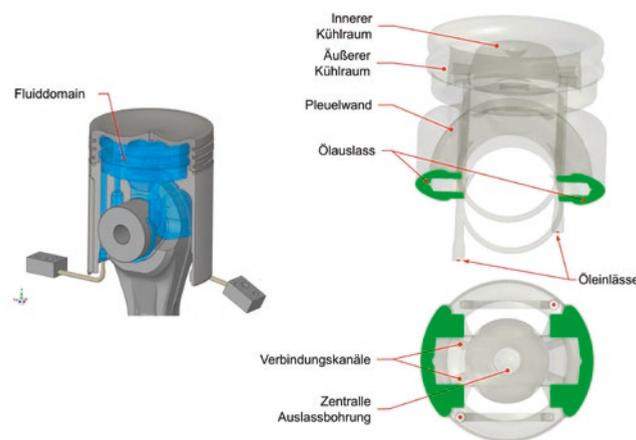


Abb. 7: Links: Fluidomain extrahiert aus der Kolbengeometrie; Rechts: CFD Modell in zwei Ansichten im UT

Die Shaker-Bewegung des Öls in den Kühlräumen des Kolbens ist primär durch die Kolbenbewegung verursacht. Sekundär findet ein Öldurchfluss zwischen Öleintritts- und Ölaustrittsbohrungen statt.

Bei dieser Modellierungsweise werden auf das Öl in den Kühlräumen des Kolbens die gleichen transienten bzw. kurbelwinkelabhängigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aufgeprägt wie beim realen Kolben im Motor (siehe Abb. 8).

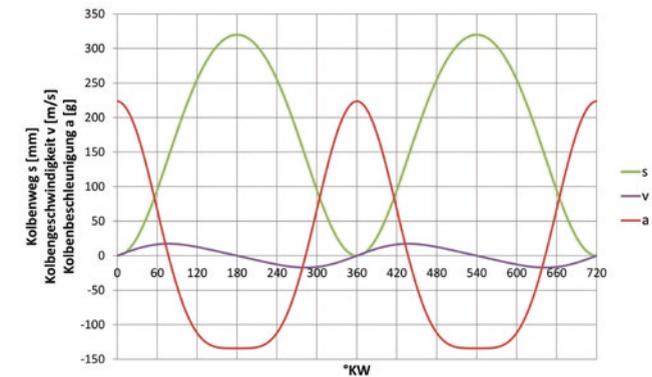


Abb. 8 Darstellung der Kurbeltriebeigenschaften des analysierten Kolbens bei einer Motordrehzahl von 1000 U/min [2]

Diese transiente CFD-Simulation wird so lange ausgeführt, bis sich ein Ölfüllstand im Kühlraum des Kolbens auf einen Level stabilisiert. Wie in der Literatur beschrieben [3] existiert ein Zusammenhang zwischen dem Füllstand des Öls im Kühlraum des Kolbens und der Wärme, die durch das Öl vom Kolben abgenommen wird. Dieser Zusammenhang konnte auch in der numerischen CFD-Simulation innerhalb des Projektes nachgewiesen werden.

Als Ergebnis der Simulation ist ein transientes 3D-Feld des Wärmeflusses von der Kolbenwand zum Kühlungsöl der inneren Wänden des Kolbens verfügbar. Durch eine zeitliche Mittelung des Wärmeflusses über mehrere Hubzyklen wird ein gemittelter 3D-Feld des Wärmeflusses berechnet. Aus diesem gemittelten Wärmefluss $\dot{q}(x,y,z)$, der Temperatur der Wände $T_{Wand}(x,y,z)$ und der angenommenen Öltemperatur wird eine mittlere Wärmeübergangszahl $\alpha_{\dot{O}l}$ berechnet:

$$\alpha_{\dot{O}l}(x,y,z) = \frac{\dot{q}(x,y,z)}{T_{Wand}(x,y,z) - T_{\dot{O}l}} \quad (2)$$

Über diese Wärmeübergangszahl (Abb. 9) und die angenommene Öltemperatur wird eine Kopplung des Modells mit dem FE Modell des Kolbenoberteils gewährleistet.

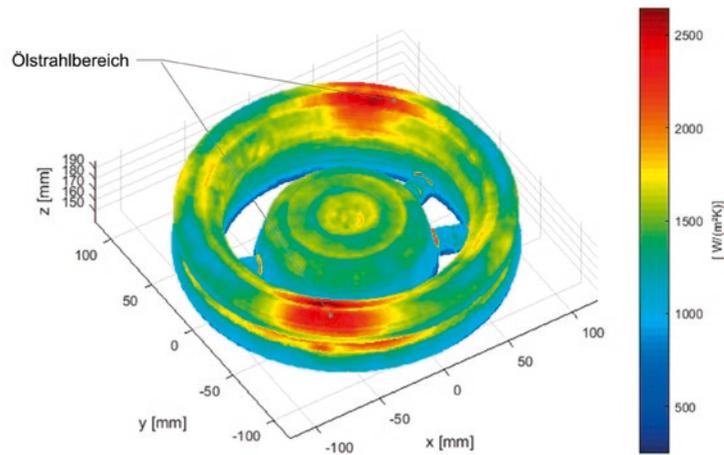


Abb. 9: Wärmeübergangszahl α_{O_i} dargestellt auf den Wänden der Kühlräume des Kolbens als Funktion der Raumkoordinaten x, y, z (Gleichung (2))

KOPPLUNG DER SIMULATIONSMODELLE IN EINEM FE MODELL DES KOLBENBERTEILS

Das FE-Modell des Kolbenoberteils koppelt die durch die beiden oben beschriebenen CFD-Modelle erhaltenen thermischen Randbedingungen. Die Verbrennungssimulation liefert die Daten als transiente Felder der Gastemperatur und Wärmeübergangszahl fortlaufend über den gesamten Motorzyklus. Das CFD-Modell der Kolben-Shaker-Kühlung liefert die Randbedingungen der Kühlung des Kolbens. Diese werden als 3D-Feld der zeitlich gemittelten Wärmeübergangszahl zwischen Kolbeninnenwänden und Kühlöl auf das FE-Modell des Kolbenoberteils aufgeprägt. Wie in Abb. 10 schematisch dargestellt, sind die drei Modelle durch einen Austausch von Informationen gekoppelt und bilden ein Gesamtmodell des Wärmetransfers von Brennraum zum Kühlöl in einem Verbrennungsmotor.

Der beschriebene Informationsaustausch in den Berechnungsmodellen wird iterativ wiederholt, bis die Differenzen in den Ergebnissen zwischen den einzelnen Berechnungsschleifen vernachlässigbar klein werden bzw. eine geforderte Genauigkeit erreichen.

Bei dem transienten Lösungsprozess werden die thermischen Randbedingungen aus der Verbrennungsberechnung alle 720°KW neu aufgeprägt, bis ein quasi eingeschwungener Zustand des Temperaturfeldes im Kolbenoberteil erreicht wird. Dieser Zustand wird quasi eingeschwungen genannt, weil innerhalb des 4-Takt-Verbrennungsvorgangs Temperaturdifferenzen im Kolbenoberteil, verursacht durch die transienten Randbedingungen, bei unterschiedlichen Grad-Kurbelwinkeln auftreten.

Als Ergebnis der Berechnung liegt ein instationäres 3D-Temperaturfeld im Kolbenoberteil vor, wie in Abb. 11 links für zwei ausgewählte Grad-Kurbelwinkel dargestellt.

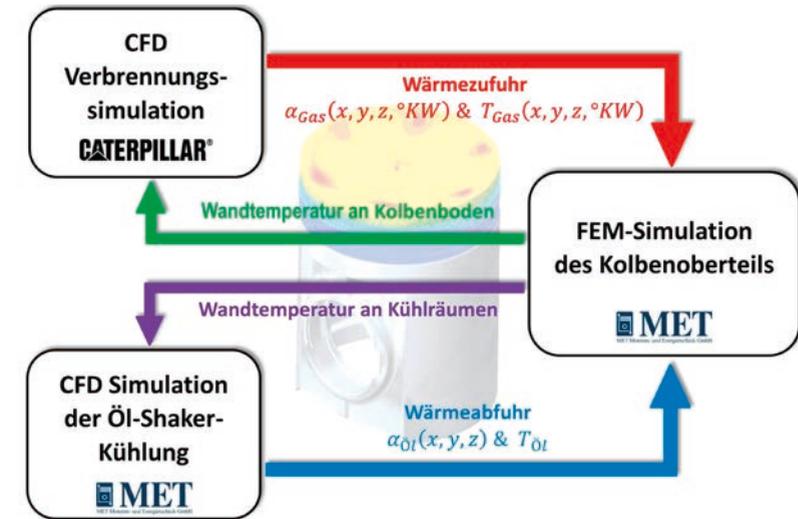


Abb. 10: Flowdiagramm des Gesamtmodells der Wärmeübertragung von Brennraum zum Kühlöl

Durch eine zeitliche Mittelung der Temperatur für jeden Knoten des numerischen Berechnungsmodells entsteht ein gemittelt Temperaturfeld im Kolbenoberteil über 720°KW (Abb. 11 rechts). Dieses gemittelte Temperaturfeld wird zur Kopplung zwischen den drei Simulationsmodellen angewendet. Einerseits transferiert das FE-Modell die Kolbenbodentemperatur (Abb. 11, rechts) als Randbedingung in das Verbrennungsmodell, um den Wärmefluss vom Brennraum zum Kolben noch genauer zu bestimmen. Andererseits benötigt das CFD-Modell der Öl-Shaker-Kühlung das Temperaturfeld auf den Kühlraumwänden als Eingabe, um den Wärmefluss zum Kühlöl zu definieren.

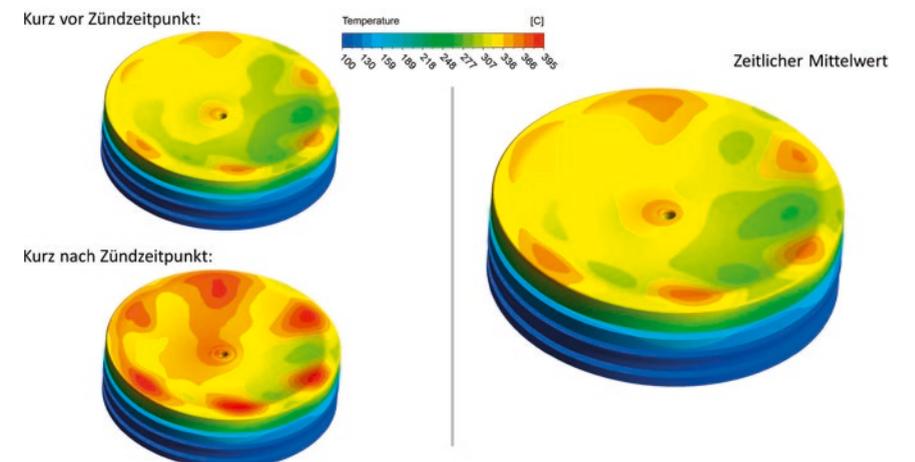


Abb. 11: Links: Ergebnis der transienten Berechnung der Temperaturen im Kolbenoberteil; Rechts: Zeitlicher Mittelwert der Temperatur über einen 4-Takt-Zyklus des Motors

MESSAUFBAU

Zur Evaluation der Simulationsergebnisse wurden Untersuchungen an einem Einzylinder-Forschungsmotor bei der Caterpillar Energy Solutions GmbH in Mannheim durchgeführt. Dieser Forschungsmotor wurde um eine neuartige Messschwinge erweitert, die es ermöglichte, Temperaturen im Kolbenboden über eine festverdrahtete Signalleitung kontinuierlich hochaufgelöst aufzuzeichnen.

FORSCHUNGSMOTOR

Der verwendete Einzylinder-Forschungsmotor (siehe Abb. 12) repräsentiert die mittelschnelllaufende Motorenbaureihe TCG 2032 des MWM-Produktportfolios. Der Motor hat einen Hub von 320 mm bei einer Bohrung von 260 mm und kann in einem Drehzahlbereich von 500 bis 1000 U/min mit Hilfe einer Vier-Quadranten-Asynchronmaschine betrieben werden. Dabei wird der Motor hinsichtlich des Öl- und Kühlwasserkreislaufs extern konditioniert. Die Temperatur, Druck und Luftfeuchte der Verbrennungsluft kann in weiten Teilen den Bedingungen des weltweiten Kundenkreises der MWM-Produkte angepasst werden. Betrieben wird der Forschungsmotor mit Hilfe einer modernen Prüfstandssoftware und einem eignen Motorsteuergerät. Darüber hinaus ermöglicht die eingesetzte Abgasmesstechnik sowie die hochauflösende Zylinderdruck-Indizierung eine hohe Reproduzierbarkeit der durchgeführten Untersuchungen.



Abb. 12: Einzylinder Forschungsmotor bei Caterpillar Energy Solutions in Mannheim

Zur Evaluierung der Ergebnisse der vorgestellten Simulationsmodelle wurden Messungen zur Variation des Druckes der Verbrennungsluft bei konstanter Temperatur durchgeführt. Weiterhin wurden neben dem Schleppbetrieb Betriebspunkte in der Teil- sowie in der Vollast angefahren. Als entscheidende Parameter zur Beeinflussung der Kühlung des Kolbenoberteils wurden der Öldruck (bzw. Ölstrom) und die Öltemperatur der Kolben-Shaker-Kühlung unabhängig voneinander variiert, um gezielt den Wärmeübergang am Kolben zu beeinflussen.

MESSSCHWINGE

Die Evaluierung des 3D-Temperturfeldes im bewegten Kolben des Verbrennungsmotors stellte hohe Anforderungen an die Signalübertragung der Messtechnik dar. Es galt, die räumliche instationäre Temperaturverteilung im Kolbenboden mit Hilfe einer robusten Übertragungsmethode aufzuzeichnen. Als zielführend erwies sich eine Übertragung der Signale zur Temperatur-Messung mittels Thermoelementen innerhalb des Kolbenoberteils durch eine festverdrahtete Übertragungstechnik. Gleichzeitig sollte der Messaufbau möglichst robust sein, um ein möglichst umfangreiches Messprogramm zur vollständigen Evaluierung der Simulationsergebnisse darstellen zu können.

Damit galt es, eine Messschwinge zur Führung der Signalleitung zu konstruieren und in den Forschungsmotor zu integrieren. Dazu mussten die Pleuelstange, der Kolbenbolzen, sowie das Motorgehäuse des Einzylinder-Forschungsmotors modifiziert werden. Bereits in der Konstruktionsphase wurde die Kabelverlegung für die spätere Temperaturmessung berücksichtigt und außermotorisch erprobt. Hierbei zeigte sich, dass für eine dauerhaft sichere Messübertragung die Kabelführung u. a. durch den Kolbenbolzen optimiert werden muss, um die Ergebnisse der Temperaturmessung über einen längeren Versuchszeitraum zu garantieren.

Bei der Auslegung der Messschwinge musste neben dem Freigang im Kurbelgehäuse des Einzylindermotors die Dauerfestigkeit der Bauteile berücksichtigt werden, um einen zerstörungsfreien Betrieb auch bei hohen Drehzahlen (1000 U/min) zu gewährleisten. Bevor die Schwinge zur Führung der Signalleitungen aufgebaut werden konnte, wurden umfangreiche Festigkeits- und Modalanalysen der neu konstruierten Bauteile durchgeführt (siehe Abb: 13, links).

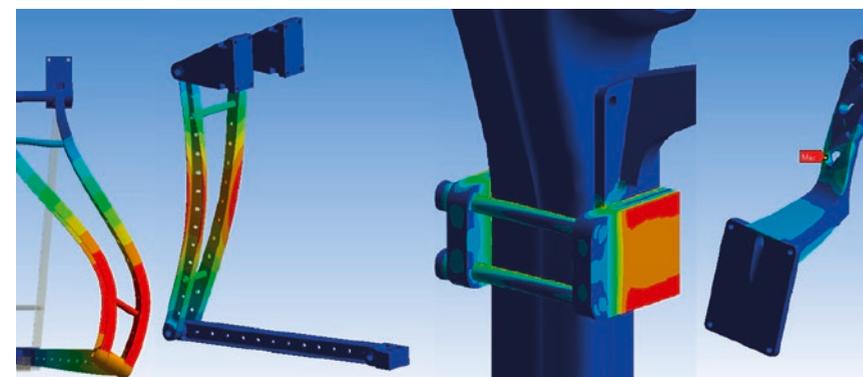


Abb. 13: Simulationsgestützte Untersuchungen zur Dauerfestigkeit der Messschwinge (links) und Kabelüberführung zum Kolbenbolzen (rechts)

Die Führung der Signalleitung vom Pleuel zum Kolbenbolzen musste spannungsfrei geführt werden und über eine vorzusehende Schnittstelle einen vereinfachten Austausch des mit Messstellen versehenen Kolbenoberteils ermöglichen. Gleichzeitig durfte die Pleuelstange nicht so geschwächt werden, dass der Bauteilschutz bei den Vollast-Messungen gefährdet

wurde. Die Anbindung der Führung vom Pleuel zum Kolbenbolzen konnte über eine Klemmverbindung ohne mechanische Bearbeitung der Pleuelstange erfolgreich umgesetzt werden (siehe Abb. 13, rechts).

Die Anbindung der Messschwinde am Pleuel erfolgte über die Pleuelschrauben und am Kurbelgehäuse (siehe Abb. 14, links). Der gewählte Aufbau erschwerte aufgrund der einzigen Schnittstelle der Signalleitung am Kolbenbolzen den Einbau in den Motor, da die gesamte Messschwinde inklusive Pleuelstange zunächst durch die Laufbuchse und weiter in das Kurbelgehäuse so eingefädelt werden musste, ohne die sensiblen Signalleitungen zu belasten (siehe Abb. 14, rechts).

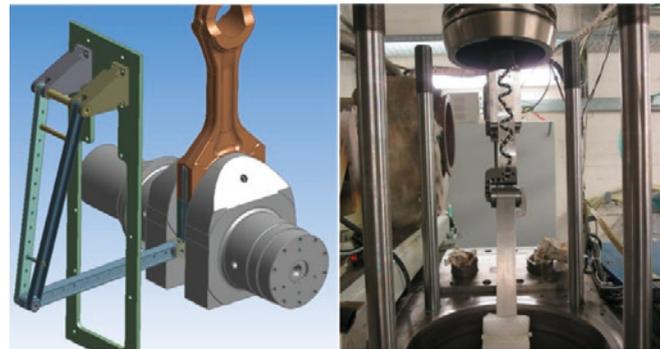


Abb. 14: Messschwinde im eingebauten (links) Zustand und während des Einbaus in den Motor (rechts)

Zur Messung der Temperaturverteilung wurden Messstellen am Kolbenoberteil appliziert. Die Messstellen wurden entsprechend den Vorgaben der Simulation auf der Brennraum- sowie der Öl-Kühlraum-Seite an der Kolbenbodenoberfläche ausgeführt (siehe Abb. 15).



Abb. 15: 20 Messstellen im Kolbenoberteil (links) - 14 Messstellen auf Kolbenboden (Mitte) - 6 Messstellen in Kühlräumen (rechts) - Kolbenoberteil mit Thermoelementen

EVALUIERUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Eine Temperaturmessung auf der Oberfläche des Kolbens während des Motorbetriebs ist eine sehr komplexe Aufgabe. Einerseits ist eine sehr schnelle Reaktionszeit des Thermoelements erforderlich (Abtastrate von 6 kHz), andererseits muss das direkt an die Kolbenober-

fläche angeschweißte Thermoelement dem Verbrennungsspitzenruck von bis zu 300 bar standhalten. Aus diesen Gründen wurden dünne Mantelthermoelemente als geeignet ausgewählt. Diese Thermoelemente sind durch eine spezielle Konstruktion charakterisiert (thermische Eigenschaften des Mantel- und Isolierungsmaterials), die eine gewisse Ansprechzeit zur Folge hat, was bei der Betrachtung von dynamischen Prozessen und bei Auswertung berücksichtigt werden muss. Unter Beachtung der oben genannten Aspekte wurden sowohl eine Evaluierung des Simulationsmodells basierend auf den Messdaten durchgeführt als auch die entsprechenden Parameter der Simulation nachjustiert.

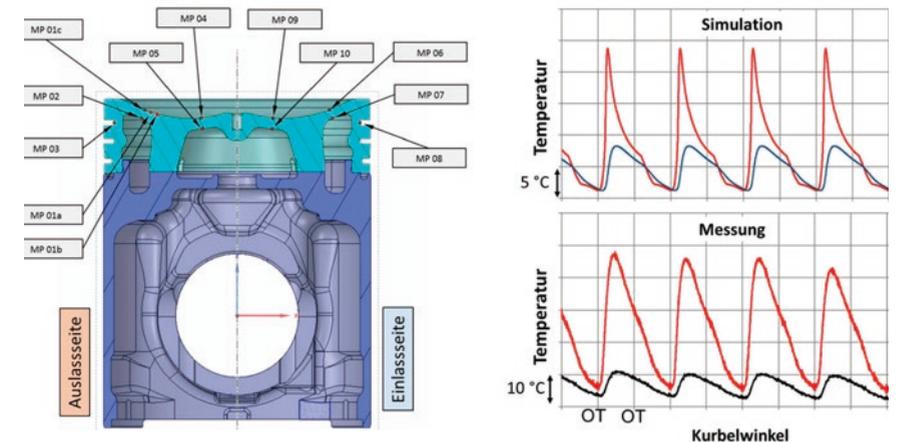


Abb. 16: Vergleich des dynamischen Verlaufs der Temperatur in einem Messpunkt direkt auf der Oberfläche (rot - MP 01c) und 1 mm unter der Oberfläche (schwarz - MP 01b)

Ein zusätzlicher Abgleich des Simulationsteilmodells (Öl-Shaker-Kühlung) konnte auf Basis der Messung der Öleinlass- und Ölauslasstemperatur aus dem Kühlraum des Kolbens auf dem Motorprüfstand erfolgen.

ERWEITERUNG DES NUMERISCHEN MODELLS UM EIN ÖLVERKOKUNGS-MODELL

Hohe Wandtemperaturen auf der Kühlraumseite der Kolbenkrone führen zur Kühlölverkokung auf den heißen Oberflächen. Solche Verkokungsschichten werden immer öfter am Kolben von leistungsgesteigerten Großmotoren beobachtet, aber auch im leistungsgesteigerten PKW-Motorenbereich ist dieses Problem zunehmend [4]. Abhängig von den gewählten Antioxidationsadditiven können Motorenöle im Kühlraum bis zu Oberflächentemperaturen von 240-260 °C eingesetzt werden. Bei modernen Hochleistungsmotoren können diese Temperaturen örtlich und zeitlich deutlich überschritten werden. Die stark isolierenden Eigenschaften der Koksablagerungen führen bereits bei geringen Schichtdicken der Ablagerung zu erheblichen Erhöhungen der Temperaturen auf der Brennraumseite des Kolbens.

Das in diesem Projekt entwickelte Simulationsmodell ermöglicht die Berechnung des dreidimensionalen transienten Temperaturfelds im Kolbenoberteil während des Motorbetriebs.

Mit diesen Simulationstools ist es möglich, festzustellen, ob eine Gefahr existiert, wenn eine Ölverkokungsablagerung während des Betriebs des Kolbens entsteht. Wenn dies der Fall ist, kann mit einem zusätzlichen numerischen Algorithmus die Entstehung und die lokale Dickenverteilung der Ölverkokungsablagerung vorhergesagt werden. Im nächsten Schritt ist es dann möglich, die Erhöhung der Kolbentemperatur, die durch die isolierende Wirkung dieser Ablagerung verursacht wird, abzuschätzen und eine eventuelle Gefährdung des Kolbenbodens durch Heißkorrosion zu erkennen (Abb. 17).

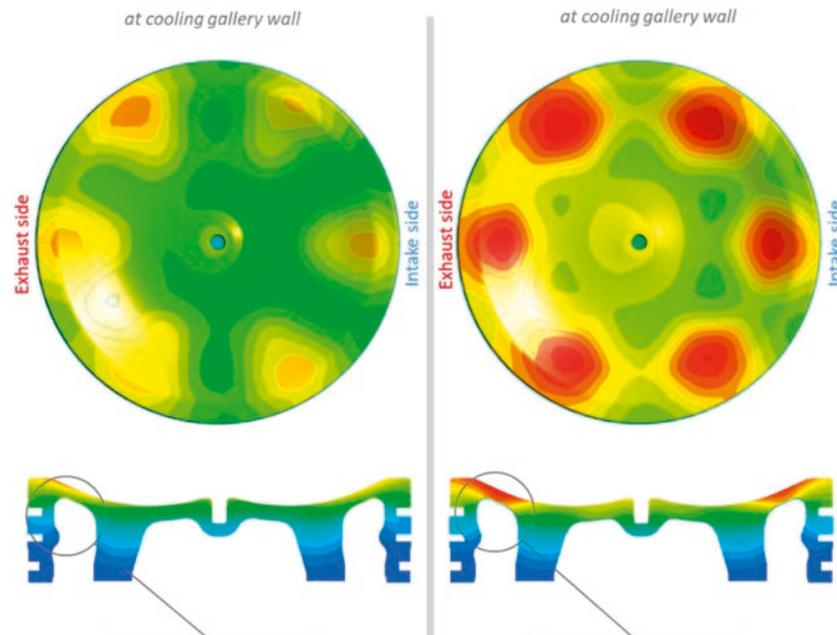


Abb. 17: Vergleich der berechneten Temperaturen in der Kolbenkrone ohne Ölverkokung (links) und mit 0.5 mm Ölverkokungsschicht (rechts) auf den Kühlraumwänden.

Zusätzlich wurde von der MET GmbH ein Ölverkokungsprüfstand entwickelt, der es erlaubt, die Ölverkokung außermotorisch zu erzeugen und die physikalischen Eigenschaften der Verkokung zu analysieren.

ANWENDUNG DER ENTWICKELTEN AUSLEGUNGSMETHODEN BEI SERIENMOTOREN

Aufgrund der zunehmenden Ölverkokungserscheinungen in den Kühlräumen des Kolbens der leistungsgesteigerten Motoren der Caterpillar Energy Solutions GmbH wurde durch die MET GmbH eine Optimierung der Kolbenkühlbedingungen durch die Anwendung der neu entwickelten simulationsgestützten Methoden realisiert. Es wurde ein Dauerversuch an einem Serienmotor durchgeführt, bei dem die optimierte Kolbenvariante mit dem Kolben der Serienausführung verglichen werden konnte. Nach dem Dauerversuch wurden die Kolben ausgebaut, gereinigt und die Ölverkokungserscheinungen visuell bewertet. Bei den Motoren mit der optimierten Kolbenvariante wurden deutlich weniger Verkokungsablagerungen in

den Kühlräumen festgestellt (Abb. 18). Durch die numerische Optimierung des Kolbenkühlsystems konnten zusätzliche Abflussbohrungen im Kolbenunterteil gezielt positioniert werden und somit eine Verbesserung der Kolbenkühlung nachgewiesen werden.

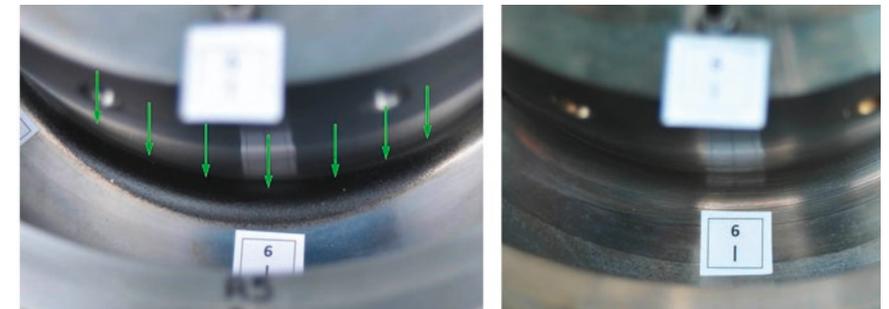


Abb. 18: Kühlraum der Kolben der Serienausführung mit Verkokung (links) und der optimierten Ausführung ohne Verkokung (rechts).

ZUSAMMENFASSUNG

Die in dem Projekt zwischen der Caterpillar Energy Solutions GmbH und der MET Motoren- und Energietechnik GmbH gestellte Aufgabe beinhaltete die Zielstellung, eine simulationsgestützte und experimentell evaluierte Vorhersage der instationären 3D-Wärmeübertragung vom gasförmigen Medium des Brennraums zum Kühlöl im Kühlraum zu entwickeln.

Die Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern erfolgte derart, dass die Caterpillar Energy Solutions GmbH die Prozesssimulation, den Einzylinder-Versuchsmotor und die Entwicklung der erforderlichen neuartigen Messtechnik zur detaillierten Evaluierung der instationären 3D-Simulationsergebnisse übernahm.

Die MET GmbH übernahm die Aufgabe, Simulationsmodelle für die Wärmeübertragung, 3D-CFD-Modelle für den Shakervorgang im Kühlraum des Kolbens zu entwickeln sowie die Kopplung zwischen den drei Teilmodellen:

- > CFD-Prozesssimulation im Brennraum
- > CFD-Simulation des Öl-Shaker-Vorgangs im Kühlraum
- > FE-Simulation des Wärmetransports durch den Kolben herzustellen.

In dem Beitrag wurde gezeigt, wie die simulationsgestützte Optimierung des komplexen Vorgangs der instationären 3D-Wärmeübertragung in einem iterativen Simulationsprozess erfolgt. Parallel dazu wurde über die im Projekt entwickelten neuartigen experimentellen Methoden berichtet, welche in der Lage sind, das instationäre 3D-Temperaturfeld im Kolben des Forschungsmotors zu messen. Dies gelang durch die dreidimensionale Anordnung einer großen Anzahl an Thermoelementen, welche die lokale Kolbentemperatur mit einer hohen Abtastrate kontinuierlich aufnehmen.

Die entwickelte neue Simulationsmethodik sowie die neuen experimentellen Methoden zur Evaluierung der Simulationsergebnisse stellen einen wichtigen Beitrag für die zukünftige, durchgehend simulationsgestützte Entwicklung von effizienten und emissionsarmen Gasmotoren dar.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Namen der SHAKERKÜHLUNG-Verbundpartner für die Förderung des Projektes sowie dem Projektträger Jülich für die sehr gute administrative Projektbetreuung.

LITERATUR

- [1] Angelberger, C., Poinot, T., and Delhay, B., "Improving Near-Wall Combustion and Wall Heat Transfer Modeling in SI Engine Computations"; SAE Technical Paper 972881, 1997
- [2] Fred Schäfer, Richard van Basshuysen, „Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven“; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
- [3] Mahle_GmbH, "Pistons and Engine Testing"; Vieweg Teubner 2012
- [4] Boczek, S., Bischofberger, U. Geyer, A., Rose, R., Mahle GmbH, „THESTA. Innovatives Thermomanagement für Stahlkolben. Schlussbericht, öffentlicher Teil“. FKZ03ET1079A. Stuttgart 2016

BASALTFASERFLOCK – BEFLOCKUNGSTECHNOLOGIE FÜR MARITIME BAUKÖRPER PRÜFUNG VON WIRKUNG UND ANWENDUNGSMÖGLICH- KEITEN VON BASALTFASERN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX410

JÖRG ZSCHÄTZSCH	EBF Dresden GmbH, Dresden
BERND DAEHNE	Dr. Brill und Partner GmbH, Norderney
MARLIES GÜNTHER	INNOVENT e. V. Technologieentwicklung, Jena
STEFFEN DIETSCHE	smartpolymer GmbH, Rudolstadt
PROF. DR. KLAUS HEINEMANN	TITK e. V., Rudolstadt
TORSTEN BLUM	EBF Dresden GmbH, Dresden
TORSTEN KUNZ	INNOVENT e. V. Technologieentwicklung, Jena

MOTIVATION

Deutschland, Exportweltmeister! Damit geht aber auch eine enorme logistische Herausforderung einher. Vielfach werden die hierzulande gefertigten Produkte über den Seeweg in die ganze Welt transportiert. Der Anteil der Seeschifffahrt am weltweiten Warentransport liegt bei ca. 80%, wozu Deutschland einen nicht unerheblichen Anteil beiträgt. Mit einem jährlichen Umsatzvolumen von 50 Milliarden Euro und 400.000 direkten und indirekten heimischen Arbeitsplätzen ist die maritime Branche ein erheblicher Wirtschaftsfaktor. Bei solch einem Marktvolumen generieren schädliche Faktoren Kosten in Millionenhöhe. Neben Korrosion stellt der Bewuchs durch Organismen, auch Fouling genannt (Abbildung 1), eines der zwei Hauptprobleme im maritimen Bereich dar. Der Bewuchs erfolgt dabei in mehreren Etappen. Als Erstes bildet sich eine schleimige Grundsicht, der sogenannte „Biofilm“. Dieser ist der Nährboden für weitere größere Organismen. Zu den wichtigsten Makroorganismengruppen zählen die Seepocken (Abbildung 2), welche eine harte Foulingoberfläche (Hard-Fouling) ausbilden. Diese vereinfacht es weiteren Organismengruppen, sich auf der Oberfläche anzusiedeln, sodass sich Bewuchsgemeinschaften von bis zu 30cm Mächtigkeit bilden können.

Gerade für Schiffe ergeben sich daraus zwei bedeutende negative Auswirkungen: Zum einen können die Organismen den Korrosionsschutzanstrich durch chemische und physikalische Einflüsse schädigen. Zum anderen bewirkt Bewuchs in jedem Fall einen höheren Reibungswiderstand des Schiffes und führt daher zu einer Erhöhung der benötigten Antriebsleistung und zu einem Mehrverbrauch an Treibstoff. Schiffe wie auch alle anderen maritimen Objekte werden daher mit kostenintensiven Oberflächenbehandlungen davor geschützt. Hierzu werden überwiegend Anstriche verwendet, die sich durch Hydrolyse langsam auflösen und dabei kontinuierlich die inkorporierten Biozide freisetzen, um die



Abb. 1: Bio-Fouling



Abb. 2: Bewachsener Schiffsrumpf

sich anhaftenden Larven und Mikroorganismen abzutöten. Infolgedessen kommt es zu einer Belastung des Meerwassers mit Schwermetallen und organischen Giftstoffen, die nicht nur die Bewuchsorganismen beeinflussen. Quasi alle Meerestiere nehmen diese Giftstoffe auf. Durch die Nahrungskette gelangen diese schädlichen Stoffe letztendlich auch in Speisefische und damit auch in unsere Nahrungsmittel.

Für die Natur birgt das Einbringen invasiver Arten über Schiffsrümpfe große Gefahren für die heimische maritime Fauna und Flora, da die eingeschleppten Arten die heimische Lebensgemeinschaft verändern und sogar heimische Arten verdrängen können.

TECHNOLOGIE- UND MATERIALENTWICKLUNG

Technologieentwicklung

Die Grenz- und Oberflächentechnik stellt eine zentrale Schlüsseltechnologie zur Vermeidung von biologischem Fouling dar. Durch die Ausnutzung einer Vielzahl von Oberflächeneffekten, wie beispielsweise Benetzbarkeit, einstellbare Oberflächenenergien, Veränderung des elastischen Moduls, Mikro- und Nanostrukturierung und die Modifizierung des elektrischen Potenzials kann das Besiedeln mit Mikroorganismen reduziert oder gar verhindert werden.

In dem vorliegenden Projekt wurde eruiert, ob sich Basaltfasern als Flockbeschichtung so entwickeln lassen, dass sie maritimen Bewuchs ohne die Freisetzung von Bioziden verhindern können. Darüber hinaus lag das Augenmerk auf möglichen Anwendungsgebieten dieser Technologie.

Die elektrostatische Beflockung ist ein Ansatz, der bislang nur mit Kunststofffasern verfolgt wurden. Die Grundidee besteht darin, dass die Larven der Bewuchsorganismen nicht in der Lage sind, an die vor Biofouling zu schützende Oberfläche z. B. den Schiffsrumpf zu gelangen, da dieser bereits mit Fasern besetzt ist. Der neuartige Ansatz in diesem Projekt ist die Verwendung von Basaltfasern, die aus natürlichen Rohstoffen (Basaltgestein) gewonnen werden. Beim elektrostatischen Beflocken werden die Basaltfasern mit Hilfe einer Hochspannung im elektrischen Feld ausgerichtet und beschleunigt (Abb. 3). Dazu muss das Flockmaterial durch eine geeignete Oberflächenpräparation elektrisch leitfähig modifiziert, sodann in einer Dosieranlage gespeichert und elektrisch geladen werden. Das zu beflockende Bauteil ist mit dem Gegenpol verbunden und bildet ein elektrisches Feld zur Dosiereinheit aus. Dabei sind die Feldlinien immer senkrecht zur Oberfläche des Bauteils ausgebildet. Die Applikation des Flocks aus der Dosiereinheit geschieht durch Schütteln, wobei die so freigesetzten Fasern im elektrischen Feld beschleunigt und entlang der Feldlinien ausgerichtet werden. Ist das Bauteil zuvor mit einem Klebstoff benetzt worden, verankern sich die Flockfasern darin, bevor der Kleber aushärtet.

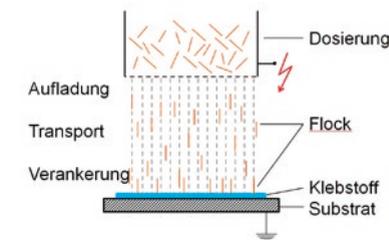


Abb. 3: elektrostatische Beflockung (Prinzipskizze)

Diesen Vorgang setzt man solange fort, bis die Oberfläche mit Flock gesättigt ist. Das Besondere bei der so erzeugten Oberfläche ist die Ausrichtung aller Flockfasern senkrecht zur Oberfläche, so dass eine florartige Schicht erzeugt werden kann. Um dieses Verfahren

im maritimen Sektor anwenden zu können, wurde eine Anlage konzipiert und gebaut, welche die damit einhergehenden besonderen Anforderungen erfüllt. Es wurde eine transportable, kontinuierlich arbeitende Apparatur geschaffen, die die Aufgaben der automatischen Flockzufuhr, das Auffangen überschüssigen Flocks sowie das Auftragen des Klebstoffes bzw. Korrosionsschutzes beinhaltet.

MATERIALENTWICKLUNG

Der Schutz der Meere vor Verunreinigungen durch Mikroplastik ist im Jahr 2019 aktueller denn je. Vor diesem Hintergrund erlässt die europäische Union für das Jahr 2021 eine Verordnung [1] zum Verbot von Einwegplastik. Kommerziell verfügbare und angewandte Anti-Fouling-Beschichtungen basieren unter anderem auf Kunststofflacksystemen, welche kontinuierlich abgebaut und ins Meer abgesondert werden. Eine zusätzliche Belastung der Weltmeere durch Mikroplastik ist die direkte Folge. Der neuartige Ansatz mit dem Naturwerkstoff Basalt (Abb. 4) greift diese Verordnung auf und versucht, durch die natürliche Beschaffenheit der zur Anwendung gelangenden Flockfasern kunststoffbasierte Anti-Fouling zu substituieren. Um das Basaltgestein für einen Flockprozess nutzbar zu machen, muss dieses mechanisch und chemisch aufbereitet werden. In einem ersten Verarbeitungsschritt wird das Gestein zerkleinert und bei ca. 1400 °C aufgeschmolzen. Mittels beheizter Düsen werden aus der Basaltschmelze Filamente (Durchmesser 10 bis 15 µm) gezogen und zu so genannten „Rovings“ gebündelt, die man zur Weiterverarbeitung mit einer sog. Schlichte ausrüstet. Um Rovings für einen Flockprozess verwenden zu können, werden sie auf eine Länge von 0,5 bis 1,0 mm geschnitten (Abb. 5), die Schlichte entfernt und mit einer chemischen, die Wasserqualität nicht negativ beeinflussenden Präparation versehen, um so eine elektrische Leitfähigkeit zu generieren.



Abb. 4: Basaltgestein



Abb. 5: Schneidanlage

WIRKUNGSWEISE

Durch die Kombination der Flocktechnologie mit dem mit dem elektrisch leitfähig präparierten Basaltflock konnten diverse Materialoberflächen erfolgreich modifiziert werden. Die erzeugte Oberfläche vereint folgende drei Wirkprinzipien: Erstens bewirkt, wie bereits beschrieben, die florartige Oberflächenstruktur, dass die Larven nicht durch die Flockschicht aus Basaltfasern zur eigentlichen Ansiedlungsfläche gelangen. Sie können sich somit nur auf den Fasern festsetzen. Dort tritt zweitens ein Selbstreinigungseffekt ein, bei welchem sich die Fasern in der Strömung bewegen und sich dabei aneinander reiben und sich so gegenseitig reinigen. Drittens gibt es Hinweise darauf, dass Basalt je nach Lagerstätte eine antimikrobielle Wirkung hat [2] und somit eventuell auch derartig gegen Bewuchs wirken kann. Dieser Effekt wird zurzeit ausgiebig untersucht.

AUSWERTUNG

Um die Wirksamkeit der generierten Oberfläche zu testen, wurde eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt. Diese beinhalteten Auslagerungstests in Cuxhaven und auf Norderney, Seepockenschnelltests, dynamische Untersuchungen auf dem RotoMarin®, Festigkeits- und Beständigkeits-tests der Fasern und des Klebstoffs gegen mechanische und mediale Einflüsse und Feldversuche auf Tonnen und auf Schiffen der AG Reederei Norden-Frisia (Abb. 6).

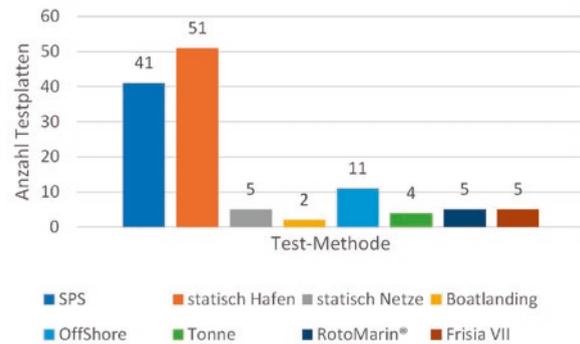


Abb. 6: Verteilung der 124 Testplatten auf unterschiedlichen Testmethoden 2019

Die Auswertung der Versuche über die letzten zwei Jahre erbrachte differenzierte Ergebnisse. Generell konnte eine bewuchshemmende Wirkung durch Basaltfasern nachgewiesen werden. Als besonders wirkungsvoll hat sich die Beschichtung im Tide-Wechselbereich erwiesen, dem Bereich an statischen Objekten, welcher durch Ebbe und Flut phasenweise mit Wasser bedeckt ist oder trocken liegt. Auch die hemmende Wirkung gegen Seepocken konnte nachgewiesen werden [4]. Die Ergebnisse zeigten jedoch auch, dass sich trotz Basaltbeflockung andere Organismen ansiedelten, sodass eine Weiterführung der Untersuchungen dringend anzuraten ist. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die weitgehend bewuchsfreien Testplatten im Tidewechselbereich am 29. Juli 2019 im Vergleich zu den stärker bewachsenen Positiv- und Referenzplatten.

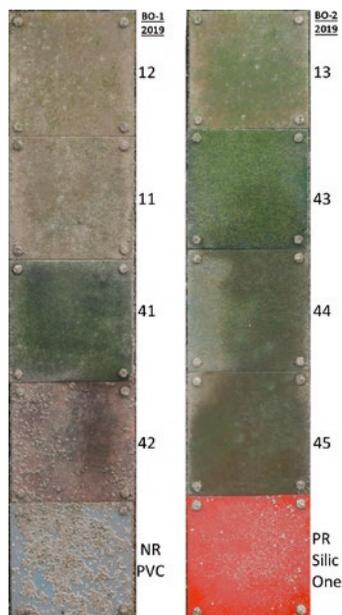


Abb. 7: Basaltfaser beflockte Testplatten ohne Seepocken im Tidewechselbereich

ZUSAMMENFASSUNG

Im Projektverlauf wurde erreicht, dass unterschiedliche Materialien und Geometrien mit Basaltfasern beflockt werden konnten. Auch die Beflockung einer Tonne als Demonstrator gelang problemlos.

Die Wirkung der Basaltfasern gegen Seepockenbewuchs war sehr deutlich. Andere Organismengruppen wie Algen, Hydrozoen oder Tunikaten konnten sich allerdings auf den beflockten Oberflächen ansiedeln.

Für Anwendungen, bei denen Seepocken das Hauptproblem darstellen, erweisen sich Basaltfasern als eine umweltfreundliche Alternative zu Biozid- oder Silikonbeschichtungen. Dies ist insbesondere im Tidewechselbereich der Fall, wo viele fragile oder gallertartige Organismen nicht vorkommen, da sie die Trockenzeit nicht vertragen [3]. Für Offshore-Piles, wo die größten Probleme in Bezug auf Bewuchs und Korrosion im Tidewechselbereich auftreten, kann die Beflockung mit Basaltfasern eine umweltfreundliche Alternative sein.

Andere Anwendungsgebiete wie z. B. Schifffahrt und Marikultur wurden ebenfalls getestet, aber bislang noch nicht mit ausreichendem Erfolg.

DANKSAGUNG

Die Autoren sprechen im Namen des Konsortiums „BasaltFaserFlock“ ihren Dank für die Förderung des Projektes durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aus. Ebenso gilt dem Projektträger Jülich unser Dank für die gute administrative Betreuung.

LITERATUR

- [1] Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates, (EU) 2019/904, Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, Juni 2019
- [2] Pfuch, A.; Döpel, M.; Ramm, M.; Spange, S. und Grünler, B.: Innovent e.V.: Verwendung von Basalt zur Reduzierung von Fouling und/oder als antibakterielles Material, Beschichtung für eine Oberfläche und Verfahren zur Herstellung einer Beschichtung. DE 10 2016 223 453 A1. 2018.05.30.
- [3] Müller, Cl.-D.: Die Epifauna auf den Hölzern der Teredo-Untersuchungsstation in Norderney. In: Jahresbericht Forschungsstelle Küste 1955, 106-129 + 4 Anlagen.
- [4] Zschätzsch, J.; Daehne, B.; Günther, M.; Dietsch, S.; Heinemann, K.; Blum, T. und Kunz, T. Basalt Fiber Flock as a novel, environmentally friendly antifoulant. Poster at 19th ICMCF, June 24-29th, Melbourne, FL, USA., 2018

FINISH – EXAKTE UND SCHNELLE GEOMETRIEREFASSUNG SOWIE DATENAUSWERTUNG VON SCHIFFSOBERFLÄCHEN FÜR EFFIZIENTE BESCHICHTUNGSPROZESSE

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX406

BERNHARD URBAN	Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG
AARON BACHMANN	Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG
JAN STEINMETZ-HELLERSTEDT	Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG
CHRISTIAN HESSE	Dr. Hesse und Partner Ingenieure
INGO NEUMANN	Geodätisches Institut (GIH) Leibniz Universität Hannover
JENS HARTMANN	Geodätisches Institut (GIH) Leibniz Universität Hannover
VOLKER BÖSS	Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) Leibnitz, Universität Hannover
ROBERT KENNEWEG	Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) Leibnitz, Universität Hannover
MICHAEL GEIST	Fraunhofer IGP
FABIAN GIERSCHNER	Fraunhofer IGP
TINA AMBROSAT	Fraunhofer IGP

MOTIVATION

Im Yachtbau werden in einem sehr aufwendigen manuellen Prozess die äußeren sichtbaren Bereiche mit Spachtel geglättet, bevor die Lackierung erfolgt. Die Dauer des Beschichtungsprozesses kann bis zu 12 Monate betragen und verursacht erhebliche Kosten. Der Prozess wurde bereits im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsverbundvorhaben OFIN (Förderkennzeichen 03SX228) analysiert, weiterentwickelt und umgesetzt. Im Fokus standen die Geometrieerfassung der Schiffskontur mittels Laserscanner und die manuelle Aufbereitung der Scandaten zu einem optimierten Sollmodell mit dem Ziel der Erzeugung einer Spachtellandkarte zur Steuerung des Spachtelauftrags. Durch die stetig größer und komplexer werdenden Yachten (Abb. 1) ist der Aufwand zur Messdatenerfassung und Datenanalyse stetig gestiegen, so dass die entwickelten Prozessschritte nicht mehr effizient genug sind. Dies führt teilweise dazu, dass die generierten Spachtelvorhersagen zu spät im Prozess zur Verfügung stehen.

ZIELSTELLUNG

Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung und Umsetzung eines neuen 3D-Scanverfahrens in Kombination mit intelligenten Auswertelgorithmen und Modellierungsprozessen zur schnellen Bereitstellung von Spachtelvorhersagen. Daraus ergeben sich zwei Entwicklungsschwerpunkte: Objekterfassung und Modellierung und die folgenden konkreten Ziele:



Abb. 1: Megayacht

- > Verkürzung der Aufnahmedauer um ca. 70% bis zur referenzierten 3D-Punktwolke
- > Beschleunigung der Datenauswertung um ca. 60% bis zur Übergabe an die Fertigung
- > Reproduzierbarkeit der Generierung des optimierten Sollmodells
- > Begrenzung des Messfehlers auf ca. ± 1 mm
- > Erhöhung des Erfassungsbereiches der relevanten Schiffsflächen auf nahezu 100%

Durch die Umsetzung der gestellten Ziele soll eine Beschleunigung des gesamten Prozesses zur Berechnung der Spachtelschichtdicken von 60% erzielt werden (Abb. 2).



Abb. 2: geplante Einsparung im gesamten Prozess

GRUNDIDEE

Die Verbesserung des Prozesses der Objektaufnahme beruht auf dem Prinzip des kinematischen terrestrischen Laserscannens (k-TLS). Hierbei wird ein Laserscanner, welcher im Profilmodus (2D) rotiert, auf einer beweglichen Plattform am Objekt vorbeibewegt, wobei dessen Bewegung wiederum von einem Lasertracker erfasst wird. Im Gegensatz zum statischen Laserscannen, bei dem große Punktwolken das Verknüpfen vieler einzelner Punktwolken erfordert, können beim kinematischen Scannen in einem Messvorgang Bereiche von über 30 m Länge aufgenommen werden. Aufgrund der nahezu konstanten Auftreffwinkel bietet das Prinzip höhere Genauigkeiten. Systemseitig ist, bei einer Messentfernung von < 10 m, eine 3D-Gesamtabweichung im Bereich von < 1 mm zu erwarten

(Abb. 3). Darüber hinaus können Verschattungen wie Gerüste minimiert werden, indem der Laserscanner zweimal mit jeweils unterschiedlichen Winkelstellungen am Objekt vorbeibewegt wird.

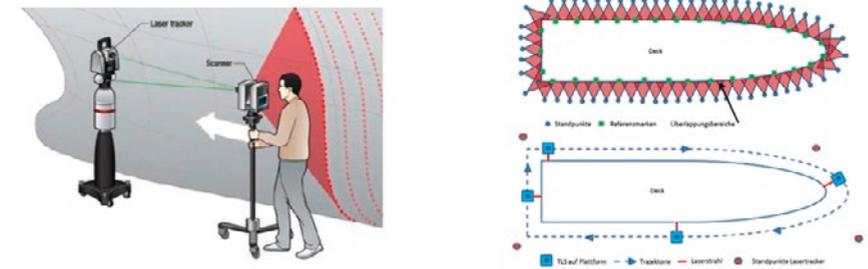


Abb. 3: Prinzip der k-TLS-basierenden Objektaufnahme (Ehm und Hesse 2012)

VORGEHENSWEISE

Die im Projekt geplante Vorgehensweise zeigt die folgende Abbildung. Die einzelnen Prozessschritte werden im Folgenden näher erläutert.

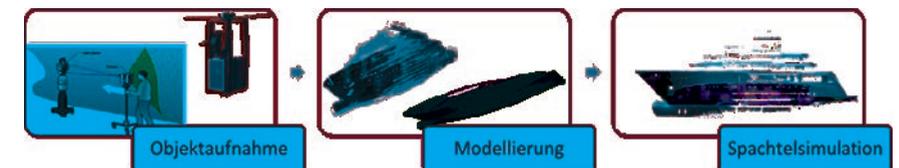


Abb. 4: Geplantes Prozess zur Erstellung der Spachtelvorhersage

3D-OBJEKTERFASSUNG DURCH KINEMATISCHES TERRESTRISCHES LASERSCANNING

Für eine hochgenaue direkte Referenzierung (Bestimmung der Pose) der bewegten Plattform wird ein Lasertracker in Verbindung mit einer am Laserscanner montierten T-Probe verwendet, siehe Abb. 5.

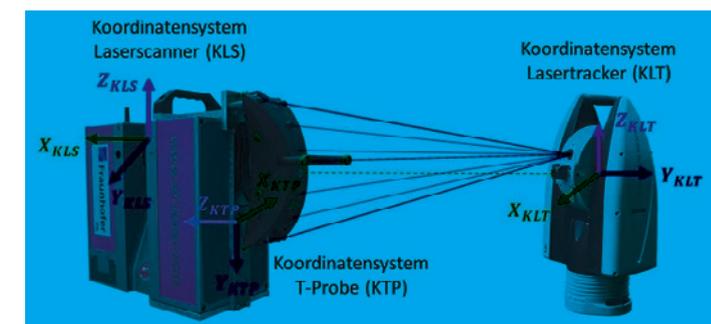


Abb. 5: Darstellung des Referenzierungsprinzips durch die am Laserscanner befestigten T-Probe und den Lasertracker Leica AT960, in Grün die von der Kamera erfassten zehn LEDs und in Rot die Distanzmessung zum Reflektor

Der Lasertracker ist mit einem Absolutinterferometer ausgestattet. Des Weiteren hat der Lasertracker eine Kamera, durch welche das Referenzpunktfeld der T-Probe, bestehend aus einem Reflektor und zehn LED, angemessen wird. Zusammenfassend ist es somit möglich, dass gleichzeitig je drei Translationen und Rotationen bestimmt werden. Die erreichbaren Genauigkeiten (maximum permissible error) betragen $\pm 50 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ für die Translationen und $0,01^\circ = 18 \mu\text{m}/100 \text{mm}$ für die Rotationen (Hexagon Metrology 2019).

Durch ein vom Laserscanner am Profilbeginn generiertes Triggersignal, erfolgt eine Synchronisierung von Objektaufnahme und Referenzierung. Da jedoch, je nach Einstellung, die Profile aus mehreren tausend Punkten bestehen, wird nur der erste Punkt exakt referenziert. Je nach Messumgebung und Konstruktion kann die Bewegung der Plattform sehr dynamisch sein. Daher werden in einem Filter für jede Pose (Zustand), zusätzlich zu den durch den Lasertracker erfassten Translationen und Rotationen, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ermittelt. In Verbindung mit einem entsprechenden Bewegungsmodell ist es möglich, alle einzelnen Profilpunkte zu korrigieren. In Abb. 6 wird das Prinzip der punktgenauen Referenzierung dargestellt.



Abb. 6: Prinzip der punktgenauen Referenzierung beim k-TLS (Hartmann et al. 2018)

Da das Koordinatensystem der T-Probe (KTP) gegenüber dem des Laserscanners (KLS) dreidimensional verschoben und verdreht ist, muss die relative Orientierung bestimmt werden. Dieser Prozess wird als 6 DoF (Degrees of Freedom) Kalibrierung bezeichnet. Die hochgenaue Bestimmung der 6 DoF (drei Translationen und drei Rotationen) erfolgt durch eine gemeinsame Erfassung von Referenzebenen durch Lasertracker sowie Laserscanner und wird grundlegend in Strübing und Neumann (2013) beschrieben.

Aufgrund der mechanisch starren Verbindung zwischen T-Probe und Laserscanner werden die 6 DoF als konstant für den Messzeitraum angenommen. Somit können alle gemessenen Punkte vom KLS in das KLT transformiert werden. Ein Überblick der verwendeten Sensoren und deren Koordinatensysteme zeigt Abb. 5. Der Übergang vom KLS in das KLT beinhaltet eine zweistufige Transformation:

- › vom KLS ins KTP mit den 6 DoF der vorab durchgeführten Kalibrierung
- › vom KTP ins KLT mit den vom Lasertracker zur T-Probe direkt gemessenen Translationen und Rotationen

Die wesentlichen Vorteile sind:

- › Direkt referenzierte Punktwolke nach Abschluss der Objektaufnahme Schnellere Erfassung bei langgestreckten Objekten
- › Verringerung der Datenmenge
- › Ständige Kontrolle des Auftreffwinkels zwischen Laserstrahl und Objekt

Für eine k-TLS-basierte 3D-Objektaufnahme sind die zum Teil komplexen Bedingungen (großflächige Aufnahme) und Genauigkeitsvorgaben ($\sigma_{3D}=1\text{-}2\text{mm}$) im industriellen Schiffbau einzuhalten. Die konkrete Umsetzung auf der Werft wird zusätzlich erschwert, da z.B. Staubentwicklung bzw. Erschütterungen, welche durch den Produktionsprozess hervorgerufen werden, auftreten können.

Zur Objektaufnahme werden die Laserscanner der Z+F IMAGER 5010C und Leica P40 verwendet. Die Referenzierung erfolgt durch den Lasertracker Leica AT 960 in Verbindung mit einer Leica T-Probe, welche mit einer eigenen entwickelten Halterung am Laserscanner reproduzierbar adaptiert ist, siehe Abb. 5.. Zur Bestimmung der 6 DoF wurde eine Kalibrierumgebung, welche aus elf Referenzebenen besteht, beim GIH entwickelt und anschließend auf der Werft installiert, siehe Abb. 7.

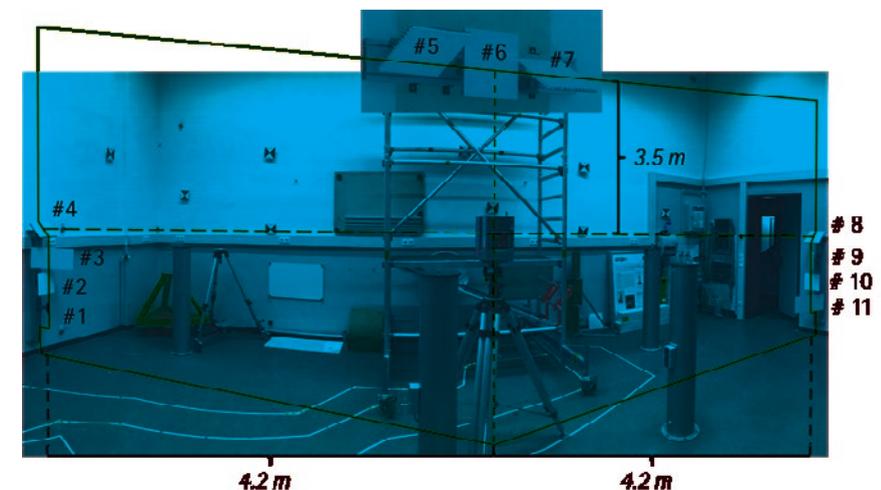


Abb. 7: Feste Kalibrierbasis (mit 11 Referenzebenen) im Labor des GIH

Die Anordnung der Referenzebenen wurde anhand einer vorab durchgeführten Simulation so optimiert, dass eine Gesamtabweichung von $\sigma_{3D}=1\text{-}2\text{mm}$ eingehalten werden kann. Das bedeutet, dass die Translationen mit 10^{-1}mm und die Rotationen mit wenigen Milligrad zu

bestimmen sind. Beispielhaft ist hier aufzuführen, dass eine Abweichung in den Rotationen von $0,006^\circ$ auf einer Messdistanz von 10m zu einer Abweichung von 1mm am Objekt führt. Auf der installierten Kalibrierbasis wurden mehrfach Messungen durchgeführt. Durch Varianzfortpflanzung wurden die Standardabweichungen der 6 DoF ermittelt. Diese erfüllen mit $0,03\text{-}0,04\text{mm}$ für die Translationen und $0,002\text{-}0,003^\circ$ für die Rotationen die Anforderungen.

Die Messbedingungen bei der Objekterfassung einer Yacht können sehr unterschiedlich sein. Zum einen hängt dies vom Bereich des Schiffes ab, welcher erfasst werden soll. Der Rumpf einer Yacht muss von außerhalb des Schiffes vermessen werden, die Vermessung von Deckstrukturen kann jedoch auch an Bord erfolgen. Weitere Randbedingungen wie Baufortschritt und Bauort sind ebenfalls relevant für die Planung der Messung. Um die Anforderungen verschiedener Einsatzszenarien auf der Werft erfüllen zu können, wurden unterschiedliche Trägersysteme analysiert und bewertet. Die folgenden drei Systeme wurden ausgewählt, weiterentwickelt und mehrfach getestet (Abb. 8):

- > Seilschlitten
- > Rollwagen
- > Rückentrag

Ein Seilschlitten bietet sich an, wenn große (lange) Außenbereiche erfasst werden sollen und das Schiff nicht eingerüstet ist. In mehreren Iterationsschritten wurde ein motorisch angetriebener Schlitten entwickelt, der über zwei gespannte Seile eine Strecke von über 50m abdecken kann. Über eine einfache Spannmekhanik können die Seile einfach montiert und mit einer definierten Seilspannung angebracht werden. Die gleichmäßige Vorschubgeschwindigkeit und das integrierte Dämpfungselement sorgen für geringe Beschleunigungen des Laserscanners, so dass die einzelnen Messpunkte exakt prozessiert werden können.

Für Messungen an Deck mit weitgehend ebenen Böden wurde ein Rollwagen entwickelt. In systematischen Versuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Rollen, Gewichte, Geschwindigkeiten und Dämpfungselementen untersucht. Hieraus entstand letztlich ein kompakter Wagen, der mit Luftreifen bestückt ist und über das gleiche Dämpfungselement, wie das Seilsystem verfügt, so dass eine einfache Kopplung der Systeme möglich ist.

Für schwierige Messbedingungen wie etwa auf einem Gerüst oder in Bereichen mit unebenen Böden wurde eine Rückentrag entwickelt. Mit dieser Trage können auch sehr schwer zugängliche Flächen erfasst werden. Der Träger muss jedoch darauf achten, dass keine Objekte zwischen der T-Probe und dem Lasertracker geraten und er muss eine möglichst gleichförmige Vorwärtsbewegung ausführen und abrupte Bewegungen vermeiden. Zwei Plattformen für den Bodeneinsatz (Rollwagen und Rückentrag), sowie ein Seilschlitten, um auch die höherliegenden Bereiche erfassen zu können, entwickelt, siehe Abb. 8.



Abb. 8: Verschiedene Varianten der Trägerplattform für den Laserscanner: Seilschlitten, Rollwagen und Rückentrag

Um die entwickelten Trägersysteme und Prozessierungsalgorithmen (Filter) zu validieren, wurden Testmessungen auf der Werft durchgeführt. Als Vergleich wurden die Objekte auch mit s-TLS erfasst. Beide Datensätze werden im örtlichen Schiffskoordinatensystem referenziert. Exemplarisch werden die Objekterfassung einer Deckshausseitenwand mit Rollwagen, siehe Abb. 9 und eine Messung eines Schiffsrumpfes mit Seilschlitten, siehe Abb. 10 dargestellt.

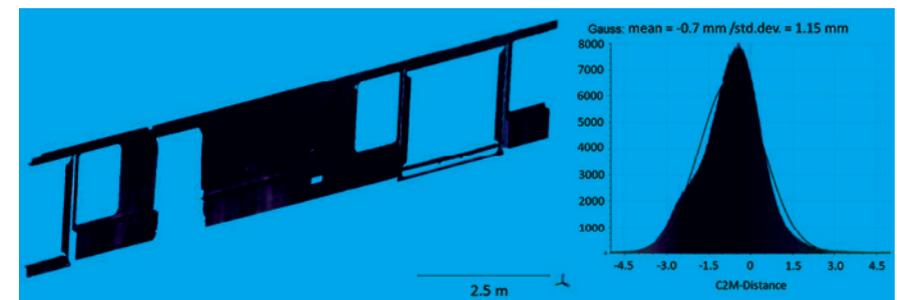


Abb. 9: Linke Seite farbcodierte Abweichungen (Cloud2Mesh-Distanzen) zwischen einer mit s-TLS und k-TLS erfassten Deckshausseitenwand, rechte Seite die Verteilung der C2M-Distanzen

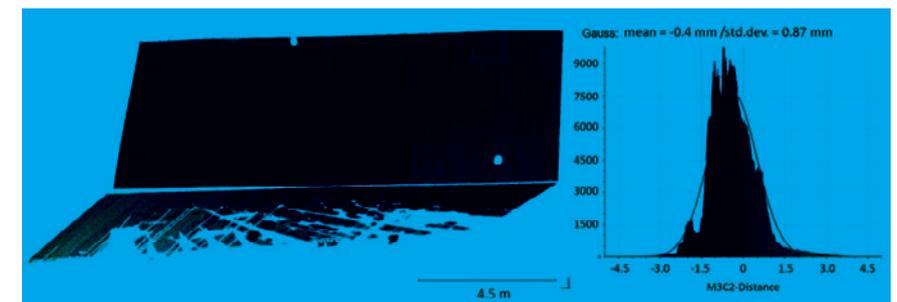


Abb. 10: Linke Seite farbcodierte Abweichungen (M3C2-Distanzen) eines mit s-TLS und k-TLS erfassten Schiffsrumpfes, rechte Seite die Verteilung der M3C2-Distanzen

Die Ergebnisse zeigen, dass die geforderten Genauigkeiten von $\sigma_{3D} = 1 - 2 \text{ mm}$, durch eine Objektaufnahme mit k-TLS erreicht werden können. Für die Messung der Deckshausseitenwand mit Rollwagen werden ein Mittelwert der Abweichungen von $-0,7 \text{ mm}$ und eine Standardabweichung von $1,15 \text{ mm}$ erreicht. Bei der Aufnahme des Schiffsrumpfes wurde ein Mittelwert von $0,4 \text{ mm}$ und eine Standardabweichung von $0,87 \text{ mm}$ erreicht. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Abweichungen aus den Messunsicherheiten beider Aufnahmeverfahren s-TLS und k-TLS ergeben.

DATENAUFBEREITUNG UND MODELLIERUNG

In Vorbereitung auf die Spachtelsimulation ist eine Datenaufbereitung sowie Modellierung eines optimierten Sollmodells notwendig. Im Zuge der Datenaufbereitung werden die Messdaten des kinematischen Messsystems von Störelementen bereinigt und zu einer regularisierten Punktwolke generalisiert. Dazu wird eine automatisierte Grob- und anschließend eine Feinbereinigung sowie Klassifizierung durchgeführt. Auf Basis der bereinigten und klassifizierten Daten sowie des CAD-Modells erfolgt die automatische Modellierung des optimierten Sollmodells. Die Vorgehensweise wird im Folgenden beschrieben.

Für die Bereinigung der Messdaten unter Verwendung der CAD-Daten wird das Konzept der Voxelisierung verwendet (Abb. 11) welches eine sehr schnelle Bereinigung der Messdaten ermöglicht. Unter Ausnutzung der Ausrichtung der Messdaten im Schiffskordinatensystem (SKS) erfolgt eine Rasterung der Punktwolke in würfelförmige Teilbereiche mit denen des CAD-Modells hinsichtlich Lage und Orientierung miteinander verglichen wird, wodurch zum Schiff gehörende Bereiche identifiziert werden können.

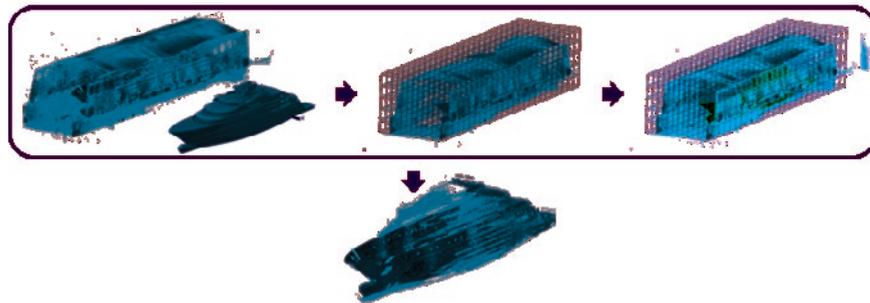


Abb. 11: Datenbereinigung

Anschließend erfolgt die Klassifizierung und Generalisierung der Punktwolke. Dabei wird diese zuerst in drei Klassen eingeteilt: Die Außenhaut, die Design- und Funktionselemente sowie Datenpunkte, die weder das eine noch das andere repräsentieren (siehe Abb. 12). Die Herausforderung bei der Klassifizierung besteht in der Unterscheidung von Oberflächen, die zur Schiffsaußenhaut gehören, und den anliegenden Störelementen. Dies basiert auf den Informationen, die durch das Soll-CAD gegeben sind und auf aus den Messdaten generierbaren Merkmalen (bspw. ungewöhnliche Welligkeit, mit der sich z. B. Folien auf der Außenhaut als Störelement klassifizieren lassen). Dafür werden die Punktwolke sowie auch

das Soll-CAD innerhalb der einzelnen Voxel hinsichtlich Abstand, Normale, Krümmungsverlauf, Streuung und Intensitätswert analysiert und miteinander verglichen. Sind die Unterschiede innerhalb eines Voxels nicht signifikant, werden die Messpunkte regularisiert zusammengefasst. Andernfalls werden die Punkte nicht für die weitere Modellierung verwendet.

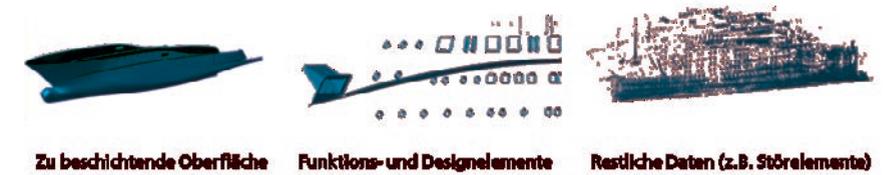


Abb. 12: Klassifizierung

Im Ergebnis liegt eine regularisierte Punktwolke (Abb. 13) vor, die als Basis für die Stützstellen der CAD-Flächen dienen.

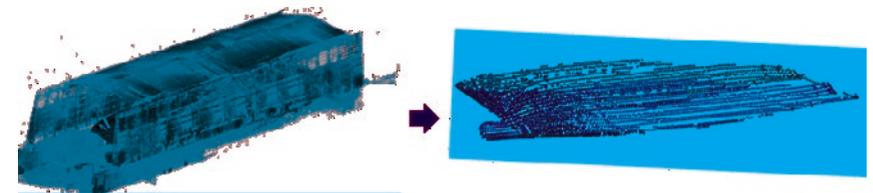


Abb. 13: Datenverarbeitung von den Messdaten zur regularisierten Punktwolke

Eine zentrale Voraussetzung des Projekts ist, dass im optimierten Sollmodell der Yacht alle ästhetischen Anforderungen erfüllt sind. Aufgrund der fertigungstechnischen Abweichungen im Schiffbau bedingt durch thermische Fügeverfahren, würde die Verwendung des Modells des ursprünglichen Entwurfs extrem große Spachteldicken erforderlich machen oder stellenweise sogar negative Spachtelhöhen, was sich beides nicht umsetzen lässt. Aus diesem Grund wurde im Projekt ein Verfahren entwickelt, mit dem das Designmodell über einen Algorithmus durch Verformung an die Punktwolke angenähert wird, ohne die ermittelten Ästhetikkriterien zu verletzen. Dadurch lässt sich der Zeitaufwand gegenüber einer manuellen Flächenerstellung (Grewe et al. 2011) bei gleichbleibend guten Ergebnissen drastisch reduzieren (vgl. Abb. 14).

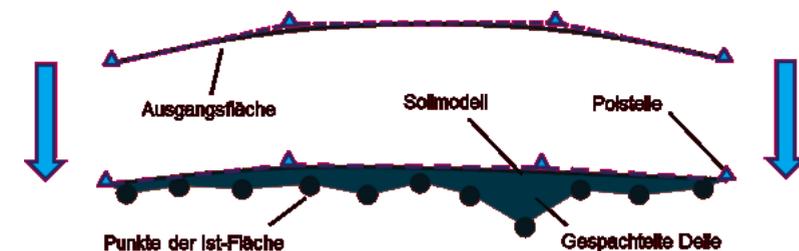


Abb. 14: Darstellung der Polstellenverschiebung und der resultierenden Fläche

Die mathematische Darstellung von Flächen ist Voraussetzung für ihre Verarbeitung in einem Rechner. Eine sehr verbreitete Form hierfür bilden die sogenannten B-Spline-Flächen. Der Begriff „Spline“ kommt aus dem Englischen und bezeichnet eine dünne Latte, die im Schiffbau Einsatz findet. Unter Kraftereinwirkung verformt sich die Latte so, dass die Spannenergie minimal wird. Diese Verformung ist krümmungsstetig und wurde daher lange zur Konstruktion und heutzutage noch immer zur Qualitätsprüfung genutzt. B-Spline-Flächen sind rechteckige Grundflächen, die mathematisch über sogenannte Polstellen in derselben Art verformt werden, wie es bei den genannten Latten der Fall ist. Anschaulich gesehen ziehen diese Polstellen die Fläche lokal in ihre Richtung, allerdings nicht starr, sondern als wären Sie mit einem Gummiband mit der Fläche verbunden. So lässt sich die Fläche am einfachsten entsprechend flexibler Kriterien beeinflussen.

Ein wichtiger Schritt im Projekt war die Identifizierung und Extraktion der Eingangsdaten, die nach Anpassung des Modells erhalten bleiben müssen. Bei Yachten stehen diese optischen Eigenschaften im Vordergrund. In diesem Kontext wird ein möglichst glatter Flächenverlauf der Außenhaut angestrebt. Dieser wird mathematisch über die Krümmungsstetigkeit der Flächenbeschreibung beschrieben und kann am besten über das Verhalten der Reflexion einer geraden Linie veranschaulicht werden. Auf einer Oberfläche mit einem Knick weist die Spiegelung einer geraden Linie an dem Knick einen Sprung auf, das heißt sie würde nicht zusammenhängen. Bei einer strakenden Fläche erscheint eine gerade Linie verbogen, weist jedoch keine Knicke auf. Dies wirkt für die meisten Menschen natürlich und die Fläche wird im Allgemeinen als ästhetisch betrachtet (Siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Eingangsdaten Modellgenerierung (klassifiziert)

Metainformationen		
wissensbasiert	modellbasiert	datenbasiert
		
<ul style="list-style-type: none"> • Designvorgaben z. B. Parallelität, Ebenheit • Einteilung der Yacht in Bereiche mit unterschiedlicher optischer Gewichtung • Strakender Flächenverlauf • Grenzwerte für Spachteldicken • Zulässige Welligkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende schiffsbeschreibende Kurvenverläufe • Flächenaufteilung entsprechend der Fertigungsreihenfolge • Flächenteilung an Block/Sektionsstößen orientiert • Flächenaufteilung anhand von Krümmungsbereichen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoch- und Tiefpunkte (Punkte mit minimalem und maximalem Spachtelauftrag) • Abstand und benötigter Spachtelauftrag zwischen Hoch- und Tiefpunkten • Umgang mit Datenlücken

Als Eingangsgröße für den Flächenanpassungsprozess dienen die in (Tabelle 1) dargestellten Daten der jeweiligen Yacht. Die Messdaten bilden die Ist-Gestalt der Yacht ab. Die zweiten Eingangsdaten bestehen aus den Designdaten der Yacht. Darüber wird die ursprünglich geplante Gestalt der Yacht definiert. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind dies die Flächen der Außenhaut. Zusätzlich werden die Punktwolke der Messung und das Designmodell übereinandergelegt, indem sie jeweils in das übergeordnete Schiffskordinatensystem übertragen werden.

Im Anpassungsprozess werden die Flächen aus der Konstruktion als B-Spline-Fläche beschrieben und in den einzelnen Bereichen ihre Polstellen verschoben, um eine Verformung in Richtung der Messpunkte zu erreichen.

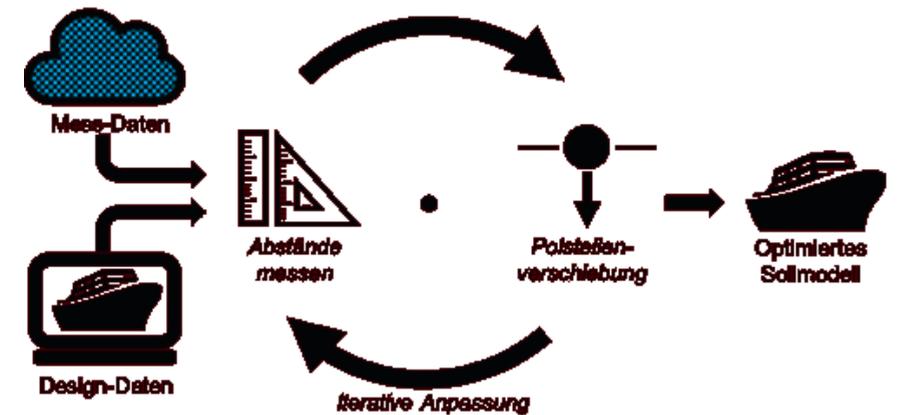


Abb. 15: Allgemeines Vorgehen zur Erzeugung eines optimierten Sollmodells

Für die Verformung der Fläche werden nun aus den Eingangsdaten für die einzelnen Messpunkte der jeweilige Abstand zur Fläche und die resultierende Richtung bestimmt. Aus diesen Abständen wird darauf basierend die Verschiebung der sich in der Nähe befindlichen Polstellen bestimmt. Je näher die Punkte an der Polstelle liegen, desto mehr beeinflussen Sie die Verschiebungsrichtung und -distanz dieser Polstelle. Je größer der Abstand im Bereich der Polstelle, desto mehr wird die Polstelle in Richtung der Punktwolke gezogen.

Grafisch ist dies in Abb. 16 dargestellt. Die einzelnen Richtungsvektoren werden addiert und zu einer Gesamtrichtung kombiniert. Je näher der Punkt an der Polstelle liegt, desto länger wird der jeweilige Vektor zur Kombination eingesetzt.

Die so berechneten Abstände werden daraufhin dazu genutzt die jeweiligen Polstellen zu verschieben. Um dabei jedoch die globalen Flächeneigenschaften und -Qualitätskriterien nicht zu verändern, werden sowohl Richtung als auch Abstand unter globalen Gesichtspunkten angepasst. Dafür werden die jeweiligen Polstellen mit einem abgewandelten Weichzeichner aus der Bilderverarbeitung geglättet. Bei der sogenannten Gaußglättung wird Richtung und Distanz jeweils mit den jeweiligen Nachbarpolstellen verglichen, um

stark unterschiedliche Polstellenverschiebungen und daraus resultierende starke Verzerrungen der Fläche zu vermeiden. Dafür wird ein gewichteter Mittelwert gebildet, bei dem der untersuchten Polstelle die größte Gewichtung zugeteilt wird und die Verschiebungen der Nachbarpolstellen einen deutlich kleineren Einfluss auf den Mittelwert haben. Die geglätteten Werte werden anschließend genutzt, um die Polstellen zu verschieben. Anschließend wird an der verformten Fläche überprüft, ob noch immer alle Vorgaben erfüllt sind. Da es sich wie beschrieben um einen iterativen Prozess handelt, werden anschließend wieder die einzelnen Messungen durchgeführt und die Fläche erneut verformt. Dies wird solange durchgeführt bis die geplante Verschiebungsdistanz aller Polstellen einen Grenzwert unterschreitet.

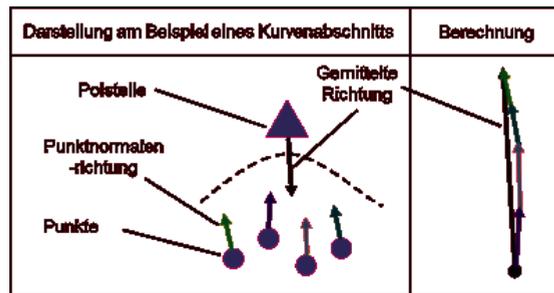


Abb. 16: Beispielhafte Berechnung der Verschiebungsrichtung einer Polstelle

Mit dem erforschten Verfahren ist es nun möglich ein Sollmodell der Yacht automatisiert reproduzierbar zu erzeugen. Die beschriebenen Verfahren wurden in einem Software-demonstrator zur automatisierten Sollmodellgenerierung umgesetzt. Aus den beschriebenen Eingangsdaten erzeugt der Demonstrator automatisch ein Sollmodell und gibt zusätzlich verschiedene Daten zur Bewertung der Fläche aus (bspw. minimale Spachteldicke, lokale Abweichungen, etc.).

SPACHTELSIMULATION UND VERIFIZIERUNG

Das erzeugte optimierte Sollmodell wird im letzten Prozessschritt zur Spachtelsimulation genutzt. Das Ergebnis ist eine Spachtellandkarte. Bisher erfolgte die Simulation durch einen Vergleich des optimierten Modells mit den Messdaten, was zur Übertragung der Messunsicherheit der einzelnen Punkte auf die Spachtellandkarte geführt hat. Zur Bereitstellung einer reproduzierbaren Spachtellandkarte wurden basierend auf den Modellierungsergebnissen Kontrollpunkte bestimmt und zu den Messdaten verglichen (Abb. 17). Dies ermöglicht eine objektive Bewertung.

Die im Zuge des Projektes durchgeführten Verifizierungen haben gezeigt, dass mit den entwickelten Algorithmen zur Aufbereitung und Modellierung reproduzierbare optimierte Sollmodelle in vergleichbarer Güte zur manuellen Modellerzeugung in deutlich kürzerer Zeit generiert werden können (Abb. 18).

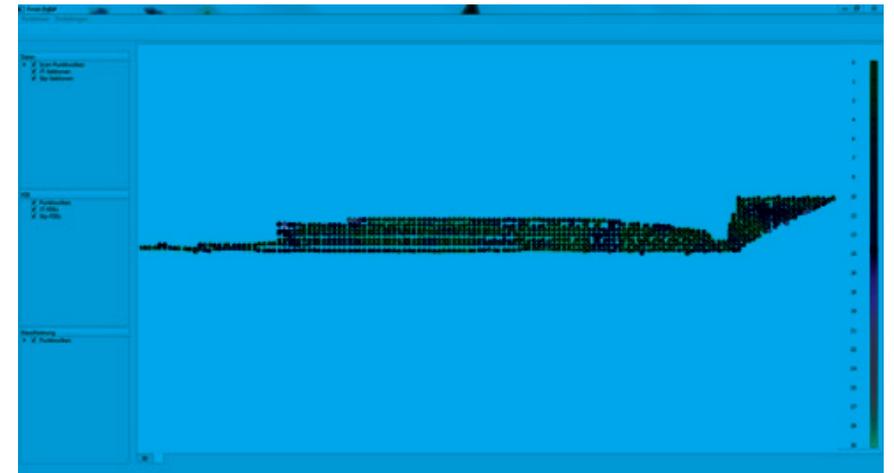


Abb. 17: Software-demonstrator zur Ermittlung der Spachtellandkarte



Abb. 18: Verifizierung des automatisch erstellten optimierten Sollmodells

ZUSAMMENFASSUNG

Der Bau von Megayachten ist ein bedeutender Eckpfeiler der deutschen Werftindustrie. Um auch zukünftig eine Vorreiterrolle auf dem Weltmarkt einzunehmen, wurden im Projekt „FINISH“ grundlegende Erkenntnisse geschaffen, den aufwendigen Prozess der Herstellung des optisch hochwertigen Oberflächenfinishes zu beschleunigen und die Qualität der gespachtelten Oberflächen weiter zu erhöhen. Durch die entwickelten Verfahren wird es möglich der Qualitätssicherung und dem Applikator eine rechnerisch ermittelte und unter den Kriterien „Minimaler Spachtelauftrag bei strakenden Flächenverläufe“ optimierte Spachtelschicht als Planungswerkzeug kurzfristig zur Verfügung zu stellen. Als Ergebnis liegt ein kinematisches Messsystem zur Erfassung von schiffbaulichen Strukturen unter beengten Platzverhältnissen vor. Mit diesem können Genauigkeiten von $\sigma_{3D} < 1 \text{ mm}$ für große Messvolumen bei minimalem Zeitaufwand realisiert werden. Die umgesetzten Algorithmen zur automatisierten Datenanalyse bilden den manuell geprägten und vom handwerklichen Geschick des Applikators abhängigen Spachtelprozess reproduzierbar digital ab und können zukünftig effizient zur Steuerung des Fertigungsprozesses eingesetzt werden. Die geplante Beschleunigung des Prozesses um 60% konnte durch das neuartige Messsystem sowie die automatisierte Modellierung erreicht werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Namen der Finish-Verbundpartner für die Förderung des Projektes sowie dem Projektträger Jülich und seinen Mitarbeitern für die stets kompetente administrative Projektbetreuung.

LITERATUR

- [1] Ehm, M.; Hesse, C. (2012): Entwicklung eines kinematischen Laserscansystems für Anwendungen im Schiffbau. In: Fraunhofer IGD, Institutsteil Rostock (Hrsg.): Go-3D 2012 Computergraphik für die Praxis 2012.
- [2] Hexagon Metrology (2019): LEICA ABSOLUTE TRACKER AT960 Produktbroschüre: http://www.leica-geosystems.de/downloads/123/m1/metrology/general/broschures/Leica%20AT960%20brochure_de.pdf, letzter Zugriff 19.08.2019.
- [3] Hartmann, J.; Trusheim, P.; Alkhatib, H.; Paffenholz, J.-A.; Diener, D.; Neumann, I. (2018) High Accurate Pointwise (Geo-)Referencing of a k-TLS Based Multi-Sensor-System, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-4, 81-88, DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-4-81-2018
- [4] Strübing, T.; Neumann, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: zfv-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2013, 138. Jg., S. 210-221.
- [5] Wanner, Martin-Christoph (Hg.) (2010): Großstrukturen. Zehn Jahre Forschung für die Praxis. Rostock: Redieck & Schade.
- [6] Grewe, Olaf; Geist, Michael (2011): Computergestützte Berechnung und Analyse von Yachtoberflächen. In: Uwe Freiherr von Lukas, Eva-Maria Mahnke, Kristine Haase und Steffen Malo (Hg.): Go-3D 2011: "Computergraphik für die Praxis". Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2011, Rostock 31. August 2011. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., S. 125-136.

HYKOPS – ENTWICKLUNG EINES FRAMEWORKS ZUM ENTWURF HYDRO- DYNAMISCHER KOMPONENTEN FÜR INNOVATIVE MANÖVRIER- UND PROPULSIONSORGANE

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX401

THOMAS STOYE	Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG
DR. ANDRÉ KLEINWÄCHTER	Universität Rostock
JAN CLEMENS NEITZEL-PETERSEN	Technische Universität Hamburg

MOTIVATION

Im Schiffsentwurf und in der maritimen Industrie stellt der Entwurf von Rudern, Propellern und Anhängen zusammen mit dem Entwurf des Rumpfes eine komplexe und häufig zeitkritische Aufgabe dar. Innerhalb sehr kurzer Zeit müssen die Effizienz und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Varianten identifiziert, quantifiziert und optimiert werden. Gleichzeitig ist das Potenzial in Bezug auf Effizienz und Wirkungsgrad sehr groß, was sich allein in der Vielzahl von auf dem Markt verfügbaren propulsionsverbessernden Maßnahmen widerspiegelt.

Während geeignete Werkzeuge für die Rumpfgestaltung seit langem zur Verfügung stehen, werden Anhängergeometrien wie z.B. Ruder, Propeller, Wellenleitungen oder Düsen üblicherweise mit konventionellen 3D-CAD-Programmen entworfen. Diese Programme verfügen jedoch meist weder über Schnittstellen zu CFD-Berechnungsmethoden, noch sind diese für eine hydrodynamische Optimierung entwickelt worden. Weiterhin geht bei der Entwicklung in der Regel der „Entwurfsgedanke“ verloren: Üblicherweise bestehen Anhängergeometrien aus Oberflächen, die über ein Skelett aus Tragflächenprofilen aufgespannt werden (sog. „Lofen“). Bei der Verwendung von kommerziellen Programmen arbeitet man jedoch häufig mit NURBS-Flächen, welche weder Informationen über die mathematische Beschreibung des Aufspannprozesses noch über die zugrundeliegenden Profilerien selbst persistieren können. Auch spezifische Kenngrößen wie Wellenbockwinkel, Propellersteigung etc. lassen sich häufig nicht direkt ablesen und auch nicht direkt editieren. Spätestens beim Austausch über übliche Formate (IGES, STEP, STL) gehen daher viele für Entwurf und Optimierung wichtige Parameter verloren.

Insbesondere bei modernen Propellerformen (z.B. sogenannte Tip-Rake Propeller) stoßen auch die für konventionelle Propeller entwickelten hydrodynamischen Entwurfs- und Optimierungsverfahren an ihre Grenzen. Sowohl die Geometriebeschreibung wie auch übliche, die Propellergeometrie beschreibende Größen sind dann nicht mehr zielführend, da die verfügbaren Formparameter die Formgebung moderner Propeller nicht beschreiben können.

Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung hydrodynamischer Komponenten stellt die Bewertung von Maßstabseffekten dar: Viskose Strömungsberechnungen in Großausführung sind nach wie vor mit einem hohen numerischen Berechnungsaufwand verbunden und (mangels verfügbarer Daten) meist nicht validierbar. Eine zielführende Optimierung insbesondere im Bereich von Propeller und Ruder erfordert jedoch genauere Kenntnisse über die Strömungsverhältnisse in der Großausführung. Ein besseres Verständnis der Maßstabseffekte der Strömung insbesondere im Bereich des Hinterschiffs ist daher für die Entwicklung neuer Propulsion- und Manövrierorgane von entscheidender Bedeutung.

KONSORTIUM

Das Konsortium stellt einen breiten Querschnitt von mit der Thematik befassten Unternehmen dar. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass alle für die Entwicklung des Frameworks relevanten Fragestellungen berücksichtigt werden:

- › Flensburger Schiffbau-Gesellschaft (FSG)
- › Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST)
- › Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA)
- › Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA)
- › Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie (TUHH)
- › Universität Rostock, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Optoelektronik und Photonische Systeme (URO)
- › ISA Propulsion (ISA)
- › Mecklenburger Metallguss (MMG)
- › Friendship Systems (FSS)

ZIELSETZUNG

Das Vorhaben bestand daher aus zwei Kernkomponenten: Einerseits der Entwicklung einer Softwarebibliothek, mittels derer vielfältige, geometrisch komplexe hydrodynamische Komponenten beschrieben, gestaltet, optimiert und ausgetauscht werden können. Des Weiteren wurde der Neubau einer RoPax-Fähre der FSG dazu genutzt, um Großausführungsmessungen eines nominellen und totalen Nachstroms im Schiffsbetrieb durchzuführen.

Diese gemessenen Daten in Verbindung mit der Möglichkeit einer flexiblen Gestaltungsmöglichkeit von innovativen Anhängen eröffnet neue Möglichkeiten zur Umsetzung von effizienteren Propulsions- und Manövrierorganen mit gleichzeitig viel präziseren hydrodynamischen Prognosemöglichkeiten.

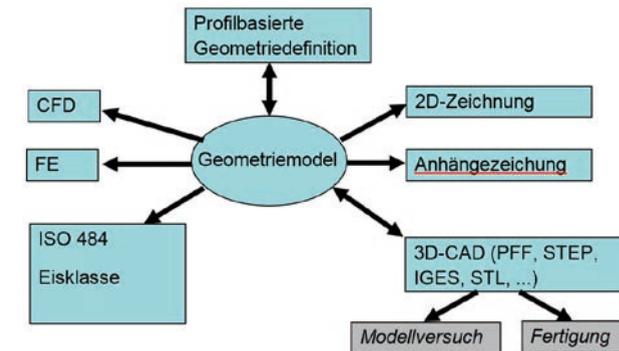


Abb. 1: Schnittstellen für das Geometriemodell

FRAMEWORK

Der Fokus lag weniger auf einer Definition von speziellen Geometrieformaten für vordefinierte Komponenten, sondern vielmehr in der Entwicklung einer quelloffenen Softwarebibliothek, welche möglichst einfach in existierende Softwarepakete eingebunden werden kann. Aus dieser Bibliothek werden dann verschiedenste Geometriebeschreibungen abgeleitet, welche durch das Framework eine präzise und gleichzeitig komponentenspezifische Beschreibung ermöglichen. Dies erleichtert insbesondere den Entwicklungsaufwand im Vergleich zur Anbindung eines definierten Dateiformats erheblich und erlaubt gleichzeitig viel mehr Freiheiten bei der Methodenentwicklung, da nicht auf die Beschränkungen eines zuvor definierten Formates Rücksicht genommen werden muss.

Der modulare Aufbau des Frameworks erlaubt die Entwicklung leistungsfähiger abstrakter (Kern-)Softwareschichten sowie darüber liegender Bibliotheken, welche komponentenspezifische Kenngrößen separat transformieren (z.B. Propellersteigung, Ruderwinkel). Dadurch wird eine hohe Flexibilität bei gleichzeitiger Spezialisierung der jeweiligen Komponenten ermöglicht.

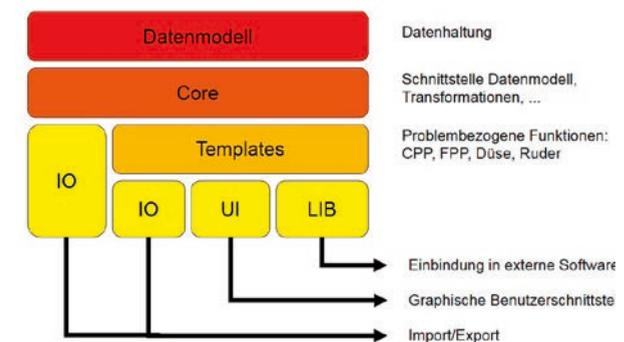


Abb. 2: Struktur des HYKOPS-Frameworks

Umfangreiche Bibliotheken für Propeller, Ruder oder Düsen wurden während des Vorhabens implementiert. Wesentlich war jedoch, die Softwarebibliothek dahingehend zu entwickeln, dass neue Komponenten mit minimalem Entwicklungsaufwand integriert werden können, ohne etwa Anpassungen am Berechnungskern vornehmen zu müssen. Dies soll die Innovationsfähigkeit erhöhen und die Entwicklung neuer Konzepte erheblich erleichtern. Am Beispiel der Entwicklung einer neuen Rudergeometrie wird dies im weiteren Verlauf des Artikels beispielhaft dargestellt.

Weiterhin wurde bei der Entwicklung des Frameworks die vielfältige Software- und Methodeninfrastruktur berücksichtigt, an welche das Framework angebunden werden kann. Um eine möglichst einfache Integration zu ermöglichen, wurden weiterhin folgende Anforderungen definiert:

- > Präzise Oberflächenbeschreibung über beliebig im Raum angeordnete Profile
- > Persistenz von Profildaten in einem eindeutigen Kontext
- > Ableitung der Freiformflächen direkt aus dem Datenmodell
- > Entwicklung eines
 - plattformunabhängigen
 - programmiersprachenunabhängigen
 - robusten und flexiblen

Frameworks zur direkten Einbindung durch externe Programme

- > Geometrieschnittstellen sowie Im- und Exportfunktionen
- > Entwicklung eines ‚Demonstrators‘ zur Darstellung der Funktionalität des Frameworks und als Referenzeinbindung

Bei dem entwickelten Softwarepaket handelt es sich um C++-Bibliotheken, welche problemlos von fast allen gängigen Programmiersprachen angesprochen und in die meisten Softwarepakete eingebunden werden können. Dadurch kann insbesondere auf die (aufwändige und fehleranfällige) Entwicklung eines Parsers für ein Datenformat verzichtet werden, da das entwickelte Framework diese Funktionalitäten bereits bereitstellt und die entsprechenden Lese- und Schreibroutinen wie auch umfangreiche Geometrieoperationen durch direkte Methodenaufrufe genutzt werden können.

Weiterhin wurde eine JNA (Java Native Access) -Schnittstelle entwickelt, über die alle Methoden direkt aus Java angesprochen werden können.

Eine Erweiterung bei der Entwicklung neuer Komponenten ist einfach und ohne Anpassungen am Berechnungskern möglich. Der Berechnungskern stellt dazu umfangreiche Funktionen zur Verfügung, sodass sich die Entwicklung von neuen Datenstrukturen für innovative Komponenten auf eine parametrische Topologiedefinition reduziert.

Beispielsweise erfolgt die Geometriebeschreibung eines (konventionellen) Propellers durch sequenzielle Koordinatentransformationen (Skalierung und Rotation, polare Transformation) derart, dass die beschreibenden Profile auf jedem Radius jeweils in Einheits-

koordinaten beschrieben werden können. Im Datenmodell selbst werden demzufolge keinerlei Informationen über propellerspezifische Kenngrößen wie Steigung oder Sehnenlänge hinterlegt. Vielmehr übernimmt die entsprechende Softwareschicht, welche die Daten einer Komponente vom Typ „Standardpropeller“ interpretiert, die Transformation in ebendiese Kenngrößen. Die Implementierung der Softwareschicht für Standardpropeller bestand daher lediglich aus der Definition der Transformationen sowie der Umrechnungsfunktionen für diverse propellerspezifische Kenngrößen (z.B. Drehwinkel des Profilkordinatensystems für die Profilsteigung).

Dies erlaubt ein wesentlich abstrakteres und demzufolge viel flexibleres Datenmodell, durch welches eben auch vollkommen neue Entwicklungen schnell implementiert und abgebildet werden können.

Während des Vorhabenszeitraums wurden folgende Komponenten integriert:

de.hykops.propeller.default	Schnittstelle für Standardpropeller
de.hykops.propeller.tiprake.constantconeangle	Schnittstelle für Tip-Rake Propeller mit konstanter Profilneigung
de.hykops.propeller.tiprake.default	Tip-Rake Propeller mit variabler Profilneigung in allen Raumrichtungen
de.hykops.rudder.spade	Vollschweberuder
de.hykops.rudder.fsg.entangled.calippo	Vollschweberuder mit verschränkter Hinterkante zur Demonstration der einfachen Implementierung neuer Komponenten
de.hykops.various.shaftline.default	Extrudierte Propellerwelle
de.hykops.various.shaftbracket.default	Wellenbock
de.hykops.various.nozzle.default	Propellerdüse

Das Framework besteht aus folgenden Bibliotheken:

hykops_data:

Abstrakte Datenstruktur, welche die Persistenz beliebiger Loftstrukturen erlaubt

hykops_core

- Schnittstelle zum Datenmodell

- Transformationsvorschriften für alle im Datenmodell hinterlegten Koordinatentransformationen

- Umfangreiche Spline-Algorithmen zur Interpretation der Daten

- Interpretationsalgorithmen für im Schiffbau übliche Profilserien

- Import- und Exportfunktionen zu gängigen Formaten (STL, IGES)

- Umfangreiche Transformationen zur Berechnung von gelofeten 3D-Oberflächen

- Mappingalgorithmen zur Beschleunigung von gelofeten 3D-Oberflächen

- Verschneidungsalgorithmen

- Interpretation von Metadaten

hykops_propeller:

Methoden zur Transformation der Geometriedaten in propellerspezifische Charakteristika (konventionelle und Tip-Rake Propeller)

hykops_ruder:

Methoden zur Transformation von Rudern

hykops_various:

Schnittstellen für Propellerwellen, Wellenböcke und Düsen

Der Datensatz einer Komponente besteht dabei im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- > Einen Schlüssel, welcher den Typ der Komponente spezifiziert. Hierüber wird die komponentenspezifisch nachgelagerte Bibliothek geladen, welche dann die zugehörige Daten- und Benutzerschnittstelle bereitstellt
- > Eine Sequenz von Koordinatentransformationen, über die die Loftfunktion wie auch die Profilebenen im Raum transformiert werden. Beispielsweise wird die Loftkurve eines herkömmlichen Propellers durch einen Vektor in einem Zylinderkoordinatensystem definiert, wogegen ein Tip-Rake Propeller nachträgliche Transformationen erfordert, welche dann die Beschreibung von gekippten Profilen in allen Raumrichtungen erlauben. Eine Propellerdüse hingegen wird durch die Definition eines Loftvektors in Umfangsrichtung definiert. Persistiert werden jedoch lediglich der Typ der Transformation sowie die dazugehörigen Parameter.
- > Ein Satz von Profilebenen und Profilen entlang der Loftachse
- > Eine Loftdefinition, welche durch (Teil-)kurven der Profile eine geschlossene Oberfläche definiert
- > Metadaten erlauben die Persistenz weiterer Kenngrößen in beliebigem Umfang, z. B. die Flügelzahl eines Propellers, Symmetrieebenen etc.

Das Framework bietet weiter die Möglichkeit, anstelle von diskreten Geometriedefinitionen Oberflächen direkt durch ihre Serienprofile zu definieren. Die daraus resultierende Oberflächendefinition kann daher eindeutig aus dem Framework abgeleitet werden. Die Entwurfsinformation z. B. über die verwendete Profilerie und die Profilparameter kann somit sehr einfach im Datenmodell persistiert werden und steht bei späteren Designänderungen immer zur Verfügung. Die Transformation z. B. der Zeichenkette ‚NACA 0020‘ in eine entsprechende Geometrie übernimmt dann wieder das Framework.

Das entwickelte Framework wurde während des Vorhabens sowohl in einen für diesen Zweck entwickelten Demonstrator wie auch in eine moderne Entwurfsumgebung (RDE/E4) eingebunden. Zur Berechnung und Optimierung von Tip-Rake Propellern wurde weiterhin eine Anbindung an panMARE hergestellt.

EINBINDUNG DES FRAMEWORKS IN EINE SCHIFFBAULICHE ENTWURFS-UMGEBUNG (RDE)

Sowohl der für das Vorhaben entwickelte Demonstrator wie auch die Schiffsentwurfsumgebung RDE/E4 basieren auf einer Eclipse-RCP-Umgebung (Rich Client Platform). Die in HYKOPS entwickelte JNA-Schnittstelle konnte daher einfach durch entsprechende OSGi (Open Services Gateway initiative)-bundles eingebunden werden.

Neben Benutzerschnittstellen für Profile, Koordinatentransformationen, 3D-Darstellungen u. a. wurden für alle Komponenten spezifische Benutzerschnittstellen entwickelt, welche direkt auf die Methoden des Frameworks zugreifen. Wie geplant war durch die direkte Anbindung die Entwicklung mit erheblich weniger Aufwand verbunden im Vergleich zu einer Implementierung eines Parsers für das Datenformat und die entsprechend umfangreichere (und redundante) Interpretation der Daten.

Für die Bereitstellung von spezifischen Benutzerschnittstellen werden OSGi-extension points genutzt. Diese stellen die öffentlich zugänglichen Schnittstellen der OSGi-Bundles dar, über welche diese dann zur Laufzeit geladen werden.

Ein wesentlicher Vorteil für die Auslegung der gesamten Anhangskonfiguration eines Schiffes stellen die komponentenspezifischen Benutzerschnittstellen dar: So ist es z. B. möglich, Propeller oder Ruder direkt im Modell der gesamten Anhangskonfiguration zu entwerfen (s. Abb. 3). Dies erleichtert insbesondere die Festlegung der Schnittstellen zwischen diesen Komponenten, beispielsweise den Spalt zwischen Ruder und Propeller oder die Anordnung der Wellenböcke, da die Entwurfsmethodik einer Komponente direkt in den Entwurf des gesamten Hinterschiffs eingebunden werden kann.



Abb. 3: Gesamtmodell einer Hinterschiffskonfiguration mit Dateninterface für einen Propeller

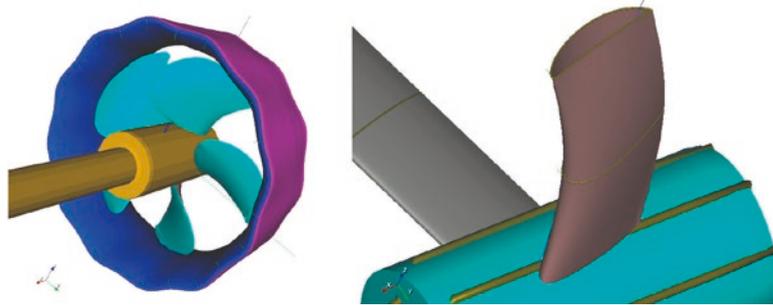


Abb. 4: Beispiel einer Düsenmodellierung und eines aerodynamisch verschränkten Wellenbocks

EINBINDUNG DES FRAMEWORKS IN EINE HYDRODYNAMISCHE BERECHNUNGS SOFTWARE (PANMARE)

Der auf der Potentialtheorie basierende Strömungslöser panMARE erlaubt die Berechnung der Umströmung von Propellern und anderen Körpern. Im an der TUHH entwickelten Methodenpaket wird auch die Berechnungsvorbereitung programmiert, sodass sich die Geometrieschnittstelle in panMARE sehr gut für eine Kopplung mit dem HYKOPS-Framework eignet (s. Abb. 6). panMARE nutzt die in HYKOPS enthaltenen Kernfunktionen zum Erzeugen der Oberflächen und liest die Koordinaten der Gitterpunkte aus, sodass das numerische Modell in panMARE auf der in HYKOPS hinterlegten Oberfläche basiert (s. Abb. 7). Innerhalb des Vorhabens wurde panMARE in Verbindung mit einem Optimierungsalgorithmus an HYKOPS angebunden. Dabei variiert das Optimierungspaket DAKOTA die Geometrieparameter für HYKOPS innerhalb vorgegebener Grenzen und im Anschluss wird die jeweilige Propellervariante mit panMARE vernetzt und die Umströmung numerisch berechnet. Die Evaluation der Propellergeometrie hinsichtlich des Kavitationsverhaltens, des Wirkungsgrads und weiterer Kennwerte wird in einer Zielfunktion zusammengefasst, die zu Bewertung der Güte der Variante an den Optimierer zurückgegeben wird. Beispielhaft wurde dies für Tip-Rake Propeller durchgeführt, sodass nach der Untersuchung einer Vielzahl von Formvariationen die Geometrie aus Abbildung 5 vorlag.

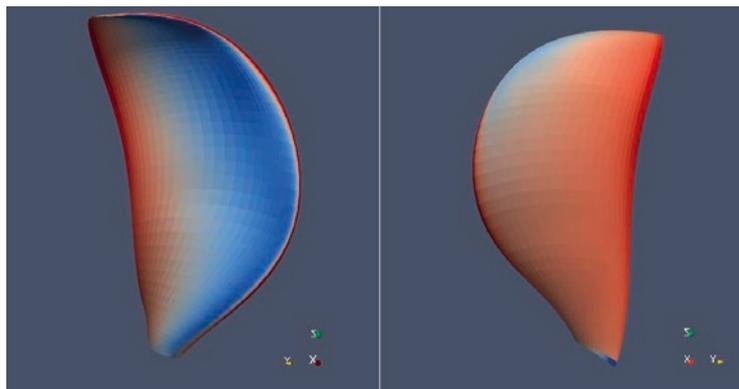


Abb. 5: Druckverteilung auf der optimierten Propellergeometrie mit einem Hang entgegen der Strömungsrichtung (links: Saugseite, rechts: Druckseite)

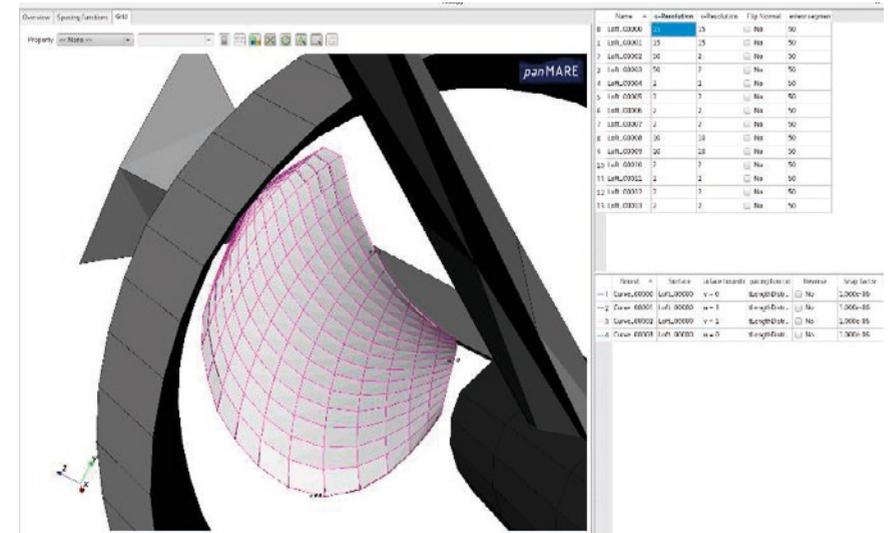


Abb. 6: Gittererzeugungstool in panMARE auf der aus HYKOPS importierten Oberfläche

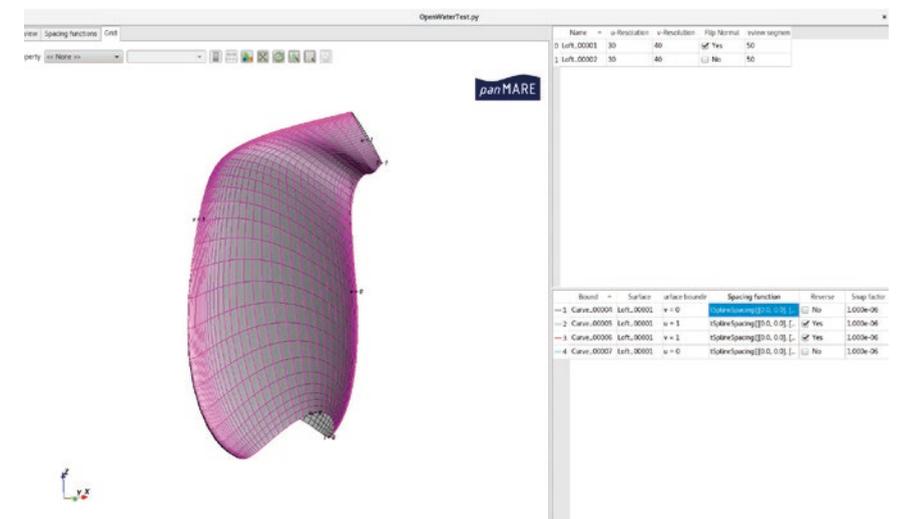


Abb. 7: In panMARE aus HYKOPS importierte Geometrie eines Propellers mit abgeknickter Flügelspitze

GEOMETRIEBESCHREIBUNG FÜR TIP-RAKE PROPELLER

Eine weitere Motivation des Vorhabens war die aus der fortschreitenden Entwicklung von modernen Propellern resultierenden Anforderungen, Propeller mit starkem Hang oder großer Steigungsrücklage an der Flügelspitze hinreichend beschreibend zu können. Das einzige verbreitete Austauschformat für Propellergeometrien (PFF) erweist sich hier nicht mehr als zeitgemäß. Die erzeugenden Profile werden dort auf Zylinderschnitten definiert, was bei starkem Hang und auch starker Steigungsrücklage zu Verzerrungen an der Propellerspitze führt. Zudem entspricht es eher dem Entwurfsgedanken, ein gekipptes Profil

zu definieren, welches an den zu erwartenden Stromlinien ausgerichtet werden kann. Daher wurden in das HYKOPS-Framework zwei Ansätze zur Modellierung von Tip-Rake Propellern implementiert:

- › Eine Geometriedefinition, welche zur Beschreibung anstelle von Zylinderschnitten Kegeloberflächen verwendet. Dabei weisen alle Profile den gleichen Neigungswinkel auf.

Diese Beschreibung eignet sich für den Entwurf von Propellern mit mäßigem Hang und mittlerer Rücklage. Insbesondere bei größeren Rücklagen ergibt sich jedoch ein hierdurch induzierter Hang. Außerdem befinden sich die Profile infolge der jeweiligen lokalen Steigung auf einer Spiralkontur, welche in dieser Beschreibung nicht unbedingt dem zu erwartenden Strömungsverlauf entspricht.

- › Für Propellergeometrien mit beliebig gekrümmter Flügelgeometrie wurde daher eine weitere Topologie implementiert. Dabei folgt die Transformationsreihenfolge zunächst jener für konventionelle Propeller. Dies erleichtert insbesondere die Übertragung herkömmlicher Propellergeometrien (z. B. über das PF-Format) in die neu entwickelte Beschreibung. Angehängt an die konventionelle Transformation der Profilschnitte in Zylinderkoordinaten werden dabei zwei krummlinige Koordinatentransformationen vorgenommen. Diese erlauben es, jedes Profil jeweils um seine Querachse und auch um die Längsachse zu kippen. Die propellertypischen Kennwerte für jedes Profil (Sehnenlänge, Steigung, Rücklage, Hang) werden dadurch um zwei Parameter („Tilt“-Neigung um die Querachse und „Spiral“-Drehung um die Längsachse) erweitert (s. Abb. 8). Über diese zusätzlichen Parameter sind problemlos Profildrehungen um mehr als 90° möglich. Dass derartige Propellergeometrien sinnvoll und sehr effizient sein können, wurde an einem Neubau einer RoPax-Fähre der FSG nachgewiesen. Für eine parametrische Optimierung wurden im Rahmen des Vorhabens nun die Voraussetzungen zur Gestaltung und Optimierung beliebig verformter Flügelspitzen geschaffen.



Abb. 8: Tip-Rake Propeller mit zweifach gekippten Profillebenen

ENTWICKLUNG EINER RUDERGEOMETRIE FÜR EINE ROPAX-FÄHRE

Das Framework wurde dazu genutzt, um innerhalb kurzer Zeit eine Entwurfsmethode für eine neue Rudergeometrie zu entwickeln, ein solches Ruder zu entwerfen und zu testen.

Hierbei sollte der Einfluss eines geänderten Hinterkantenverlaufs untersucht werden. Dazu wurde:

- › Die Topologie des Ruderkonzepts in das Framework implementiert,
- › Eine Benutzerschnittstelle innerhalb der HYKOPS-Schnittstelle der Entwurfsumgebung RDE/E4 geschaffen
- › Das Ruder entworfen
- › Ein 3D-Modell zur Modellfertigung erstellt
- › Das Ruder parallel mit anderen Rudern im Rahmen von Kavitationsversuchen für einen Neubau der FSG experimentell untersucht sowie
- › CFD-Berechnungen durchgeführt

Der sehr kurze Zeitrahmen (wenige Wochen) zwischen Konzeptionierung und den Modellversuchen demonstriert die Leistungsfähigkeit des Frameworks, da insbesondere die erforderliche Softwareimplementierung aufgrund der bis dahin geleisteten Arbeiten am Kern sehr gering waren. Hierdurch konnte demonstriert werden, dass mittels des HYKOPS-Frameworks innerhalb kurzer Zeit eine komponentenspezifische Entwurfsumgebung für innovative hydrodynamische Bauteile geschaffen werden kann.

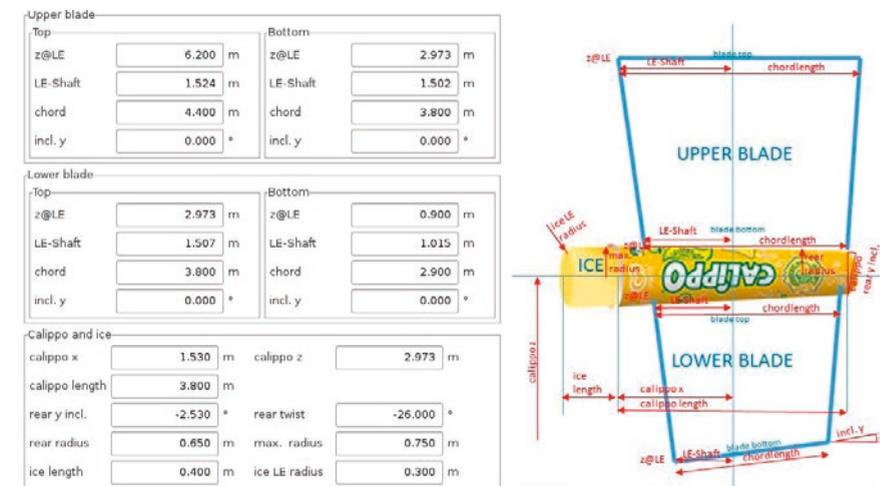


Abb. 9: Benutzerschnittstelle für die Rudergeometrie mit verschränkter Hinterkante

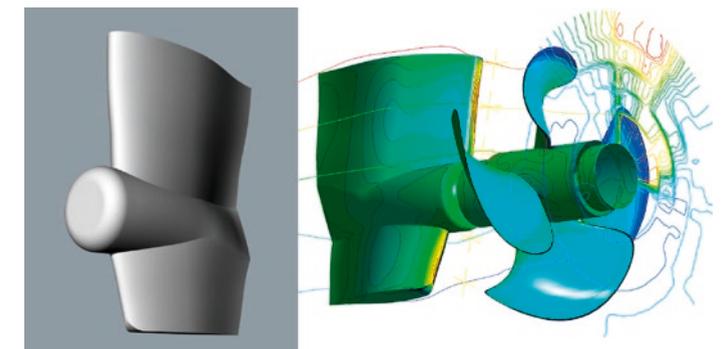


Abb. 10: Mit HYKOPS entworfene Rudergeometrie (links), viskose Strömungsberechnung der Propeller-Ruder Konfiguration (rechts)

MESSUNG NOMINELLER UND TOTALER NACHSTROMDATEN IN DER GROSSAUSFÜHRUNG

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Erfassung der Zuströmbedingungen zum Propeller in der Großausführung mit dem Hintergrund der Optimierung der im Framework entwickelten Propellerentwurfsmethoden. Da die Ungenauigkeiten von full-scale Nachstromberechnungen derzeit mindestens in der gleichen Größenordnung liegen, wie die prognostizierten Wirkungsgradverbesserungen innovativer Antriebsstränge, können Großausführungsmessungen die Ergebnisse deutlich präzisieren.

Zu diesem Zweck wurde eine RoPax-Fähre während der Bauphase bei der FSG basierend auf den Erfahrungen aus einem vorherigen Projekt (Konkav II) mit vier Beobachtungsfenstern über einem Propeller ausgestattet. Ein besonderer Fokus lag in der Aufzeichnung eines nominellen Nachstroms. Dazu wurde für eine Nachfahrt des Schiffs nur einer der beiden Antriebsstränge genutzt und vor dem freilaufenden Propeller konnten nahezu unbeeinflusste Geschwindigkeitsdaten aufgezeichnet werden.



Abb. 11: Full-scale Nachstrommessungen – RoPax Fähre „Loch Seaforth“ mit Hybrid-Antrieb und Beobachtungsfenstern (links), Laseraufbau des PIV – Messsystems / Kameraaufbau – installiert im Hintergrund im gleichen Spant (rechts)

Die Messtechnik wurde in diesem Vorhaben basierend auf KonKav II dahingehend weiterentwickelt, dass über die zweite Beobachtungsrichtung alle drei Nachstrom-Geschwindigkeitskomponenten (OD3C) aufgezeichnet werden können. Die Ummontage der Aufbauten fällt mit ungefähr zwei Stunden so gering aus, dass annähernd gleiche Strömungsbedingungen bei den sequentiell ausgeführten 2C-Messungen vorherrschen. Das Messfeld wird punktuell durch das Verfahren des Kamera- und des Laseraufbaus mit einer frei definierbaren Schrittweite aufgelöst. Durch eine Optimierung der optischen und mechanischen Ankopplung an die eingelassenen standardisierten Bullaugen und die Schiffsspantenkonstruktion ist die Messtechnik sehr flexibel auf nahezu allen Schiffen einsetzbar. Die Optimierungen führten dazu, dass die Messtechnik nach dem Projekt durch das Start-Up KED Photonics GmbH kommerziell angeboten und erstmalig eingesetzt wurde.



Abb. 12: Nachstrommessungen im Hykat der HSVA - Kalibriertarget unterhalb der Fensterscheiben (links), Zwei Kameras mit Kabelzuführungsschläuchen plus Target-Traversierungsschse tauchbar fixiert im Schiffmodell (rechts)

Basierend auf den full-scale Messungen wurden innerhalb des Projektes im Hykat der HSVA an den gleichen Messpunkten wie in der Großausführung Nachstromgeschwindigkeiten im Modellmaßstab aufgezeichnet. Dazu kamen zwei wasser- und druckdicht gekapselte Kameras zum Einsatz. Für Geschwindigkeitsdaten in unterschiedlichen Höhenebenen wurde der Laserlichtschnitt über eine Seitenscheibe horizontal eingekoppelt und vertikal verfahren. Die OD2C Nachstromdaten wurden analog zur Großausführung nominell und mit rotierendem Propeller aufgezeichnet.

Insgesamt stehendurch die Messungen orts aufgelöste 3C Geschwindigkeitsdaten für einen totalen full-scale Nachstrom aus einer Messkampagne und 2 2C Datensätze (total und nominell) aus einer zweiten full-scale Messkampagne zur Verfügung. Zusammen mit den Modellgeschwindigkeiten kann das Datenmaterial zur Untersuchung von Skalierungseffekten genutzt werden. Außerdem wird die Optimierung und Einordnung parallel angestellten numerischer Berechnungen verbessert, was bspw. zu einer präziseren Effizienzabschätzung innovativer Propulsionsorgane führen kann.

Beispielhaft dargestellt sind die in der Großausführung gemessenen (EFD) totalen und nominellen Nachstromfelder. Die Geschwindigkeit an Messpunkt 71 dient als Referenzgeschwindigkeit. Als die am wenigsten vom Schiff beeinflusste Geschwindigkeit kommt sie der Schiffsgeschwindigkeit über Wasser am nächsten. In einem weiteren Diagramm sind die Querkomponenten der Strömung mit arbeitendem Propeller in der Großausführung visualisiert.

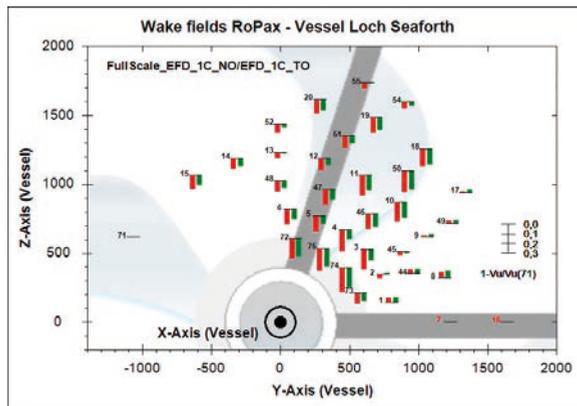


Abb. 13: Nominelle (rot) und totale (grün) Nachstromziffern in der Großausführung

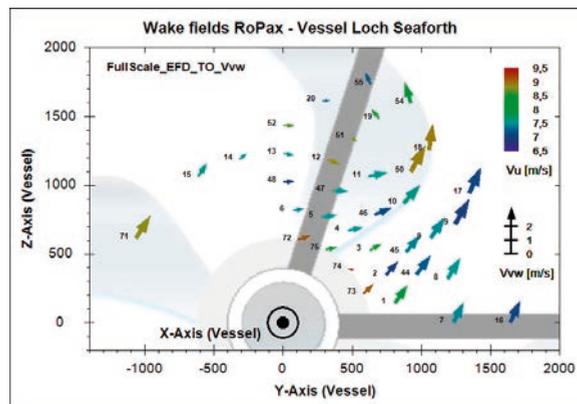


Abb. 14: Querkomponenten des aufgezeichneten totalen Nachstroms in der Großausführung

Zusätzlich zu den Nachstromdaten belegten die ebenfalls angestellten Propellerbeobachtungen die geringe Neigung des Kappelpropellers zu kavitieren.



Abb. 15: Kavitationsbeobachtungen am Propeller der RoPax-Fähre

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Arbeiten am HYKOPS-Framework wurden von praktischen Produktentwicklungen begleitet, welche zur ständigen Validierung herangezogen werden konnten. So wurde das Datenmodell während des Vorhabens mehrfach angepasst und erweitert, um den Erfahrungen aus der praktischen Anwendung Rechnung zu tragen. Es konnte gezeigt werden, dass neue und innovative hydrodynamische Komponenten mit Hilfe der entwickelten Methoden schneller und besser entworfen und optimiert werden können. Die Einbindung des HYKOPS-Frameworks in unterschiedliche Berechnungs- und Entwurfswerkzeuge zeigt, dass der Ansatz der Entwicklung einer Softwarebibliothek anstelle eines starren Datenformats praktikabel ist und schnell zu Ergebnissen führt. Die parallele Entwicklung des Demonstrators spielte dabei eine wichtige Rolle, da dieser im Entwurfsprozess intensiv genutzt wurde und die Entwicklungen so in den praktischen Schiffsentwurf einfließen konnten.

Über den Vorhabenshorizont hinaus wurden bereits diverse weitere Komponenten in das Framework integriert und im Entwurfsalltag angewendet. Die erstellten Datenmodelle finden in der Praxis Anwendung und dienen als Basis für unterschiedlichste Auslegungen. Insbesondere für viskose CFD-Berechnungen und Optimierungen steht nun eine solide geometrische Basis zur Verfügung. Hiermit können in weiteren Schritten z.B. automatische Geometrieaufbereitungen und Vernetzungen für CFD-Berechnungen durchgeführt werden.

Die Großausführungsmesstechnik konnte als geeignetes optisches Verfahren für die dreikomponentige Nachstromgeschwindigkeitsvermessung an realen Schiffen qualifiziert werden.

Durch die aufgezeichneten effektiven und nominellen Nachstromfelder können reell zu erwartende Effizienzsteigerungen durch innovative Propulsionskomponenten wie den Kappel-Propeller korrekter bewertet werden. Weiterhin wird das Verständnis sowohl der Maßstabseffekte wie auch der Arbeitsbedingungen für den Propeller verbessert.

Das gestiegene internationale Interesse an Nachstrommessungen in der Großausführung und die Technologieentwicklung innerhalb der BMWi-geförderten Projekte KonkavII und HYKOPS führte zur Ausgründung der Firma KED Photonics GmbH. Die Firma bietet derzeit als einzige weltweit in Kooperation mit der Universität derartige Nachstrom-Validierungsmessungen an und stärkt damit die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Alleinstellungsmerkmale des Standorts Rostock.

Hinsichtlich des Planungs- und Installationsaufwandes lässt sich das Messverfahren jedoch weiter optimieren. Ein bezüglich der Masse und des Ankoppelkonzepts optimierter Aufbau könnte wesentlich effektiver Datensätze für den Propulsionsentwurf zur Verfügung stellen. Außerdem werden dann neue höchst interessante Anwendungsgebiete denkbar. So könnte das Verständnis der Strömungsverhältnisse in der Großausführung bspw. durch die Aufzeichnung der unmittelbaren Propellerumströmung und des Propellerstrahls sowie der Identifizierung von Grenzschichtphänomenen weiter vorangetrieben werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Mitarbeitern des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie des Projektträgers Jülich (PTJ) für die finanzielle Förderung und administrative Unterstützung des Verbundprojektes HYKOPS.

Die Autoren bedanken sich auch bei Caledonian Maritime Assets Ltd (CMAL) sowie der Besatzung des Schiffes ‚LOCH SEAFORTH‘ für die unkomplizierte Unterstützung der Bordmessungen während des Projekts.

LITERATUR

- [1] 26. ITTC. The Specialist Committee on Scaling of Wake Field - Final Report and Recommendations to the 26th ITTC. In Proceedings of the 26th International Towing Tank Conference, 2011.
- [2] I. H. Abbot and E. von Doenhoff. Theory of Wing Sections. Dover Publications Inc., 1958.
- [3] A. Busch. Vergleich verschiedener linearer Algorithmen für Spline-Kurven. Bericht 509, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 1990.
- [4] J. Carlton. Marine Propellers and Propulsion. 2nd ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2007.
- [5] W. Day et. al. Full Scale Propeller Disk Wake Survey and Boundary Layer Velocity Profile Measurements on the 154-Foot Ship R/V ATHENA. Technical Report 0833-01, DTNSRDC, 1980.
- [6] A. Kleinwächter et al. Full-Scale Total Wake Field PIV-Measurements for an Enhanced Cavitation Prediction. In 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2014.
- [7] J. Kux et al. LDV Wake Measurements Onboard Sydney Express. Technical Report 424, Shipbuilding Institute, University of Hamburg, 1982.
- [8] G. Lammers et al. Correlation of Wake, Cavitation and its Consequences. Technical Report 1565, Hamburg Ship Model Basin, 1989.
- [9] J. Laudan. Correlation of Wake Measurements in Model and Full Scale. Technical Report 1529, Hamburg Ship Model Basin, 1983.
- [10] E. Praefke et al. A generalized description of hydrodynamic parts based on aerodynamic profile sections. In Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors - SMP'17, Espoo, Finland, 2017.
- [11] R. Schulze. Beschreibung des Propeller-File-Formates (PFF-file) Version 2.0. Bericht rev. Fassung von Bericht 2017/1993, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, Potsdam, 1998.

PRICE – VORHERSAGE VON EIS-SCHIFF-INTERAKTION (PREDICTION OF ICE-SHIP-INTERACTION)

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX412

DR.-ING. ADELE LÜBCKE	Pella Sietas GmbH, Hamburg
M.SC. MALTE HAHN	Pella Sietas GmbH, Hamburg
M.SC. LARS JOHNSEN	Technische Universität Hamburg, Hamburg
PROF. DR.-ING. THOMAS RUNG	Technische Universität Hamburg, Hamburg
PROF. DSC. (TECH.) SÖREN EHLERS	Technische Universität Hamburg, Hamburg
M.SC. MICHAEL HUISMAN	Technische Universität Hamburg, Hamburg
M.SC. SANDRO ERCEG	Technische Universität Hamburg, Hamburg
HENRIK ALPO SJÖBLOM	Rolls-Royce Marine AS, Ålesund/Norway
DR. WEI CHAI	NTNU, Trondheim/Norway
PROF. BERNT J. LEIRA	NTNU, Trondheim/Norway

1. EINLEITUNG

Mit der Veränderung des globalen Klimas hat sich die Eisausdehnung über dem Arktischen Meer stark reduziert und ermöglicht für die Handelsschifffahrt alternative Routen. Der Seeweg führt über die Arktispassage von Nordeuropa nach Fernost mit einer Verkürzung der Entfernung um bis zu 40%. Auch das Fenster für Offshore-Einsätze zur Förderung natürlicher Ressourcen vergrößert sich und macht die Erschließung ehemals unzugänglicher Gebiete möglich.

Die Vorteile der neuen Seewege und der Erkundung natürlicher Ressourcen führen zu deutlich anspruchsvolleren Umweltbedingungen. Die Schiffe müssen für den Einsatz in Eis ausgelegt werden. Aktuelle Grundlage zur Dimensionierung der Strukturen und der Anlagen basieren auf empirischen Erkenntnissen und Erfahrungen aus relativ dünnem, einjährigem Eis, die weitgehend in der Ostsee gewonnen wurden. Eine direkte numerische Berechnung der Eislasten und die Bestimmung der Eiseigenschaften sind bisher nicht verfügbar. Daher werden bislang für den Nachweis der Operationsfähigkeit von Schiffen im Eis aufwändige und kostspielige Modellversuche durchgeführt. Die lokalen Belastungen auf dem Schiffsrumpf können dabei nicht umfänglich erfasst werden. Zudem bleibt die Problematik, die Ergebnisse aus dem Modellversuch hinreichend genau auf die Großausführung zu übertragen. Diese Thematik wurde in dem Forschungsvorhaben PRICE aufgegriffen, um ein numerisches Berechnungsmodell zur Bestimmung der Lasten zu entwickeln, die auf ein Schiff während der Fahrt im Eis wirken.

PROJEKTPARTNER

Das Vorhaben hat die verschiedenen Kompetenzen der Projektpartner zusammengebracht. Zu dem Konsortium zählen folgende Industriepartner und Hochschulen:

Pella Sietas GmbH

Die Pella Sietas GmbH ist aus dem Zusammenschluss der J.J. Sietas KG und Open JSC Pella aus St. Petersburg, Russland, entstanden. Pella ist das führende Unternehmen auf dem russischen Markt für Schlepper, speziell für den Einsatz im Eis. Sietas ist die älteste deutsche Werft und lieferte zahlreiche Spezialschiffe wie offene Containerschiffe, Schwergutschiffe, Tankschiffe, Fähren und ein Offshore-Installationsschiff.

TUHH, Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen (M-10)

Das Institut unter der Leitung von Prof. Sören Ehlers besteht derzeit aus 35 Mitarbeitern und einem großen Labor für Festigkeitsuntersuchungen. Das Institut befasst sich mit der Erforschung von Schiffen und Offshore-Strukturen unter Betriebs- und Extrembedingungen mit experimentellen, analytischen und numerischen Analyseverfahren.

TUHH, Institut für Hydrodynamik und Schiffstheorie (M-08)

Das Team um Prof. Thomas Rung war und ist an mehreren Aktivitäten im Bereich Computational Engineering beteiligt. In den letzten 4 Jahren wurden mehr als 15 nationale und internationale industrielle Verbundforschungsprojekte mit rund 20 wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt.

NTNU

Das Department of Marine Technology der NTNU verfügt über langjährige Erfahrung in der Analyse und Konstruktion von Schiffen und Offshore-Strukturen. Dabei liegt der Fokus mitunter auf die Validierung der Berechnungsmodelle durch den ausführlichen Vergleich mit Ergebnissen von Großausführungsmessungen.

Rolls-Royce Marine

Rolls-Royce Marine verfügt über ein weltweit führendes Leistungsspektrum auf dem Schiffsmarkt, das Schiffdesign, die Integration komplexer Systeme sowie die Lieferung und Unterstützung von Antriebs- und Antriebsausrüstung umfasst. Rolls-Royce verfügt über langjährige Erfahrung in der Lieferung unternehmenskritischer Systeme für Offshore-Öl- und Gasbohrinseln, Offshore-, Handels- und Marineschiffe.

ARBEITSPAKETE

Für die Bearbeitung der genannten Fragestellung wurde das Forschungsvorhaben PRICE in sechs Arbeitspakete unterteilt. In enger Zusammenarbeit der Hochschulen und Industriepartner werden die Grundlagen, die Berechnungsmodelle, Modellversuche, die Datenanalyse und die Anwendbarkeit anhand einer Designstudie erarbeitet, durchgeführt und untersucht. Die Arbeitspakete beinhalten folgende Themen:

1. Das erste Arbeitspaket (WP1) setzt den Fokus auf die Grundlagen, die den erforderlichen Input für die weiteren Arbeitspakete liefert. Der Stand der Technik wird in Bezug auf Eisbruchfestigkeit und Rumpfbelastung mit Fokus auf die Vollständigkeit von Daten, detaillierte Berechnungsmodelle zum mechanischen Verhalten und Modellversuche überprüft.
2. Ein bestehendes Kontaktmodell der TUHH [16] wird im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes verbessert, um die Kontaktkräfte aus der berechneten Kollisionsdynamik zu erhalten. Die beim Versagen des Flächeneises entstehenden Eisschollen können sich im δ DoF frei bewegen und werden einer turbulenten, viskosen Strömung unter Verwendung einer Lattice-Boltzmann-Methode unterworfen, die an eine modifizierte Physik-Engine gekoppelt ist.
3. Der Schwerpunkt im dritten Arbeitspaket liegt auf einem realistischeren Modell für das Bruchmuster und einem verbesserten Lastmodell. Basierend auf den Arbeiten von Nevel [19], wird ein Eisbruchmodell entwickelt, das einen - durch Auftrieb des Wassers - elastisch gelagerten Keil verwendet, um die Kante belastete des Flächeneises zu modellieren. Dafür wird der von Erceg et al. [6] vorgestellte Ansatz erweitert.
4. Das Arbeitspaket vier wird groß angelegte Laborexperimente durchführen und analysieren, um die in WP 2 und WP 3 abgeleiteten Last- und Bruchmodelle zu unterstützen.
5. In diesem Arbeitspaket wird NTNU federführend sein und eine Methode zur Vorhersage extremer Belastungen entwickeln. Die Methode ermöglicht die Bestimmung eines diskreten Spektrums von Eiseigenschaften. Mit den Ergebnissen können routenabhängig die Betriebsbedingungen des Schiffes bestimmt werden und somit die Unsicherheit des Schiffsentwurfs minimiert werden.
6. Die Anwendbarkeit wird anhand einer Designstudie geprüft. Dafür werden alle entwickelten Berechnungsmethoden genutzt, um das Potential bspw. möglicher Gewichtsersparungen zu identifizieren.

In Abbildung 1 ist der Arbeitsplan und der Zusammenhang der Arbeitspakete im Forschungsvorhaben PRICE dargestellt. Die Arbeitspakete bauen aufeinander auf und erfordern eine enge Zusammenarbeit aller Partner.

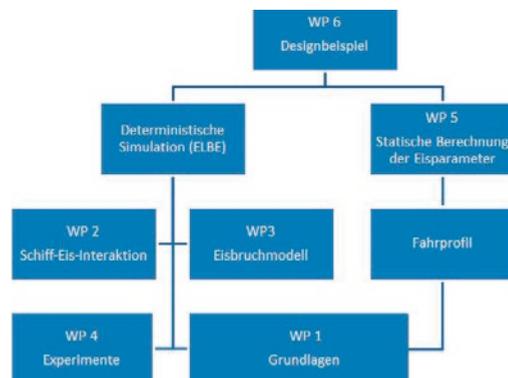


Abb. 1: Darstellung des Arbeitsplans und der Arbeitspakete im Forschungsvorhabens PRICE

Die Ergebnisse der Arbeitspakete werden im Folgenden anhand des Anwendungsbeispiels vorgestellt. Dazu wird zunächst die Designstudie mit dem Fahrprofil präsentiert. Im nächsten Schritt werden die Berechnungsmethoden und deren Ergebnisse bei Anwendung auf die Designstudie beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

2. DESIGNSTUDIE

Für die Designstudie wurde der Entwurf eines Containerschiffs für eine geplante Route entlang der Nordostpassage untersucht. Die Hauptabmessungen des Entwurfes sind in Tabelle 1 aufgeführt. Bei dem Schiffsentwurf handelt es sich um ein Tripel-Acting-Konzept, welches mit langen Wasserlinien und flachen Schnitten eine geringere Heckwelle für eisfreie Fahrt erzeugt. Bei Fahrt in Eis mit geringen Eisdicken wird das Schiff auf Entwurfstiefgang vertrimmt. Die Struktur ist in dem entsprechenden Bereich verstärkt ausgeführt. Für die Fahrt in großen Eisdicken wird das Schiff rückwärtsfahren.

Tabelle 1: Hauptabmessungen Anwendungsbeispiel

Länge über alles	154,00 m
Breite auf Spanten	22,50 m
Entwurfstiefgang	8,50 m
Tragfähigkeit	Ca. 12.000 t
Eisklasse	PC 4, Double-Acting
Klassezeichen	Winterized (Polar, -30°C), CLEAN (TIER III), etc.

2.2 Fahrprofil

Der Schiffsentwurf soll den westlichen Teil der Nordostpassage (engl. Northern Sea Route (NSR)) von Murmansk bis zum Hafen von Dikson befahren (siehe Abbildung 2), wobei

hauptsächlich der Frachttransport zwischen den Nickelminen bei Dudinka und Murmansk erfolgen soll. Die Strecke beträgt etwa 1390 nm. Das Fahrtgebiet beschränkt sich damit auf die südliche Barentssee und die Karasee.

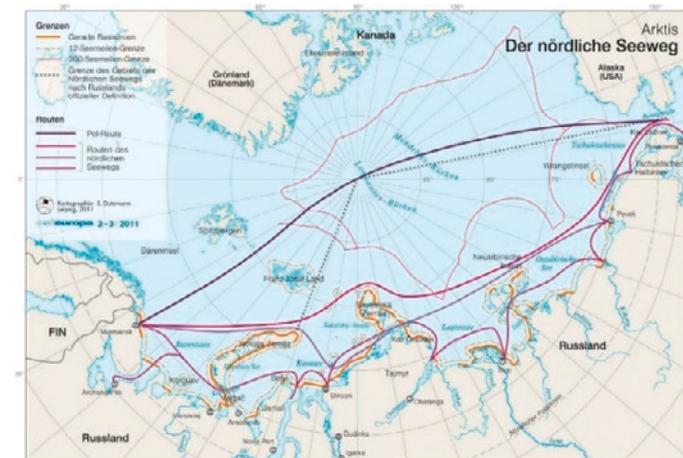


Abb. 2: Karte der Nordostpassage mit den wichtigsten Häfen [2].

Das Norwegische Meteorologische Institut (MET) [23] liefert für die Barentssee im Zeitraum 1976-2006 die durchschnittliche Eisausdehnung für die Monate März, Juni, September und Dezember, was in Abbildung 3 dargestellt ist.

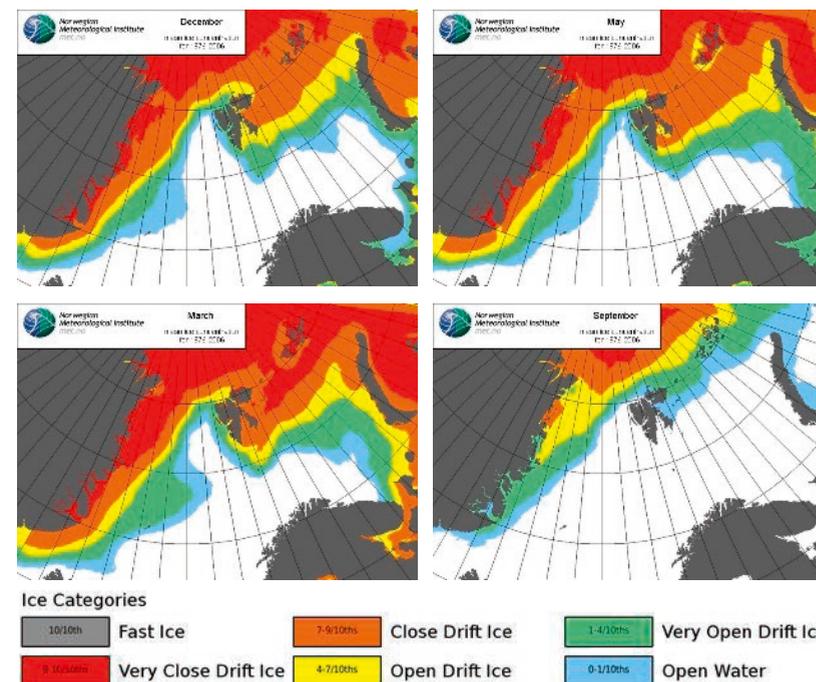


Abb. 3: Eisbedingungen in der Barentssee [23].

Aus den Daten des MET geht hervor, dass die westliche Barentssee ganzjährig eisfrei ist. Die südöstliche Barentssee und die Pechorasee sind zeitweise eisbedeckt. Auf der gesamten Route tritt kaum bis gar kein mehrjähriges Eis auf.

3. BERECHNUNGSMETHODEN

Im Rahmen des Forschungsvorhabens PRICE werden neben der Prognosemethode der NTNU für die Eisparameter, an der Technischen Universität Hamburg zwei Verfahren entwickelt. Diese Verfahren ermöglichen die direkte Simulation des Eisbrechens und die Simulation des Schollenverhaltens entlang des Schiffumpfs. Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand der vorgestellten Designstudie vorgestellt. Auch die Auswirkungen auf das Schiffsgewicht bei der Verwendung der neu entwickelten Methoden werden in diesem Abschnitt dargestellt.

3.1 Statistisches Verfahren zur Bestimmung der Eisparameter

Für die Bestimmung der Eisparameter für die Designstudie wurde das Prognoseverfahren der NTNU herangezogen [23]. Die Ergebnisse basieren auf der FDD- (accumulated Freezing Degree Days) Methode, welche die Eisparameter auf Basis gemessener Lufttemperaturwerte bestimmt. Im Rahmen des Vorhabens hat die NTNU vier Positionen entlang der Nordostpassage bezüglich der Eisparameter untersucht, von denen die Punkte A und B (Vgl. Abbildung 2) im Operationsgebiet der vorgestellten Designstudie liegt. Für diese Positionen sind die detaillierten Temperaturdaten verfügbar. In Abbildung 4 sind die durchschnittlich gemessenen Tagestemperaturen (Punkte) und die gemittelte Tagesdurchschnittstemperatur (Linien) dargestellt.

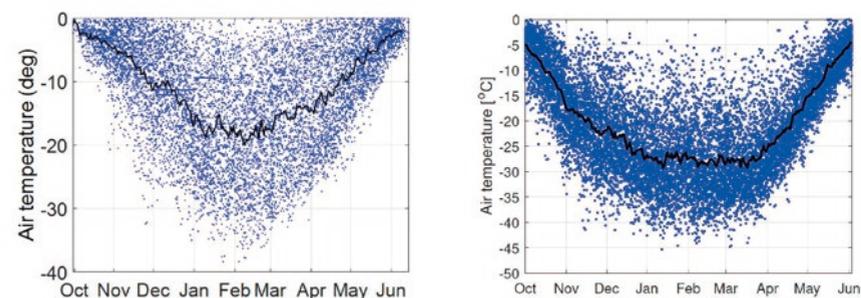


Abb. 4: Gemessene Temperaturen an Punkt A (links) und B (rechts) [23].

Neben der Bestimmung der Eislasten stellen die vorherrschenden Temperaturen einen sehr wichtigen Bestandteil der entwurfsrelevanten Parameter dar. Beispielsweise stehen die Arbeitsbedingungen und das notwendige Maß an Tank- und sonstiger Beheizung im direkten Zusammenhang mit den vorherrschenden Temperaturen.

Auf Basis der Temperaturen ist es nach dem Modell der NTNU möglich, den jährlichen Verlauf der Eisdicke zu bestimmen. In Abbildung 5 ist das Ergebnis dargestellt. Ein Vergleich mit anderen Angaben der Literatur hat eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen gezeigt.

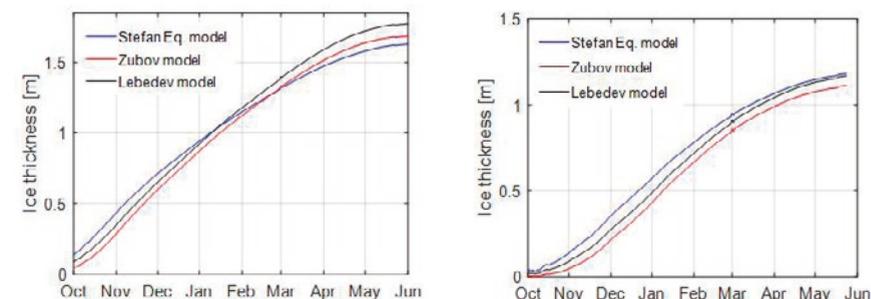


Abb. 5: Prognose der Eisdicke nach dem Modell der NTNU an Punkt A (links) und B (rechts) [23].

Auch die weiteren benötigten und zunächst unbekanntem Eisparameter werden auf Basis der Prognosen der NTNU bestimmt. An dieser Stelle kann auch ein Vergleich mit den bestehenden Eisklassen vorgenommen werden. Die für die vorgestellte Designstudie Parameter können der Abbildung 6 entnommen werden.

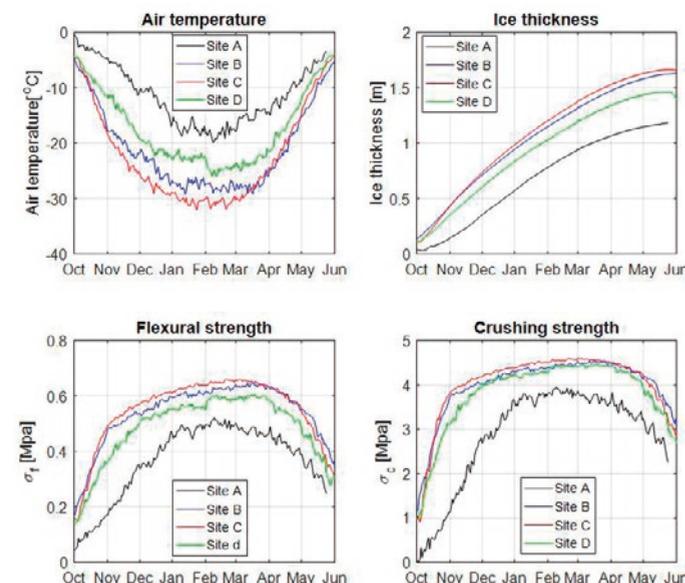


Abb. 6: Ergebnisse der NTNU für die Biegefestigkeit (links) und für die Bruchfestigkeit (rechts) [23].

Auf Basis dieser Eisparameter sind die weiteren Untersuchungen in Bezug auf die Eislasten und den daraus resultierenden Einfluss auf das Stahlgewicht erfolgt.

3.2 Bruchmodell zur Bestimmung der Eislasten

Für die Bestimmung der Eislasten wird zunächst die vom Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen entwickelte Methode verwendet. Diese basiert auf dem Bruchmodell von Erceg, welches in [6] und [9] genauer beschrieben wird. Die Methode bietet bei kurzen

Rechenzeiten die Möglichkeit, die Schiff-Eis-Interaktion mit hoher Sensibilität auf die Rumpfgeometrie zu berechnen. Als Eingangsparameter gehen neben den Eisparametern die Rumpfgeometrie im Bereich des Eisgürtels (Wasserlinien zwischen Ober- und Unterkante des zu brechenden Eises) in die Berechnung ein. Die Methode liefert als Ergebnis den für den Entwurf interessanten Widerstand durch das Brechen des Eises (über der Simulationszeit) und die Kontaktkräfte- und -flächen.

Für die Designstudie sind beispielhaft die Ergebnisse für die Fahrt mit dem Bug voraus für die Horizontalkraft in Abbildung 7, das Histogramm der Lastverteilung in Abbildung 8 und der Lastverlauf entlang der Wasserlinie in Abbildung 9 gezeigt.

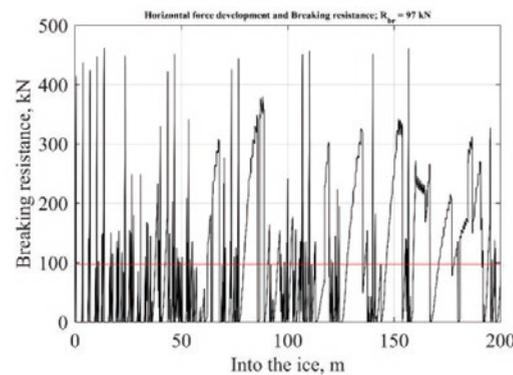


Abb. 7: Horizontalkraft für einen Tiefgang von $T=8,5 \text{ m}$ bei einer Eisdicke $0,5 \text{ m}$ und Bugvoraus [13].

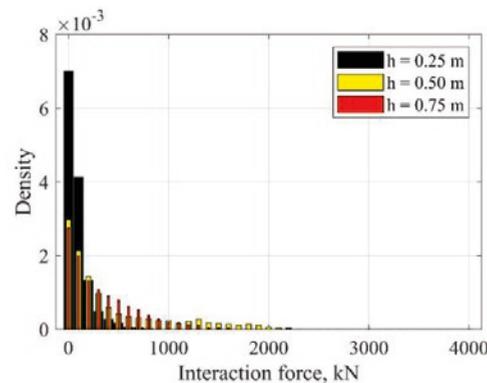


Abb. 8: Histogramm der Lastverteilung für drei Eisdicken bei einem Tiefgang von $T=8,5 \text{ m}$ mit Bugvoraus [13].

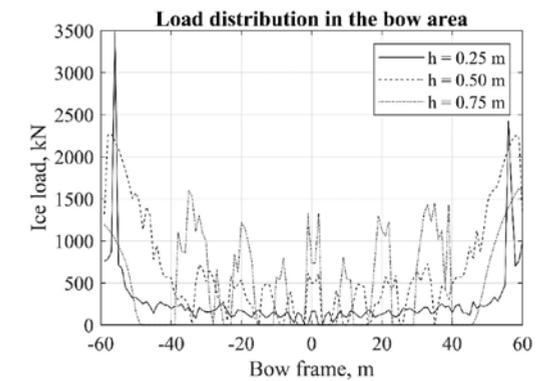


Abb. 9: Verlauf der Last entlang der Wasserlinie für verschiedene Eisdicken und Bugvoraus [13].

Die Methode gibt wichtige Hinweise auf die Häufigkeit, Maximalwerte, und Verteilung der beim Eisbrechen zu erwartenden Lasten. Die berechneten Werte könnten zukünftig zur Auslegung der Stahlstruktur verwendet werden, indem für ein festes Operationsgebiet auf Basis von Messdaten oder Prognosen die zu erwartenden Eislasten, und die Wahrscheinlichkeit der Extremereignisse bestimmt werden. Mit dem Vorgehen könnten die bestehenden Eisklasseregeln ersetzt werden. Es ermöglicht im Gegensatz zu den Vorschriften rumpfformabhängige und routenabhängige Lastannahmen zur Auslegung der Struktur.

3.3 Numerische Simulation der Schiff-Eis-Interaktion

Für die Bestimmung der Eisverteilung unterhalb der Wasserlinie wird eine am Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie der TUHH entwickelte Methode herangezogen. Für diese Methode wurde das Eisbruchmodell mit einem dynamischen Kontaktmodell und einem auf dem Lattice-Boltzmann-Verfahren basierenden Strömungslöser gekoppelt. Das dynamische Kontaktmodell nutzt eine Physik-Engine, um Kollisionen zwischen Schiff, Flächeneis und Eisschollen zu identifizieren und deren Reaktionen zu berechnen. Im Falle des Flächeneises bedeutet das mögliche Versagen, also das Abbrechen neuer Eisschollen. Die Reaktionen der Eisschollen beinhalten die Rotation und das Gleiten entlang des Rumpfes, bis die Schollen vom Rumpf verdrängt wurden. Die hydrodynamischen Effekte werden mithilfe des Strömungslösers ELBE (Efficient Lattice Boltzmann Environment, [11] und [12]) berechnet. Die bidirektionale Kopplung mit der Physik-Engine erlaubt den Austausch von Bewegungsdaten, Kräften und Momenten zu jenem Zeitschritt.

Somit ist es möglich, die Interaktion zwischen ebenem Eis, der Rumpfgeometrie und den gebrochenen Schollen im Strömungsfeld des Schiffes zu bestimmen. Beispielsweise lassen sich so Aussagen über die Vermeidung von Brucheis in der Propellerebene, das Ansammeln von Eis unter dem Schiff oder auch über die Kontrolle der Schollendrift machen.

Analog zu den Berechnungen mit der Methode der Eislasten ist ein Ergebnis der Berechnung die gemessenen Kräfte über die Simulationszeit. Die Verläufe der Kräfte durch Brechen und Verdrängung sind für die vorgestellte Designstudie in Abbildung 10 dargestellt.

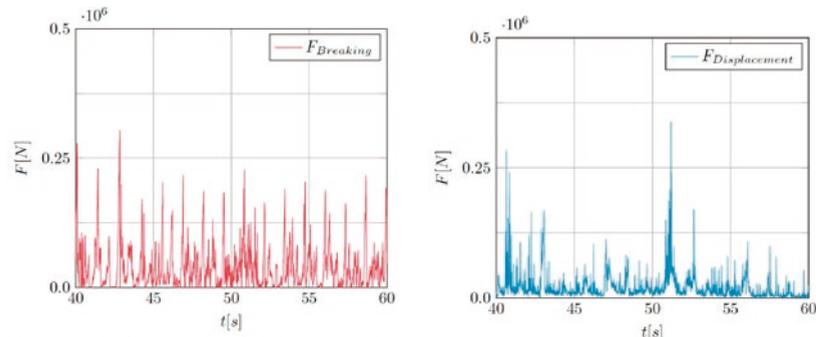


Abb. 10: Verlauf der Bruchkraft (links) und Verdrängung (rechts) über die Zeit für einen Tiefgang von $T=8,5$ m bei einer Eisdicke von 0,5m und Bugvorau [13].

Die Validierung der Absolutwerte ist nicht vollständig erfolgt. Jedoch sind eine grafische Bewertung des Bruchverhaltens und das Brucheis entlang des Rumpfes von Interesse. Abbildung 11 zeigt Simulationen aus einem frühen Entwurfsstadium. Weitere Varianten konnten eine Reduzierung des Eises am Rumpf der Designstudie erzielen.

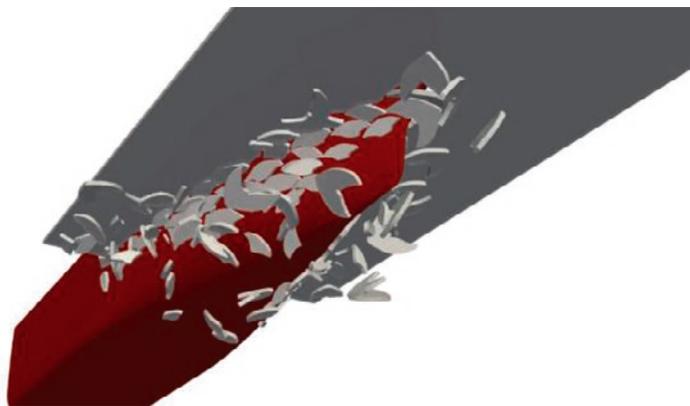


Abb. 11: Simulation des Schollenverhaltens im frühen Entwurf mit einem Tiefgang von $T=8,5$ m bei einer Eisdicke von 0,5m und Bugvorau [13].

3.4 Auswirkungen veränderter Lastannahmen

Um das Potential der neu entwickelten direkten numerischen Berechnungsmethoden zu bewerten, müssen zunächst zwei Effekte genannt werden:

- › Die Eislasten sind rumpfformabhängig. Somit kann bereits mit einer Formvariation schnell identifiziert werden, ob eine Lastreduzierung durch eine geeignetere Rumpfform erzielt werden kann. Folglich reduziert sich theoretisch auch der Leistungsbedarf.
- › Die Stahlstruktur wird durch die aufgebrachten (Eis-)Lasten bestimmt. Die Veränderung der Last hat einen Einfluss auf das Stahlgewicht bzw. Leerschiffgewicht. Bei einem festgelegten Tiefgang variiert somit die Tragfähigkeit des Schiffes oder gibt weiteren Spielraum für vorteilhafte Rumpfformveränderungen.

Ersteres lässt sich später direkt aus den Ergebnissen ableiten. Um den Einfluss von Punkt zwei bewerten zu können, wurde eine Verknüpfung zwischen dem bestehenden Regelwerk mit einem Optimierungstool zur Auslegung der Hauptverbände geschaffen. In Abbildung 12 ist dieser Ablauf vereinfacht dargestellt.

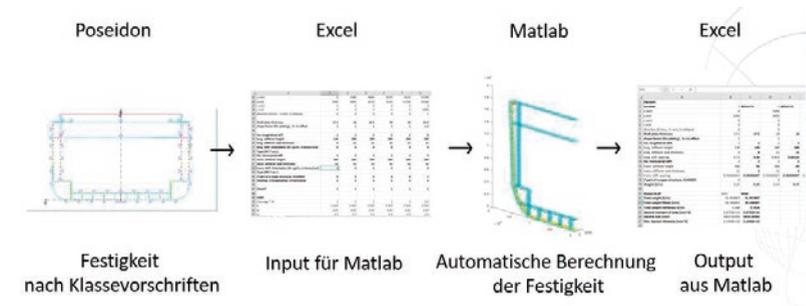


Abb. 12: Eislastabhängige Bestimmung des Stahlstrukturgewichts.

Im ersten Schritt wird die Stahlstruktur entsprechend der allgemeinen Vorschriften ohne Eisklasse dimensioniert. Für die vorliegende Designstudie wurde das Tool des DNVGLS POSEIDON genutzt. Die Spantstruktur wird nach Excel übertragen und dient als Startwert für die Berechnung der Festigkeit mit Eislasten. Bei der Berechnung handelt es sich um eine Optimierung mit dem Gewicht als Zielfunktion des betrachteten Spantabschnitts. Die freien Variablen sind die Plattendicke, die Maße der Steifen und optional der Abstand der Steifen. Die Randbedingungen sind die Vorschriften der IACS Polar Class. Diese Berechnungen sind in einem Matlab-Programm umgesetzt. Mit der Ausgabe kann erneut die Längsfestigkeit überprüft werden. Dieser Prozess ermöglicht die Einbindung beliebiger Eislasten, die beispielsweise mit der neu entwickelten Methodik bestimmt wurde.

Um den Einfluss der Eislasten auf das Leerschiffgewicht zu verdeutlichen, ist das Ergebnis in Abbildung 13 für verschiedene Entwurfsdrücke dargestellt. Daraus geht für die vorgestellte Designstudie hervor, dass das Stahlgewicht einen nahezu linearen Zusammenhang zur aufgebrachten Eislast aufweist. Detaillierte Untersuchungen sind in [13] dargestellt.

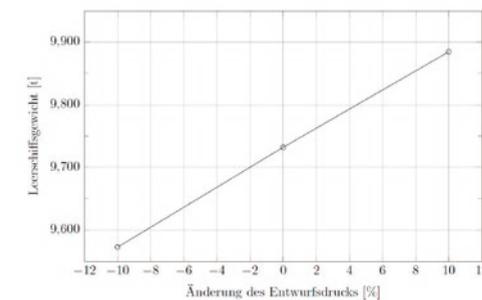


Abb. 13: Abhängigkeit des Leerschiffgewichts vom Entwurfsdruck.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsvorhaben PRICE hatte zum Ziel, die Vorhersage von Schiff-Eis-Interaktionen deutlich zu verbessern. Daher wurden im Rahmen des Vorhabens drei grundlegende Methoden entwickelt. Eisgehende Schiffe können optimiert für ihre geplante Route und abhängig von ihrer Rumpfgeometrie ausgelegt werden. Dafür ist es erforderlich, die Eisparameter der Route bestimmen zu können. Um diese Fragestellung zu beantworten, hat die NTNU ein Verfahren entwickelt, das mithilfe von Statistiken zur Ausdehnung, Dicke und weiterer Eigenschaften des Eises die relevanten Designparameter bestimmen kann. Basierend auf diesen Daten lassen sich mit dem Eisbruchmodell, das am Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen der TUHH entwickelt wird, lokale und globale rumpfformabhängige Lasten am Schiff ermitteln. Im nächsten Schritt ist es mit der, am Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie der TUHH entwickelten Kopplung des Bruchmodells mit dem Strömungslöser ELBE möglich, Bewegung und Verhalten der gebrochenen Schollen entlang des Rumpfs zu bewerten. Die entwickelten Methoden wurden anhand einer Designstudie von der Pella Sietas Werft auf die praktische Anwendbarkeit untersucht und mit den Vorschriften verglichen. Rolls-Royce hat im Rahmen des Vorhabens bei der Erarbeitung der Grundlagen mitgewirkt und Daten zur Validierung aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des MARTEC-Forschungsprojekts PRICE durchgeführt, einem Projekt zur Entwicklung neuer numerischer Methoden für Offshore- und Polarschiffe. Besonderer Dank gilt daher dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und den Norwegischen Forschungsrates (RCN) für die Finanzierung und Unterstützung des Vorhabens. Auch dem Projektträger Jülich danken wir für die kompetente und stets konstruktive Betreuung des Vorhabens.

LITERATUR

- [1] Arpiainen, M. und Kiili, R. Arctic shuttle container link from Alaska US to Europa. Hrsg. von Aker Arctic Technology Oy, 2006.
- [2] Bundeszentrale für politische Bildung. Karte der nördlichen Seewege. 8.11.2013. url: <http://www.bpb.de/internationales/europa/russland/analysen/172284/karte-der-noerdliche-seeweg>.
- [3] Bureau Veritas. Ice Reinforcement Selection in Different World Navigation Areas: Guidance Note NI 543 DT R01 E. 2013.
- [4] Ehlers, S. A procedure to optimize ship side structures for crashworthiness. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 224.1, 2010.
- [5] Ehlers, S., Cheng, F., Jordaan, I., Kuehnlein, W., Kujala, P., Luo, Y., Ralph, F., Riska, K., Sirkar, J., Oh, Y. T., Terai, K. & Valkonen, J.: V.6 Arctic Technology. In: Soares, C. G. (ed.) International Ship Structures Committee (ISSC). Taylor & Francis, 2015.
- [6] Erceg, S. und Ehlers, S. Semi-empirical level ice resistance prediction methods. In: Ship Technology Research, 2017.
- [7] Hahn, M. Development of a conceptual design tool for dimensional optimization of Arctic Offshore Supply Vessels. Master-Thesis. Delft University of Technology.
- [8] Hahn, M., Dankowski, H., Ehlers, S., Erceg, S., Rung, T., Huisman, M., Sjöblom, H., Leira, B. J., Wei, C., Numerical Prediction of Ship-Ice Interaction – A Project Presentation. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE2017, 2017.
- [9] Huisman, M., Erceg, S., von Bock und Polach, R. U. F., Rung, T., Ehlers, S. Numerical Simulation of Ship-Ice Interaction. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE2019, 2019.
- [10] IACS. Requirements concerning Polar Class, 2011.
- [11] Janßen, C. F., Mierke, D., Übereück, M., Gralher, S., & Rung, T., Validation of the GPU-Accelerated CFD Solver ELBE for Free Surface Flow Problems in Civil and Environmental Engineering. *Computation*, 3(3), 354–385. <https://doi.org/10.3390/computation3030354>
- [12] Janßen, C. F., Mierke, D., & Rung, T. On the development of an efficient numerical ice tank for the simulation of fluid-ship-rigid-ice interactions on graphics processing units. *Computers and Fluids*, 155, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.05.006>, 2017.
- [13] Johnsen, L. Entwurf eines eisbrechenden Schiffes unter Verwendung neuer numerischer Methoden. Master-Thesis. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2019.
- [14] Juva, M. und Riska, K. On the power requirement in the Finnisch-Swedisch ice: Research Report No. 53, 2002.

- [15] Lindqvist, G. A Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships. Finland, 1989.
- [16] Mierke, D., Janßen, C.F., Rung, T. An efficient algorithm for the calculation of sub-grid distances for higher-order LBM boundary conditions in a GPU simulation environment. Computers and Mathematics with Applications. Article in press, 2018.
- [17] Ministry of Transportation of Russia. RULES of navigation in the water area of the Northern Sea Route.
- [18] Nevel, D.E.: Ice forces on cones from floes, Proc. 11th IAHR Symp. On Ice, III, pp. 1391-1404, Alberta, 1992.
- [19] Pache, H. Widerstandsprognose von Schiffen im Eis. Bachelor-Thesis. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2015.
- [20] Pedersen, R.A. u. a. Structural optimisation for ice-strengthened vessels, 2015.
- [21] Polar Code: International Code for Ships Operating in Polar Waters, 2016. edition. IMO publication. London: International Maritime Organization, 2016.
- [22] Riska, K. Design of icebreaking ships, 2010.
- [23] Wei, C. und Leira, B. J., Sinsabvarodom, C. und Wei, S. Estimation of Ice Conditions along the Northern Sea Route.

COMOGEAR – CONDITION MONITORING OF MARINE GEARBOXES BASED ON WIRELESS, ENERGY-AUTONOMOUS SENSOR NODES

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX417	
DR.-ING. THOMAS KRUSE	REINTJES GmbH, Hameln
ALEXANDER POSCHKE	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hannover
JONAS ESCH	Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte For- schung e. V., Villingen-Schwenningen
DIANA KETTNER	Bachmann Monitoring GmbH, Rudolstadt
PETER PEITSCH	Micro-Sensys GmbH, Erfurt

EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die mannlöse Schifffahrt bietet eine Reihe von Vorteilen. Neben der Reduzierung der Personalkosten bietet sich durch die in der Folge nicht mehr benötigten Kabinen die Möglichkeit, die Frachtmenge und somit den Warentransport zu steigern. In der Vergangenheit wurden bereits erste Schritte in Richtung der mannlösen Schifffahrt erzielt [1, 2].

Im Zusammenhang mit der mannlösen Schifffahrt gewinnt die Zuverlässigkeit des Maschinenraums an Bedeutung [3]. Der Ausfall von Komponenten während der Fahrt muss ausgeschlossen werden können. Konventionelle Wartungs- und Instandhaltungsbedarfe müssen mit Hilfe von intelligenten Ferndiagnosesystemen frühzeitig detektiert und geplant werden. Durch zustandsorientierte Instandhaltung (engl.: condition-based maintenance, CBM) kann eine Strategie verfolgt werden, die auf Basis von gesammelten Informationen Instandhaltungsmaßnahmen ableitet und terminiert [4].

Das Schiffsgetriebe ist ein hochbelastetes Element zwischen Dieselmotor und Propelleranlage. Daraus resultieren besondere Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit. Neben dem beschriebenen zukünftigen mannlösen Betrieb stellt der bereits heute existierende Betriebsfall des Dynamic Positionings hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit. In diesem Betriebsfall soll das Schiff eine bestimmte Position auch bei hohem Wellengang über mehrere Tage halten. Gewährleistet wird dies durch eine automatische Regelung der Ruderanlage sowie des Thruster- und des Propellerschubs. Bei Anlagen mit dieselmotorisch betriebenen Festpropellern ohne E-Motorunterstützung kann die Schubänderung nur durch eine Veränderung der Propellerdrehzahl erreicht werden. Die Kupplungen müssen in diesem Fall zum einen sehr häufig umschalten zwischen „Voraus-“ und „Zurück-Stellung“ und zum anderen permanentem Schlupfbetrieb ohne Unterbrechung standhalten. Daraus resultiert eine hohe thermische Belastung für die Lamellenkupplung.

Die permanente messtechnische Überwachung der Temperaturen in der Lamellenkupplung und des Verschleißes, würden zu signifikanten Verbesserungen des Dynamic Positionings und der Betriebssicherheit führen. Bisher nutzen nur ca. 2% der klassifizierten Schiffe die Möglichkeiten des CBM im Umfeld des Schiffsantriebsstrangs, da die Investitionsvolumina als zu hoch angesehen werden [5].

AUFGABENSTELLUNG

Ziel des Projekts „CoMoGear“ ist die Entwicklung und prototypische Implementierung eines energieautarken, drahtlosen Sensornetzwerks zur Zustandsdiagnose von hochbelasteten, rotierenden Bauteilen im Schiffsgetriebe.

Die Aufnahme von Messdaten hinsichtlich Drehmoment, Drehzahl, Temperatur und Verschleißzustand im Öl umspülten Getriebe soll durch miniaturisierte, autarke Sensorknoten ermöglicht werden. Neben der leichten Nachrüstbarkeit sind die geringeren Kosten ein wesentlicher Vorteil. Diese sind bspw. im Wegfall von nachträglichen Wartungskosten durch die Energieautarkie der Sensorknoten begründet.

Im F&E-Versuchsfeld der REINTJES GmbH wird zu Versuchszwecken ein Demonstrator des Sensornetzwerks an einem Schiffsgetriebe aufgebaut. Der Demonstrator soll die Möglichkeit der Identifikation von kritischen Betriebszuständen und Verschleiß aufzeigen und in der Lage sein, das Drehmoment der Abtriebswelle, die Drehzahlen unmittelbar vor und nach der Lamellenkupplung, die Temperatur und den Verschleißzustand der Lamellenkupplung aufzunehmen.

SYSTEMAUFBAU

Die Getriebe bzw. die Maschinenelemente im Antriebsstrang von Schiffen unterliegen je nach Anwendung, Seegebiet etc. unterschiedlichen Belastungen. Die bisherige Überwachung beinhaltet unter anderem die Öltemperaturen, die Kupplungs- und Schmieröldrücke und ggf. Partikelzähler am Ölfilter. Im Projekt CoMoGear werden weitere Sensoren innerhalb eines Getriebes integriert. Das System besteht aus mehreren Sensorknoten (SK) und dazugehörigen Energy Harvesting Systemen (EHS), die die Sensorknoten im Betrieb mit ausreichend Energie versorgen (siehe Abb. 1). Jeder Sensorknoten beinhaltet den entsprechenden Sensor, eine Elektronik sowie eine Sende- und Empfangseinheit. Die Energie wird durch ein Spulensystem mit rotierenden Magneten erzeugt. Die Zentraleinheit regelt die Datenerfassung und speichert die Sensordaten. Die Elektronik in jedem Sensorknoten steuert die Datenerfassung, die Datenreduktion und das Energiemanagement. Die Daten werden drahtlos über die Antennen innerhalb des Getriebes an die Zentraleinheit gefunkt. Das Messintervall ist variabel und kann an der Zentraleinheit parametrisiert werden. Die Sensorknoten erhalten von der Zentraleinheit ein Signal zur Messdatenerfassung, erfassen diese zeitgleich mit einem Zeitstempel und senden die Daten reduziert an die Zentraleinheit zurück. Es ist möglich für die Erfassung eines Betriebsprofils im Sekundentakt nur die Drehzahlsensoren und das Drehmoment zu erfassen. Für eine Zustandsüberwachung ist ein größeres Zeitintervall in Abhängigkeit der

zur Verfügung stehenden Energie von z. B. 1 h und eine Erfassung aller Daten ausreichend. Die Daten können über eine Schnittstelle ausgelesen werden. Die Daten bleiben auch im ausgeschalteten Betrieb gespeichert.

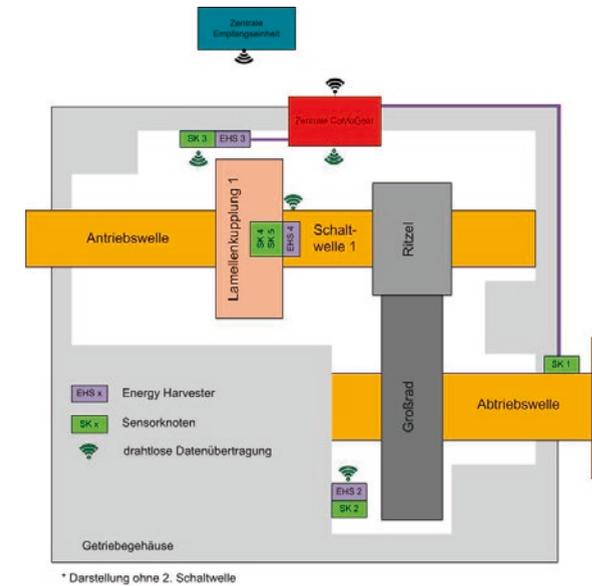


Abb. 1: Systemaufbau CoMoGear

ENERGY HARVESTING KONZEPT

Damit das Condition Monitoring System unabhängig von einer externen, kabelgebundenen Energieversorgung außerhalb des Getriebes betrieben und eine einfache Implementierung realisiert werden kann, werden alle Sensorknoten und die Zentraleinheit durch Energy Harvesting Systeme mit Energie versorgt. Dies bedeutet, dass aus einem kleinen Teil der vorhandenen Bewegungsenergie des Getriebes elektrische Energie generiert wird. Im Rahmen des Projektes wurden, aufgrund der hohen Leistungsanforderungen und des geringen Bauraums, Energy Harvester mit fester Referenz realisiert.

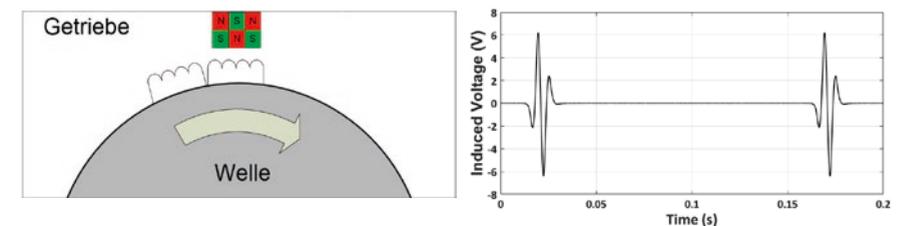


Abb. 2: Konzept des Kupplungsharvesters (links), Spannungssignal einer Harvesterspule (rechts)

Vom Energy Harvester, der vereinfacht aus Spulen und Magneten besteht, befindet sich somit immer ein Teil auf einem rotierenden Objekt und ein Teil am feststehenden

Getriebegehäuse. Im Falle des EHS 2 und 3 bedeutet dies, dass sich die Magnete auf der rotierenden Kupplung bzw. an dem rotierenden Großrad befinden, während die Spulen mit dem Gehäuse verbunden sind und dadurch im Betrieb eine Relativbewegung stattfindet. Durch diese Relativbewegung wird eine Spannung induziert. Beim EHS4 verhält es sich umgekehrt, hier befinden sich die Spulen, und somit die generierte Energie, auf der rotierenden Kupplung und ein Magnethalter am Getriebegehäuse (siehe Abb. 2 links). In jeder Spule entsteht somit pro Umdrehung ein Signal entsprechend der Abb. 2 rechts.

Tabelle 1: Leistungsdaten der verschiedenen Energy-Harvester

	Spannung	Strom	Leistung	Position
EHS 2	3,3 V	20 mA	66 mW	Getriebegehäuse Abtrieb
	5 V	17 mA	85 mW	
EHS 3	3,3 V	50 mA	165 mW	Getriebegehäuse Antrieb
	5 V	180 mA	900 mW	
EHS 4	3,3 V	15 mA	50 mW	Kupplung (rotierend)
	12 V	20 mA*	240 mW*	

* diese Leistung steht nur 10% der Zeit zur Verfügung

Sobald das Getriebe die Grunddrehzahl von 500 UPM erreicht, stellen die EHS den Sensorknoten die benötigten geregelten Ausgangsspannungen bereit. Dabei wurden die EHS so ausgelegt, dass über den gesamten Drehzahlbereich die benötigte Leistung zur Verfügung steht. Ein intelligentes Powermanagement sorgt dafür, dass auch bei zunehmender Drehzahl, durch das Entkoppeln von Spulen, nur die von den Sensorknoten benötigte Leistung generiert wird (siehe Abb. 3).

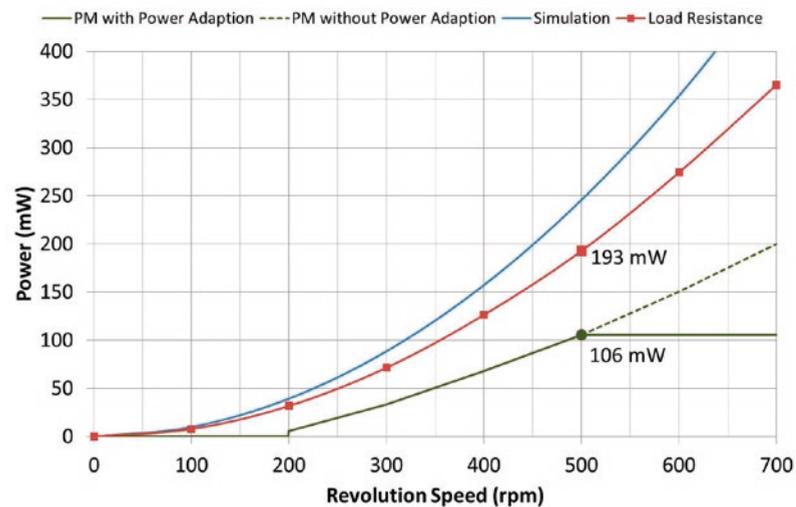


Abb. 3: Theoretische und Experimentelle Ausgangsleistung des Kupplungsharvesters mit und ohne Powermanagement

Um einen zuverlässigen Betrieb im Öl umspülten Getriebe sicherzustellen, sind die EHS gemeinsam mit den Sensorknoten in öldichten Gehäusen untergebracht. Mit Ausnahme des Verschleißsensors und der Energieversorgung der Zentraleinheit sind keine Leitungen im Getriebe erforderlich.



Abb. 4: Entwickelte Energy Harvesting Systeme im öldichten Gehäuse v.l.n.r Antriebsharvester, Kupplungsharvester, Abtriebsharvester

Die im Projekt CoMoGear entwickelten Energy Harvesting Systeme ermöglichen erstmalig die Integration von sensorischen Systemen und deren Betrieb innerhalb eines ölumspülten Getriebes. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten der Zustandsüberwachung insbesondere für hochbelastete Bauteile im Getriebe. Die harschen Umgebungsbedingungen im Getriebe (ölumspült, hohe Betriebstemperaturen bis 70°C) lassen die Verwendung von Batterien oder Akkus nicht zu. Zudem ist eine Wartung (Batteriewechsel) kaum möglich. Eine Kabelanbindung der Sensorknoten wäre sehr aufwändig und an rotierenden Objekten nicht möglich.

DREHZAHL- UND DREHMOMENTSENSORIK

Zur Zustandsüberwachung der drehmomentübertragenden Bauteile bedarf es der Messung von Antriebs- und Abtriebsdrehzahl sowie des an der Abtriebswelle vorherrschenden Drehmoments. Zusätzlich ermöglicht die Erfassung der Drehrichtung der Abtriebswelle eine Charakterisierung des Betriebszustandes.

Zur Drehzahlmessung wird ein kommerziell verfügbarer Sensor mit 5V-Spannungsversorgung und niedriger Stromaufnahme von 2-3 mA verwendet. Dieser nutzt als signalgebende Inkremente direkt die vorhandene Verzahnung des Großrades für die Abtriebsdrehzahl bzw. die Kupplungsverzahnung für die Antriebsdrehzahl, sodass keine konstruktive Veränderung am Getriebe vorgenommen werden muss.

Die geringe Länge des Sensors von 2,5 cm und seine Fähigkeit, durch nicht ferromagnetische Materialien hindurch zu messen, macht eine platzsparende Integration innerhalb

des öldichten Gehäuses des Energy Harvesters möglich. Damit lässt sich der Drehzahlknoten in der rauen Umgebung innerhalb des ölumspülten Getriebes einsetzen.

Die Integration in einem gemeinsamen, angepassten Gehäuse gewährleistet außerdem, dass sowohl die Spulen des Harvesters als auch die Drehzahlsensoren mit dem erforderlichen geringen Abstand von wenigen Millimetern zum rotierenden Element optimal angeordnet und vorausgerichtet sind.

Zur Drehmomentmessung wird ein Sensor genutzt, der kontaktlos auf einer Welle misst und somit einfach, ohne Eingriff in die Kraftübertragungsstrecke z.B. durch Messflansche, applizierbar ist. Da der Sensor auf dem inversen magnetostriktiven Effekt basiert und ein Magnetfeld durch Spulen aufbaut, ist seine Leistungsaufnahme gegenüber den anderen Sensorknoten relativ hoch und bedingt durch das Messprinzip kaum reduzierbar. Der Sensor wird daher außerhalb des Getriebes vor der Abtriebswelle platziert und wird per Kabel von der CoMoGear-Zentraleinheit versorgt, die genügend Energie vom Antriebsharvester erhält.

VERSCHLEISSSENSOR

Die Entwicklung des Verschleißsensors wurde nach der VDI Richtlinie 2206 durchgeführt [6]. Die entwickelten Grobkonzepte basieren auf vier verschiedenen Messprinzipien. Zum einen kann die Änderung der Dicke der Lamellen als Maß für den Verschleiß herangezogen werden. Die zugrunde liegende Hypothese besagt, dass die Lamellenpakete aufgrund von Abrieb und chemischen Prozessen im Laufe der Einsatzzeit dünner werden. Die Messung der Lamellendicke kann entweder direkt, über Distanzsensoren, oder indirekt erfolgen. Eine Form der indirekten Messung stellt die Messung der Ölmenge, die benötigt wird, um die Kupplung zu schließen, dar. Je größer die Dickenänderung der Lamellen, desto größer ist die benötigte Menge an Öl. Ein anderes Messprinzip basiert auf der Messung des Ölzustands. Die Analyse der im Öl vorliegenden Komponenten ermöglicht, die Konzentration der durch Abrasion gelösten Partikel der Lamellen und somit den Verschleiß zu detektieren. Außerdem können Vibrationen gemessen werden. Diese entstehen durch die Reibung zwischen den einzelnen Lamellen und verändern sich je nach Verschleiß dieser. Für die Implementierung wurde die direkte Messung der Lamellendicke ausgewählt. Dabei standen magnetisch induktive Wegsensoren, magnetisch kapazitive Sensoren und induktive Wegaufnehmer zur Auswahl. Aufgrund der Anforderungen geringer Bauraum, hohe Temperaturen (ca. 80°C), hohe Drücke (ca. 25 bar) und geringer Energieverbrauch (aufgrund des Energy Harvesting Systems) wurde ein magnetisch induktiver Wegsensor von Micro Epsilon (MDS-45-M18-SA) ausgewählt. Der Magnet wird am Kolben befestigt und wird somit beim Öffnen und Schließen der Kupplung relativ zum Sensor in der Abtriebswelle bewegt.

Zur Validierung des ausgewählten Messsystems wurden verschiedene Versuche vor dem Einbau im Testgetriebe durchgeführt [7]. Zum einen wurden die Eigenschaften des Messsignals unter dem Einfluss der verschiedenen Umgebungsbedingungen (Luft, Wasser, Öl),

jeweils innerhalb eines Aluminiumzylinders bei 12 und 15 V Eingangsspannung am Sensor, und zum anderen die elektrischen Eigenschaften des Sensors als Last an einem Energy Harvesting System untersucht. Sowohl die verschiedenen Eingangsspannungen als auch die verschiedenen Umgebungsmedien haben keinen signifikanten Einfluss auf die Integrität des Ausgangssignals (siehe Abb. 5 links).

Aufgrund der Versorgung durch ein Energy Harvesting System wird der Sensor nur für ein bestimmtes Zeitintervall an die Spannungsquelle angeschlossen. Innerhalb dieses Intervalls muss der Sensor seinen Betriebszustand erreichen, einen stabilen Messwert erreichen und ein zugehöriges Ausgangssignal erzeugen. Hierfür wurde eine Messreihe mit einer Versorgungsspannung von 12 V in Luft mit einer Spannungsversorgung für 1 s aufgenommen. Der Energiebedarf lag bei 170 mJ bei einem Abstand von 0 mm und 157 mJ bei einem Abstand von 25 mm (siehe Abb. 5 rechts).

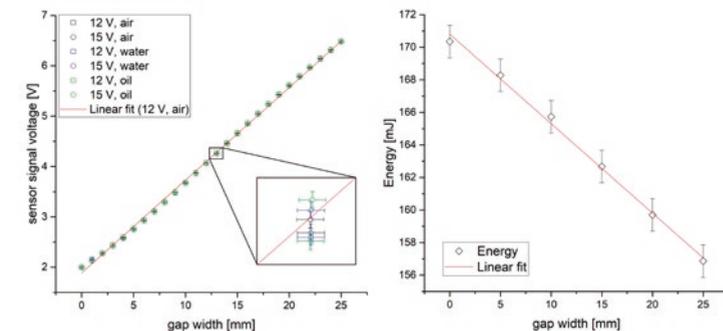


Abb. 5: Ausgangsspannung des Sensors in verschiedenen Medien (links), Energieverbrauch des Sensors in Abhängigkeit der Distanz (rechts)

DATENÜBERTRAGUNG UND ZENTRALEINHEIT

Das entwickelte Condition Monitoring System besteht aus mehreren Sensorknoten, welche der Aufnahme der Messdaten dienen, sowie der Zentraleinheit, welche diese Messdaten sammelt, auswertet und speichert. Das entwickelte System umfasst insgesamt vier Sensorknoten, welche sich hinsichtlich Sensorik und Aufbau unterscheiden und in der folgenden Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 2: Sensorknoten des Condition Monitoring Systems

Sensorknoten	Position	Messgröße	Einheit
SK 1	Abtriebswelle (außerhalb des Getriebes)	Drehmoment	[Nm]
SK 2	Abtriebswelle nach Kupplung (Großrad)	Drehzahl inkl. Drehrichtung	[1/min]
SK 3	Antriebswelle vor Kupplung	Drehzahl	[1/min]
SK 4/5	Stirnseite der Lamellenkupplung	Weg (für Verschleißmessung)/Temperatur (Öl)	[µm] [°C]

Die Übertragung der aufgenommenen Messdaten zur Zentraleinheit erfolgt für die Sensorknoten SK 2, SK 3 und SK 4/5 aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen im Getriebe kabellos über ein kontaktloses Verfahren. Ausgehend von den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Voruntersuchungen zeigte sich, dass die Übertragung mittels Bluetooth Low Energy (BLE) das bevorzugte Verfahren ist. Trotz der durch das Getriebe bedingten Metallumgebung erwies sich die BLE-Datenübertragung als sehr zuverlässig bei gleichzeitig geringem Strombedarf, flexibler System-Integration und geringen Kosten. Die Datenübertragung vom Sensorknoten SK 1 zur Zentraleinheit erfolgt außerhalb des Getriebes und somit zusammen mit der Versorgungsspannung über eine Leitung.

Alle Messungen und Prozesse des Condition Monitoring Systems werden durch die Zentraleinheit gesteuert, welche sich außerhalb des Getriebes in einem Gehäuse befindet und durch das EHS 3 mit Energie versorgt wird. Die Zentraleinheit stellt hinsichtlich ihrer Funktion einen autark arbeitenden Datenlogger für die verschiedenen Messgrößen der Sensorknoten des Systems dar. Die durch die einzelnen Sensorknoten durchzuführenden Messungen werden durch die Zentraleinheit auf Basis einer programmierbaren Parametrierung und des aktuellen Zustands des Systems ausgelöst. Nach Ausführung der jeweiligen Messungen in den angesprochenen Sensorknoten, welche eine gewisse Zeitdauer in Anspruch nehmen kann, werden die Messwerte durch eine erneute BLE-Kommunikation abgerufen. Hierbei werden auch Statusinformationen des jeweiligen Sensorknotens, z. B. zur Energieverfügbarkeit des jeweiligen Energy Harvesting Systems, übertragen. Die empfangenen Messdaten werden anschließend durch den Microcontroller der Zentraleinheit ausgewertet und auf einer internen SD-Karte gespeichert bzw. beeinflussen abhängig von der Programmierung auch die nachfolgend aufgerufenen Messfunktionen. Die Zeitbasis für die Zentraleinheit wird durch eine quarzstabilisierte Real Time Clock gebildet, welche mit einer zusätzlichen Stützbatterie versehen ist, um einen Verlust der aktuellen Uhrzeit auch bei Nichtbereitstellung einer Versorgungsspannung durch das EHS 3 z. B. bei längeren Stillstands-Zeiten des Getriebes zu gewährleisten.

Die Zentraleinheit verfügt mit der USB-Schnittstelle und mit der BLE-Schnittstelle über zwei Datenschnittstellen zu externen Geräten, welche der Parametrierung der Messfunktionen des Condition Monitoring Systems und dem Auslesen der auf der SD-Karte gespeicherten Messdaten und weiterer Statusdaten dienen. Hierbei bietet die BLE-Schnittstelle die Möglichkeit zu einer anwenderfreundlichen Verbindung des Condition Monitoring System mit einem mobilen Endgerät, z. B. einem Smartphone oder Tablet, jedoch aus Gründen der Datensicherheit und der Datenübertragungsrate nur mit eingeschränktem Datenzugriff. Die USB-Schnittstelle, welche nur nach Öffnen des Gehäuses der Zentraleinheit zugänglich ist, ermöglicht demgegenüber einen Zugriff auf alle relevanten System- und Messdaten und kann über eine zugehörige PC-Software angesprochen werden.

KONZEPT DER SIGNALANALYSE

Das Condition Monitoring basiert auf den in den einzelnen Sensorknoten erfassten Messgrößen, die gebündelt in der CoMoGear-Zentraleinheit auflaufen. Dort werden Kennwerte zur Charakterisierung des Getriebeverschleißes bestimmt und dem Anwender zur weiteren Beurteilung des Getriebezustandes u. a. grafisch zur Verfügung gestellt.

Der Kennwert „Schlupfgrad“ bspw. – definiert als normierte Differenz von Antriebs- zu Abtriebsdrehzahl – dient zur Ableitung von vier Betriebszuständen. Diese triggern die Zentraleinheit einerseits bestimmte Messungen an den Sensorknoten zu starten, die aufgrund der begrenzten Energiereserven nicht permanent möglich sind. Andererseits geben sie selbst im Rahmen einer Häufigkeitsverteilung Auskunft über den Zustand des Getriebes (z. B. Flottenvergleich) bzw. zum Verschleißgrad der Kupplung (z. B. in Form der Kupplungsnutzungshäufigkeit).

Ein direkter Kennwert ist der gemessene Verschleiß der Kupplung des SK 4. Gespeichert als Zeitreihe und im Vergleich zum ursprünglichen, verschleißfreien Wert, gibt die Zu- oder Abnahme des Kennwerts dem Fachmann Auskunft über den Verschleißmechanismus der Kupplung.

Die Korrelation zwischen der Temperatur in der Kupplung und dem Schlupfgrad kann durch Klassierung der beiden Größen und Inkrementieren des Eintritt-Ereignisses in einer Zustandsmatrix abgebildet werden. Ergänzt wird die Zustandsüberwachung des Getriebes im Rahmen der Datenanalyse durch Lastprofile, die auf den Messgrößen Drehzahl und Drehmoment basieren.

INTEGRATION IM GETRIEBE

Die Validierung des Gesamtsystems wird in zwei Stufen durchgeführt. Zum einen sind die einzelnen Sensorknoten bei den Projektpartnern auf Komponentenebene getestet worden und zum anderen wird das Gesamtsystem aus den beschriebenen Sensorknoten und der Zentraleinheit in ein maritimes Getriebe integriert und die beschriebenen Funktionen mit Funktionsuntersuchungen und einem Dauerlauf auf dem Versuchsprüfstand von REINTJES validiert.

Das Getriebe ist ein Wendeuntersetzungsgetriebe mit der Übersetzung $i = 5,95$ und hat eine Vorwärts- und eine Rückwärtsstufe (siehe Abb. 6). Als Schaltkupplungen werden hydraulisch betätigte Lamellenkupplungen verwendet. Das Getriebe ist ein Standardgetriebe mit einem hohen Marktanteil der gesamten Baureihe. Die verwendete Baugröße ist für einen Leistungsbereich von 800-1400 kW ausgelegt. Die Einsatzgebiete dieser Getriebebaureihe reichen von Arbeitsschiffen, Fähren über Hybrid- bis zu Offshore Anwendungen und Yachten. Für die Integration der Sensorknoten wurden das Getriebe bzw. mehrere Komponenten konstruktiv geändert. Funktional wurde am Getriebe und an dessen Ansteuerung nichts verändert.



Abb. 6: Wendegetriebe für die Validierung

Die Zentraleinheit wird auf einen Inspektionsdeckel auf der Oberseite des Getriebes montiert und die Energieversorgung erfolgt durch das EHS 3. Dieses ist in dem Sensorknoten SK 3, der die Drehzahl an der Antriebswelle erfasst, integriert und versorgt diesen ebenfalls mit ausreichend Energie. Zur Energieerzeugung befindet sich auf der Antriebswelle auf dem gesamten Umfang neben der Verzahnung der Kupplungsstufe ein Magnetring. Sobald die Hauptmaschine läuft und die Mindestdrehzahl überschritten ist, wird auch bei nicht geschalteter Kupplung genügend Spannung in den Spulen des EHS 3 induziert, um beide Systeme permanent mit ausreichend Energie zu versorgen. Der Sensorknoten ist so positioniert, dass der Sensor die Zahnköpfe als Signalgeber nimmt. Somit ist die Erfassung der Drehzahlen hochfrequent möglich, um mit den Messwerten auch aussagefähige Analysen durchführen zu können.

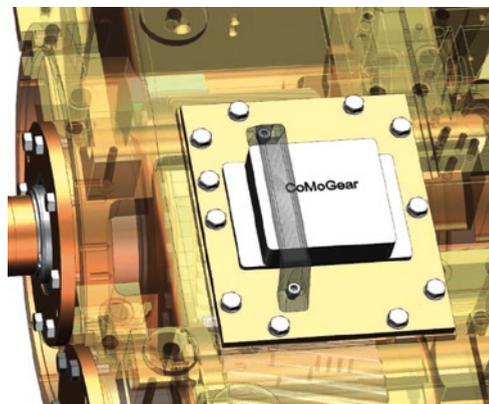


Abb. 7: Zentraleinheit

Die Sensorknoten SK 4 und SK 5 befinden sich auf der rotierenden Welle und sind zusammen mit dem EHS 4 in einem Gehäuse integriert und stirnseitig am Kupplungsgehäuse befestigt. Mit den Sensoren werden zum einen die Temperatur in der Kupplung

und zum anderen der Verschleiß der Kupplung erfasst. Die Energie wird über am Getriebegehäuse befestigte Magnete in den Spulen im rotierenden Sensorknoten erzeugt. Bei allen Magnet-Spulensystemen wird auf eine gute Ausrichtung der Spulen zu den Magneten und vom Sensor zur Verzahnung geachtet. Insbesondere der Abstand der Spulen zu den Magneten sollte so gering wie möglich sein und liegt im Millimeterbereich. Die Festlegung der Toleranzen für die Ausrichtung und Einstellung werden in der Validierungsphase mit überprüft. Der SK 2 mit dem EHS 2 erfasst die Abtriebsdrehzahl. Mit beiden Drehzahlsensoren kann ein Schlupfen der Kupplung erfasst werden und somit u. a. die Betriebsart Dynamic Positioning erfasst und geregelt werden. Der Drehmomentensensor SK 1 ist zur Datenübertragung mit der Zentraleinheit und zur Energieversorgung mit dem EHS 3 verbunden.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts CoMoGear konnte ein energieautarkes, drahtloses Sensornetzwerk zur Zustandsdiagnose von hochbelasteten, rotierenden Bauteilen im Schiffsgetriebe entwickelt werden. Dieses Sensornetzwerk besteht aus mehreren Sensorknoten und Energy Harvestern.

Zum Abschluss des Projekts erfolgt die prototypische Implementierung und Validierung des Gesamtsystems. Die Validierung der einzelnen Sensorknoten erfolgte auf Komponentenebene bei den Projektpartnern.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundprojekts CoMoGear. Weiterer Dank gebührt dem Projektträger Jülich für die gute administrative Unterstützung.

LITERATUR

- [1] DNV GL Strategic Research & Innovation: Research Review 2014 - Capturing our Future, pp. 10-11.
- [2] Bruhn, W. C. et. al.: Conducting look-out on an unmanned vessel - Introduction to the advanced sensor module for MUNIN's autonomous dry bulk carrier. In: DGON ISIS 2014, Hamburg, Germany, 4./5. September 2014.
- [3] Rødseth, H.; Brage, M.: Maintenance Management for Unmanned Shipping. In: 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Redworth 2014.
- [4] Jardine, A.; Lin, D.; Banjevic, D.: A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 20 (2006), No. 7, pp. 1483-1510.
- [5] DNV GL Strategic Research & Innovation: Beyond Condition Monitoring in the maritime Industry, pp. 10-11.
- [6] Schneider, T.; Kruse, T.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Evaluation of an energy self-sufficient sensor for monitoring marine gearboxes position. In: Procedia Manufacturing, vol. 24 (2018), pp. 135-140, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.019.
- [7] Schneider, T.; Perwas, J.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Validation of an inductive sensor for monitoring marine gearboxes. In: Overmeyer, L. (Hrsg.): AST – Symposium on Automated Systems and Technologies. TEWISS Verlag, Hannover 2018, ISBN: 978-3-95900-223-3, pp. 3-7.

MOPS – METHODENBANKSYSTEM FÜR OFFSHORE- UND POLAR-SYSTEME

FÖRDERKENNZEICHEN 033X407

PROF. DR.-ING. STEFAN KRÜGER	TUHH - Technische Universität Hamburg
DIPL. ING. OLIVER LORKOWSKI	FSG - Flensburger Schiffbau-Gesellschaft
DR.-ING. ADELE LÜBCKE	PS - Pella Sietas, Hamburg
DR.-ING. HENDRIK VORHÖLTER	MRV MAREVAL, Hamburg
DIPL.-ING. KLAAS OLTMANN	OV Tractebel Overdick, Hamburg

KURZBESCHREIBUNG

Das Ziel des Verbundprojekts MOPS war die Entwicklung und Bereitstellung von erprobten Simulationswerkzeugen für die Analyse von Offshore- und Polarsystemen sowie Operationen. Die neuen Simulationswerkzeuge sollen insbesondere den Grenzbereich zwischen der klassischen schiffbaulichen „Welt“ (schlanke Schiffskörper, Freiformflächen, nicht-lineare Hydrostatik) und der klassischen Offshore „Welt“ (stumpfe, zerklüftete Körper, nicht-lineare Kopplungen zwischen mehreren Körpern) abdecken.

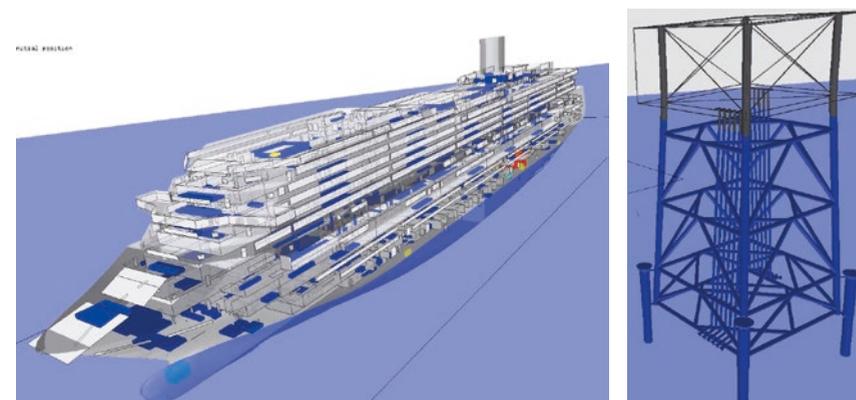


Abb 1: Volumetrisches Modell eines schlanken Schiffes (links) und einer zerklüfteten Offshore-Struktur (rechts)

Die Entwicklung fand ferner vor dem Hintergrund statt, dass der Markt für Offshore-Simulationswerkzeuge mittlerweile geprägt ist durch eine immer stärkere Marktkonzentration mit sehr langsamen Entwicklungszyklen. Im Rahmen des Vorhabens wird daher eine Methodensammlung zur Berechnung von Problemen aus der Offshore- Industrie innerhalb der bewährten schiffbaulichen Entwurfsumgebung E4/SEGIS entwickelt. Es gibt methodisch große Gemeinsamkeiten zwischen Schiffbau und der Offshore- Industrie, obwohl die zu

berechnenden Strukturen sehr unterschiedlich sind. Durch die Energiewende tritt nun verstärkt das Problem auf, Offshore-Probleme mit konventionellen Schiffen angehen zu wollen. Dadurch werden verstärkt Berechnungen nachgefragt, die an der Schnittstelle zwischen schiffbaulichen Problemen und solchen aus der Offshore-Industrie liegen. Dieser Entwicklung trägt das Vorhaben Rechnung: Eine bewährte schiffbauliche Entwurfsumgebung soll gezielt für Problemstellungen aus der Offshore-Industrie erweitert werden. Dazu gehören nicht nur neue Beschreibungsrundlagen und Datenmodelle für Offshore-Strukturen, sondern auch erweiterte Berechnungsverfahren und das zugehörige Post-processing. Das Vorhaben führt nach Ansicht der Vorhabenpartner erstmalig die entscheidenden Spezifika der Offshore-Industrie und des Schiffbaus zusammen. Bisher haben diese Branchen weitgehend nebeneinander existiert. Das liegt auch daran, dass die jeweiligen Berechnungswelten, Prozesse und Vorschriften stark unterschiedlich geprägt sind. Daher existiert bisher kein bekannter methodischer Ansatz, die Vorteile beider Welten durchgängig miteinander zu kombinieren. Die Vorhabenpartner haben aber gemeinsam erkannt, dass in einer Zusammenführung der beiden Berechnungswelten, erhebliche Synergieeffekte liegen können. Gleichzeitig wird durch die Konstruktion des Vorhabens dafür gesorgt, dass die Interessen aller Partner langfristig auch nach Abschluss des Vorhabens berücksichtigt werden können. Das Vorhaben leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Industrie.

PROBLEMSTELLUNG UND AUFSTELLUNG DES KONSORTIUMS

Die Neuausrichtung der maritimen Industrie in Deutschland hat sich im Wesentlichen auf komplexe Spezialschiffe (Werften) sowie Offshore-Anlagen für Wind, aber auch für Öl und Gas fokussiert (Ingenieurbüros und Dienstleister). Damit entfernt sich die maritime Szene in Deutschland praktisch vom klassischen Serienschiffbau. Dadurch treten zunehmend technische Problemstellungen auf, für die es in der klassischen Schiffstechnik keine oder nur eingeschränkt verwendbare Berechnungswerkzeuge gibt. Umgekehrt existieren in der Offshore-Industrie bewährte Berechnungsverfahren für die dort gängigen Strukturen. Diese lassen sich aber nur eingeschränkt auf solche Probleme anwenden, die stärker schiffbaulich geprägt sind (also bei Fahrt oder bei Freiformkörpern). Damit liegen derzeit weitestgehend voneinander getrennte Berechnungswelten vor (eben Offshore und klassischer Schiffbau), die aber eigentlich ein hohes Maß an Synergien aufweisen. Gemeinsam ist vor allem in beiden Branchen, dass eine deutliche Beschleunigung der frühen Konzeptphase zu verzeichnen ist, die ein durchgängiges Berechnungskonzept bei kurzen Antwortzeiten voraussetzt. Hinzu kommt, und das gilt für beide Branchen, dass in letzter Zeit ein starker Konzentrationsprozess bezüglich der Hersteller von potentiellen Berechnungsverfahren stattgefunden hat. Gleichzeitig stammen viele der verwendeten Berechnungsalgorithmen noch aus den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts, und der derzeitige Konzentrationsprozess trägt kaum dazu bei, dass eine Weiterentwicklung dieser Verfahren stattfindet. In der Offshore-Industrie ist diese Situation insofern noch etwas problematischer, weil sich die Anbieter von geeigneter Berechnungssoftware zunehmend am Bedarf der ganz großen Ölgesellschaften ausrichten. Es besteht aber durchaus Bedarf an einer Weiterentwicklung der Verfahren.

Nun steht den Projektpartnern aufgrund von Eigenentwicklungen sowie aufgrund mehrerer durchgeführter Verbundvorhaben eine prinzipiell leistungsfähige Berechnungsbasis im Rahmen des Methodenbanksystems E4/SEGIS zur Verfügung. Die prinzipielle Basisarchitektur des offenen Systems wird aus Abb. 2 ersichtlich. E4/SEGIS war bisher vor allem auf die Belange des Schiffsneubaus ausgerichtet mit Stärken bei RoRo- und Fahrgastschiffen sowie bei Marinefahrzeugen aller Art. Es ist architektonisch offen und nicht auf den Schiffbau beschränkt und kann daher aufgrund seiner Konzeption auch auf andere Produkte erweitert werden. Aus diesen Gründen hat sich das Konsortium zusammengefunden, um genau eine solche Erweiterung im Rahmen dieses Vorhabens durchzuführen, und zwar mit Blick auf die jeweils vertretene Unternehmensphilosophie.

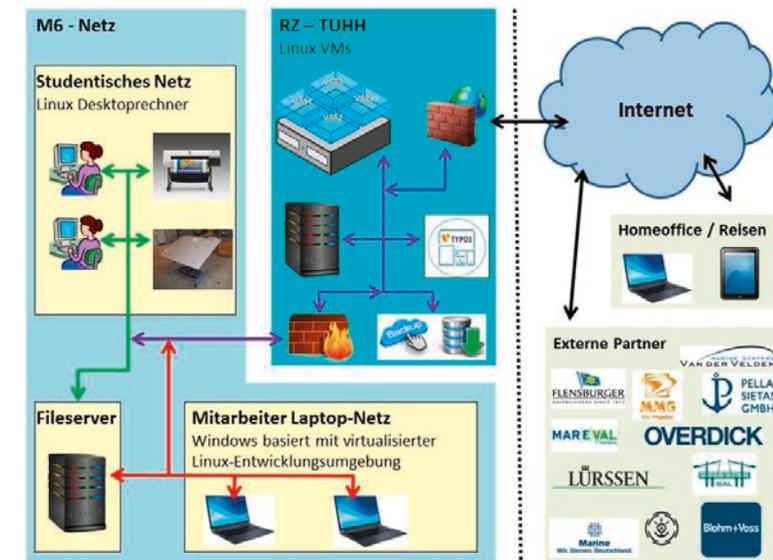


Abb. 2: Prinzipielle Architektur des offenen Methodenbanksystems

Die TUHH hat die wesentlichen Grundlagenarbeiten innerhalb des Vorhabens durchgeführt und dabei die Entwicklungen der einzelnen Partner so koordiniert, dass am Ende ein leistungsfähiges Gesamtpaket entstanden ist. Die TUHH organisiert auch die weitere Entwicklung der Methoden über das Vorhabensende hinaus.

MAREVAL und OVERDICK wollen effizient Offshore-Strukturen (Jackets, Kranbargen, Rigs, Plattformen) erfassen und auch berechnen. Dazu gehören auch Anker- und Mooring-Probleme, auch in der Kombination mit dynamischem Positionieren berechenbar werden. Wichtig sind auch alle Arten der Operation von Offshore-Strukturen, wie Jacket Launchings, Kranoperationen sowie Ausschwimmen und Sichern von Strukturen. Anders als für die Werften besteht für die Dienstleister das Problem, dass die Simulationsergebnisse, und insbesondere deren Darstellung, direkt das verkaufte Produkt darstellen. Bei den Werften steht hingegen das abgelieferte Schiff im Vordergrund und es kommt weniger auf die Einzelheiten der dazu erforderlichen technischen Berechnungen an.

Die FSG betreibt zwar nach wie vor den Neubau von Fähren, hat sich aber zunehmend auch auf den Neubau von Offshore- Fahrzeugen konzentriert. Hier ist es weitgehend üblich, dass der Entwurf von einem Ingenieurbüro erstellt wird und die Werft eher als reine Bauwerft agiert. Oft sind diese Entwürfe aber technisch nicht vollständig ausgereift, so dass zunehmend der Bedarf entsteht, verschiedenste Fremdentwürfe schnell nachmodellieren zu können, um sie dann technisch bewerten zu können. Hinzu kommt, dass bei Offshore- Projekten der Wert durch die komplexe Offshore-Ausrüstung an Deck bestimmt wird, wobei hier die Schnittstellen zwischen dem Schiff (Plattform) und der Ausrüstung klar durchdrungen werden müssen. Hinzu kommt, dass viele der in der Vergangenheit entwickelten Methoden eher für schnelle und schlanke Schiffe geeignet sind und bei den völligen Schiffen und zerklüfteten Strukturen an ihre technischen Grenzen stoßen.

Pella Sietas beschäftigt sich aktuell mit der Entwicklung für Schiffe für arktische Fahrtgebiete mit besonders hoher Eisträumfähigkeit. Es ist zu erwarten, dass der Bedarf nach solchen Schiffen zukünftig wachsen wird. Diese Schiffe interagieren mit Offshore- Strukturen und haben ein vergleichbares Portfolio an Ausrüstung mit an Bord. Neben Offshore liegt hier der Fokus auf den Betrieb unter arktischen Eisbedingungen. Gerade für diese Anforderungen fehlen viele Berechnungswerkzeuge oder die vorhandenen Methoden arbeiten außerhalb ihres bekannten Gültigkeitsbereiches. Das gilt auch für viele Methoden der Rumpfformbewertung sowie für Widerstand und Propulsion im Eis.

STRUKTUR DES VORHABENS UND ARBEITSPAKETE

Die durchzuführenden Arbeiten lassen sich gemäß Abb. 1 in einer Matrix- Struktur darstellen: Einmal wurden die technischen Themenblöcke Positionierung, Offshore-Operationen und Eis als zentrale Forschungsfelder identifiziert. Das sind die Themenfelder, auf denen methodische Defizite durch die Antragsteller identifiziert wurden. Die zu bearbeitenden Querschnittsthemen gliedern sich in Methodische Grundlagen, Schnittstellen/ Datenstrukturen/Prozesse, Postprocessing und Dokumentation sowie Validierung.

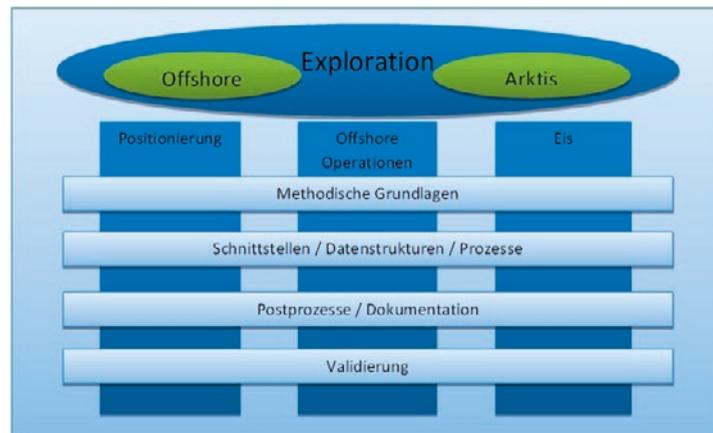


Abb. 3 : Matrix-Struktur des Vorhabens

Aus den identifizierten Querschnittsthemen ergeben sich die einzelnen Arbeitspakete des Vorhabens mit den Teilaufgaben wie folgt:

AP 1: Methodische Grundlagen (Koordination: TUHH)

- › Integration von beliebigen, nichtlinearen Federelementen in alle schiffbaulichen Analysemethoden: Verankerungen, Kabel- und Rohrverlegung, Bodenkontaktprobleme
- › Integration von Morrison- Elementen in alle schiffbaulichen Analysemethoden
- › Berechnung von Absenkvorgängen beliebiger Strukturen
- › Hydrodynamische Bewertung von stumpfen Schiffen
- › Widerstand und Propulsion von modernen Schiffen im Eis
- › Integration neuer Vorschriften (Offshore und Eis) in die schiffbauliche Berechnungslandschaft
- › Methodik zur schnellen Modellierung mehrdimensionaler Zufallsprozesse
- › Statistische Modellierung von Einsatzszenarien zur realistischen Bestimmung von Einsatzgrenzen und Einsatzdauern
- › Statistisch zuverlässige Modellierung und Detektierung seltener Extremereignisse
- › Schnelle Bestimmung von Spannungsübertragungsfunktionen für Betriebsfestigkeitsfragen

AP 2: Schnittstellen/Datenstrukturen/Prozesse (Koordination: Pella Sietas, FSG)

- › Modellierung und hydrostatische Berechnungen von offshorespezifischen Geometrien
- › Im- und Export von unkonventionellen Geometrien
- › Modellierung, Generierung und Berechnung durchgängiger Mehrkörperstrukturen
- › Management/Dokumentation des Softwareversionsstandes
- › Erweiterung der Exportschnittstellen

AP 3: Postprozesse/Dokumentation (Koordination MAREVAL)

- › Schnittstelle für nutzerangepasste Berichtsgenerierung
- › On-Line Methodendokumentationssystem in englischer Sprache
- › Auswertungsverfahren, inklusive grafischer Visualisierung von Lebensdaueranalysen und Extremwertbestimmung
- › Schnittstelle für die Übertragung von Maximalbelastungswerten und Lastkollektiven an Festigkeitsberechnungssoftware

AP 4: Validierung (Koordination OVERDICK)

- › Vergleichstest mit existierenden Programmen nach Offshore- Standard
- › Validierung anhand bekannter Literaturfälle nach Offshore- Standard
- › Validierung der Vorschriften nach Eisklasse- Standards
- › Modellversuche zur hydrodynamischen Validierung von Schiffen im Eis
- › Validierung der statistischen Modellierung anhand von ausgesuchten Schadensfällen

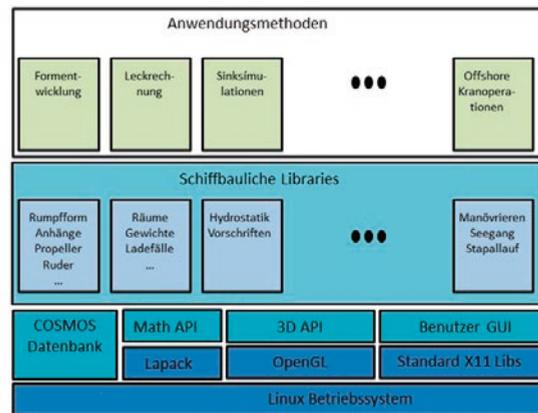


Abb. 4 Software- Komponenten des offenen Methodenbanksystems

Aus Abb. 4, in der die wichtigsten Software-Komponenten des Systems gezeigt sind, wird ersichtlich, dass die einzelnen Arbeitspakete aus nach dem Arbeitsplan des Vorhabens zu folgenden Entwicklungen führen:

- > Erweiterung der Datenbasis des Systems für die Beschreibung der neuen Komponenten
- > Entwicklung von standardisierten Prä- und Postprozessoren, um die neuen Datenstrukturen aus der Systemdatenbasis in die einzelnen Methodendatenbasen zu überführen
- > Entwicklung neuer Softwarebibliotheken für die technische Berechnung der neuen Komponenten
- > Einbindung der neuen Berechnungsmöglichkeiten in bereits bestehende Methoden
- > Entwicklung neuer Berechnungsmethoden für die neuartigen Strukturen
- > Entwicklung von Im- und Exportschnittstellen zu anderen Systemen für die neuen Strukturen

Diese Entwicklungsschritte lassen sich exemplarisch an in Abb. 1, rechts, gezeigten Berechnungsmodell eines Jackets einfach aufzeigen. Während ein Schiff aus einer überschaubaren Anzahl von Freikörpern besteht, die extrem unterschiedliche hydrostatische Steifigkeiten in den einzelnen Freiheitsgraden haben, besteht eine Offshore-Struktur aus einer Vielzahl von beliebig im Raum angeordneten analytisch beschreibbaren Elementen, und sie besitzt vergleichbare und zudem geringe hydrostatische Steifigkeiten in den relevanten Freiheitsgraden. Daher muss die Datenbasis um analytische Beschreibungselemente erweitert werden. Die Ermittlung der Steifigkeitsmatrix bei Schiffen erfolgt durch numerische Integration der einzelnen Freiformteilkörper mit anschließender partieller Integration. Eine numerische Integration bei den Jacket-Bauteilen wäre natürlich leicht möglich, sie wäre aber wegen der Vielzahl der Bauteile recht ineffizient. Daher muss ein paralleler Hydrostatik-Zweig entwickelt werden, der auf einer analytischen Integration der einzelnen Bauteile im Raum beruht, und es muss zur Laufzeit auf den jeweiligen Hydrostatik-Ast verzweigt werden können. Weil beim Absenken des Jackets manche Elemente geflutet werden, muss es möglich sein, in diesen Elementen Räume definieren zu können

(Partitionierung), die dann analog zu den schiffbaulichen Ladefällen berechnet werden können. Weil während des Absenkens sehr große Verdrehwinkel auftauchen können, muss die bisher rein schiffbaulich getriebene Gleichgewichtslageniteration numerisch angepasst werden. Weil man solche Strukturen auch effizient beschreiben können muss, musste ein spezieller Editor für solche Strukturen entwickelt werden. Natürlich möchte man auch Strukturen, die in anderen Systemen erzeugt wurden, verlustfrei importieren können, wozu spezielle Schnittstellen und Importmethoden entwickelt werden müssen. Um Schwimmlagen rechnen zu können, müssen auch Datenstrukturen für die einzelnen Gewichtsbaugruppen entwickelt und befüllt werden. Weil mehrere vollständige Strukturen gleichzeitig betrachtet werden müssen (Geometrie, Räume, Gewichte, Beladungsfälle u.a.m.) muss die Datenbasis so erweitert werden, dass anstelle eines einzigen Schiffes beliebig viele Datensätze gleichzeitig vorgehalten werden können. Bei allen bisherigen Berechnungsmethoden muss dann zusätzlich berücksichtigt werden, dass zur Laufzeit der Berechnung der Datensatz ausgewechselt werden muss. Damit zieht die Integration der neuen Berechnungsmöglichkeiten schon für die bisherigen schiffbaulich geprägten Standard-Berechnungen einen erheblichen Aufwand an neu zu entwickelnden Werkzeugen und Möglichkeiten nach sich. Die Dokumentation der Berechnungsergebnisse muss dann ebenfalls an die neuen Standards angepasst werden. Daneben haben sich aus dem Vorhaben spezifische Berechnungsmethoden speziell für Offshore-Strukturen oder für Kombinationen von Offshore-Strukturen und Schiffen ergeben, von denen im Folgenden lediglich einige Entwicklungen beispielhaft vorgestellt werden.

INTEGRATION VON MORRISON-ELEMENTEN



Abb. 5: Errichterschiff mit ausgefahrenen Hubbeinen

Wenn wie in Abb. 5 gezeigt, Strukturen berechnet werden sollen, die aus schiffbaulichen Teilen (Rumpf) und Offshore-Teilen bestehen, dann müssen dafür spezielle Berechnungsmethoden entwickelt werden, die auf Morrison-Elementen beruhen. Dazu ist die Datenbasis zylindrischer Körper um hydrodynamische Eigenschaften erweitert worden. Diese umfassen vom Nutzer vorzugebende, zeitlich unabhängige hydrodynamische Massen-

trägheitsbeiwerte und Widerstandsbeiwerte. Außerdem wird die Oberflächenbeschaffenheit in Form der Rauheit vorgegeben, welche im Falle der automatischen, zeitabhängigen Zuweisung der genannten Beiwerte genutzt wird. Zur Berechnung der hydrodynamischen Kräfte wird ein einzelner Zylinder als ein einzelnes 3-dimensionales Morrison-Element modelliert. Die Relativbewegung zwischen Fluid und Zylinder wird dabei ebenso wie der Durchmesser über die Länge gemittelt und mit den tangentialen Beiwerten im Morrison-Ansatz verwendet. Zur Bestimmung des resultierenden Moments ergibt sich der Kraftangriffspunkt im Volumenschwerpunkt des Zylinders. Weiterhin wird der Einfluss der Umströmung der freien Enden bei der automatischen Bestimmung des Widerstandsbeiwerts in radialer Richtung in Form eines Abminderungsfaktors berücksichtigt. Die benötigte Hydrodynamik der Morrison-Elemente wird nun in einer zentralen Bibliothek zur Verfügung gestellt und kann jetzt als weiterer modularer Kraftbaustein in allen bisher vorhandenen Methoden genutzt werden. Nachdem die Berechnungsroutinen an bekannten analytischen Fällen validiert worden sind, wurden im Rahmen des Vorhabens dabei die Themenkomplexe „Manövrieren“ und „Seegang“ bearbeitet. Die Manövriermethoden lösen Bewegungsgleichungen in vier Freiheitsgraden, so dass nun lediglich der Morrison-Kraftbaustein in die bisherigen Berechnungen eingebunden werden muss. Bei stationären Problemen wie z.B. DP-Operationen werden nur die Kräfte (Rechte Gleichungsseite) benötigt, bei instationären Problemen (Manöver) zusätzlich der Beitrag zur Hydrodynamischen Masse (linke Gleichungsseite).

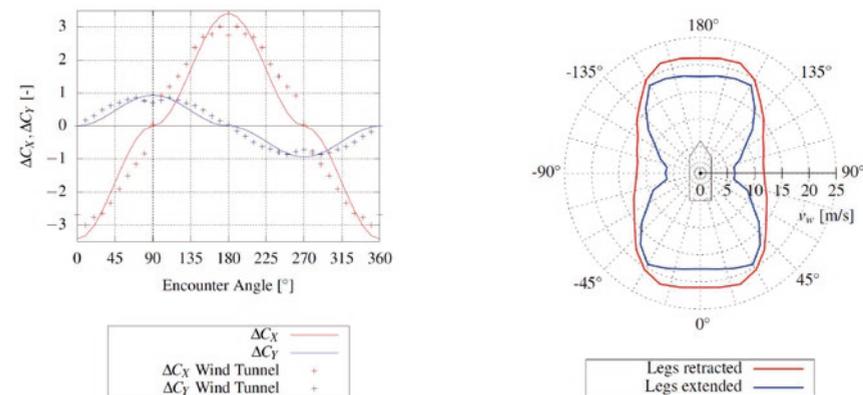


Abb 6: Kraftdifferenzen mit eingefahrenen und ausgefahrenen Beinen für das Errichterschiff (links) sowie der Einfluss der ausgefahrenen Beine auf die DP-Fähigkeit (rechts).

Abb. 6, links zeigt den Vergleich von berechneten und gemessenen Kraftbeiwerte für das Errichterschiff mit eingefahrenen und ausgefahrenen Beinen, dabei sind die Differenzen dargestellt. Man erkennt, dass die Berechnungen die Verhältnisse sehr gut wiedergeben. Damit lässt sich dann einfach berechnen, wie groß der Einfluss der ausgefahrenen Beine auf die DP-Fähigkeit des Schiffes ist (Abb.6, rechts). Für den Anwender ergibt sich bei den Berechnungen keinerlei Zusatzaufwand, wenn die Modelle einmal erstellt worden sind, weil die Methode automatisch erkennt, ob schiffbauliche oder Morrison-Strukturen gerechnet werden müssen. Die analoge Vorgehensweise erfolgt bei der Berechnung des

Seegangsverhaltens: In die Berechnung der Übertragungsfunktionen muss der Kraftbeitrag der Morrison-Elemente sowie deren hydrodynamische Masse zusätzlich integriert werden. Dann kann man kombinierte Übertragungsfunktionen rechnen (Abb. 7, links) und den Effekt der Beine im Detail untersuchen, ohne dazu dann für den Anwender zusätzliche Angaben nötig sind. Möchte man nun nicht-lineare Seegangsberechnungen im Zeitbereich durchführen, z. B. um dynamische Bodenkontaktkräfte der Beine während der Absenkeprozedur zu ermitteln, muss man lediglich dafür sorgen, dass der lineare Rollmomentenanteil einschließlich der Wirkung der Beine korrekt in der Datenbasis gespeichert wird, denn der Aufrichthebel im Seegang nach dem Konzept der Grim'schen Ersatzwelle ergibt sich dann automatisch aus der erneuten Berechnung der Aufrichthebel von Schiff und Beinen in Wellen (Abb. 7, rechts).

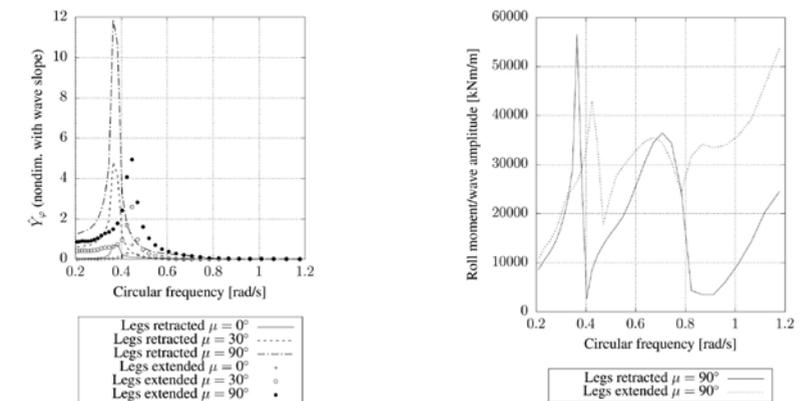


Abb 7: Lineare Übertragungsfunktionen des Errichterschiffes mit ein- und ausgefahrenen Beinen (links) sowie Einfluss der Beine auf das Rollmoment (rechts).

ABSENKVORGÄNGE BELIEBIGER STRUKTUREN MIT NICHTLINEAREN INTERAKTIONSKRÄFTEN

Absenkvorgänge werden für auszuwählende Ladefälle vom abzusenkenden Kolli und der Absenkeinrichtung berechnet. In der hydrostatischen Berechnung wird die hydrostatische Gleichgewichtslage bestimmt. In dem Fall, dass sich Kolli und Absenkeinrichtung punktuell berühren, wird die Kontaktkraft ausgegeben. In dem Fall, dass das Kolli auf den Pallen aufliegt, wird die gemeinsame Schwimmelage von Kolli und Absenkeinrichtung berechnet. Im Anschluss an die hydrostatischen Berechnungen folgen die strukturellen Berechnungen. Das Berechnungsmodell hierzu besteht aus parallel geschalteten Timoshenko-Balken, die an den Knoten über nicht lineare Federelemente miteinander verbunden sind. Die Lösung des nicht-linearen Gleichungssystems erfolgt dabei in einer zunächst inneren Schleife iterativ. Als Ausgabe erhält man die Pallenkraftverteilung sowie die Biegelinien von Kolli und Absenkeinrichtung. Es ist zudem möglich die Quersteifigkeit der Absenkeinrichtung in den Berechnungen zu berücksichtigen. Außerdem kann Grundberührung unter Annahme einer linearen Bodensteifigkeit einbezogen werden. Es wird die Durchbiegung der Absenkeinrichtung in einer äußeren Schleife auch in die Hydrostatik einbezogen. Im Anschluss an die die strukturellen Berechnungen wird anhand der Biegelinie der

Absenkeinrichtung eine Ersatzwelle generiert, die iterativ in der Hydrostatik berücksichtigt wird. Mit der daraus resultierenden Auftriebsverteilung sowie der sich ergebenden Schwimmlage werden die die strukturellen Berechnungen erneut durchgeführt. Dieser Iterationsprozess wird beendet, wenn die Differenz der Durchbiegungen zweier aufeinanderfolgenden Schritten unterhalb eines gewissen Wertes liegt. Bei großen Durchbiegungen sind mit dieser Erweiterung deutlich bessere Ergebnisse in den hydrostatischen und den strukturellen Berechnungen möglich, vor allem bei größeren Verformungen. Neben Validierungsrechnungen, die aufgrund von Pallenkraftmessungen im Marinearsenal Wilhelmshaven durchgeführt wurden, konnten Berechnungen und Messungen von Absenkvorgängen der Bauplattform P1 der Pella Sietas Werft im Rahmen des Vorhabens durchgeführt werden. Dabei besitzt die Bauplattform keine Seitenkästen, so dass es während des Ausdockens zu sehr großen Verformungen kommt. Messungen der Verformungen der Bauplattform während des Ausdockens einer Schiffssektion (Abb. 8, links) ergeben eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorher durchgeführten Berechnungen, vgl. dazu Abb.8, rechts. Als Ergebnis sind Methoden entstanden, die eine schnelle und auch zuverlässige Bewertung und Berechnung von Ausdock- und Absenkvorgängen aller Art ermöglichen.

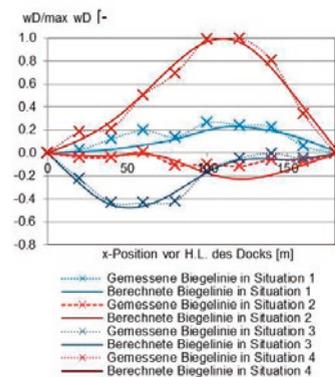
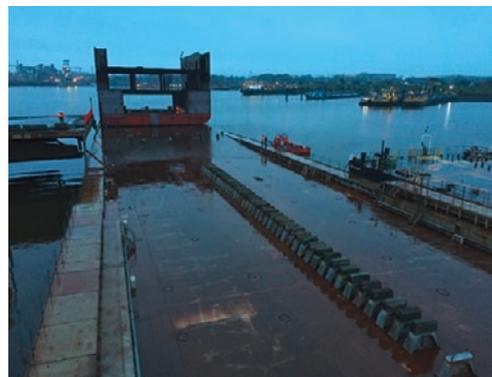


Abb 8: Ausdockvorgang einer Stahlsektion auf der Bauplattform P1 der Pella Sietas (links) und Vergleich der berechneten und gemessenen Verformungen in verschiedenen Zuständen (rechts).

INTEGRATION VON BELIEBIGEN NICHTLINEAREN FEDERELEMENTEN ZUR MOORING-ANALYSE

Die neu entwickelte Methodensammlung für die Mooring-Analyse beinhaltet die Erzeugung nichtlinearer Federkennlinien mittels eines Mooring-Editors und die anschließende Integration der Federkräfte in die Bewegungsmethoden. Der Mooring- Editor kann diverse Standard- Elemente wie Ketten, Seile, Klüsen, Anker und Bojen erfassen und berechnet daraus die nichtlinearen Federkennlinien, die in der Datenbasis gespeichert werden. Es ist auch möglich, Standard-Setups für Mooring-Fälle zu definieren und weiter zu verwenden. Die bestehende Methode zur Analyse von dynamischen Positioniervorgängen wurde um die Kräfte durch nichtlineare Federelemente ergänzt. Die Methode bietet nun die Möglichkeit, DP-Kräfte, Mooring-Kräfte und deren Kombination bei Einwirkung von zeitlich variierenden Wellen-, Strömungs- und Windkräften zu analysieren. Dabei wird im Zeitbereich für jeden

Zeitschritt die Reaktion des Systems auf die angreifenden Kräfte berechnet und liefert als Ergebnis den zeitlichen Verlauf der Systembewegung. Es ist sowohl eine einfache statische als auch dynamische Berechnung möglich. Die Umweltlasten standen bereits aus dem BMWI-Vorhaben DYPOS innerhalb der Methode zur Verfügung. Abb. 9 zeigt exemplarisch die Modellierung eines Quay-Side-Moorings mit vier Anker und zwei Fendern.

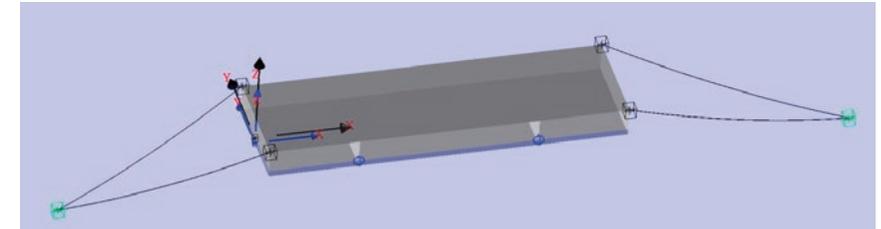


Abb. 9 Modellierung eines Quay- Side-Moorings

ZUSAMMENFASSUNG

Im Vorhaben MOPS ist es erfolgreich gelungen, spezielle Berechnungsmethoden und -ansätze aus der Offshore-Industrie in ein offenes schiffbauliches Methodenbanksystem zu integrieren. Damit ist es jetzt erstmalig möglich, Probleme effizient berechnen zu können, die sich an der Schnittstelle zwischen Offshore-Strukturen und Schiffen befinden. Das eröffnet den Vorhabenpartnern neue Berechnungsmöglichkeiten und damit auch neue potenzielle Geschäftsfelder. Begünstigt wurde die Entwicklung einerseits durch den streng modularen Aufbau des Systems und andererseits dadurch, dass die Partner auch aufgrund der Erfahrung mit anderen BMWI- Projekten effizient und eng verzahnt zusammengearbeitet haben. Die Arbeiten werden nach Ablauf des Vorhabens weiter fortgeschrieben werden, um die entwickelten Methoden weiter zu ertüchtigen. Die Arbeiten des Vorhabens wurden in neun Veröffentlichungen auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Ministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens MOPS sowie dem Projekträger Jülich für die kompetente und stets konstruktive Betreuung des Vorhabens. Ebenfalls gilt unser Dank dem Marinearsenal Wilhelmshaven, das das Vorhaben durch die Durchführung von Messungen unterstützt hat.

LITERATUR

Veröffentlichungen des Vorhabens

- [1] Dankowski, H., Weltzien C. : Calculation of the Hydrostatic and Structural Integrity of Docking Sequences. OMAE, Trondheim, Norway, 2017
- [2] Weltzien, C.: First Principle Applications to Docking Sequences. IMDC, Helsinki, 2018
- [3] Weltzien, C.: Applied Mechanics on Docking Sequences. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 89th GAMM Annual Meeting, Munich, 2018
- [4] Weltzien, C.: Numerische Berechnungen von Dockvorgängen. JSTG Hamburg, 2018
- [5] Josten, M.: Prediction of the Movement of Moored Vessels due to Exceeded Mooring Load Limits. ISOPE, Hawaii, USA, 2019
- [6] Josten, M.: Trajectory Prediction of Moored Vessels with Reduced Station Keeping Capability due to Exceeded Anchor Load Limits. OMAE, Glasgow, UK, 2019
- [7] Liebert, M.: Calculation of the Dynamic Positioning Capability of an Offshore Wind Farm Vessel during the Jack-Up Process in the Early Design Stage. OMAE, Glasgow, UK, 2019
- [8] Krüger, S., Josten, M., Souflis, L.: Safety vs. Sustainability- How Much Underpowering Of Ships is Acceptable ?, IMDC 2019, Tokyo, Japan
- [9] Liebert, M.: On the seakeeping behaviour of an offshore wind farm vessel during the jack-up process in the early design stage. IMAM, 2019, Varna, Bulgaria

Weitere Literatur

- [1] Morrison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, S.A. (1950): The force exerted by surface waves on piles. In Petroleum Transactions by AIME. Vol. 189, S. 149-154.
- [2] Barltrop, N.D.P.: Floating Structures: A Guide for Design and Analysis, Oilfield Publications Ltd., 1998.
- [3] Chakrabarti, S. K.: Offshore Structure Modeling, Advanced Series on Ocean Engineering, volume 9, World Scientific, 1994.
- [4] Clauss, Lehmann, Östergaard: Meerestechnische Konstruktionen, Springer, 1988.
- [5] OrcaFlex Manual, Orcina Ltd, 2012.
- [6] Jensen, J.J. (2014) "Conditional stochastic processes applied to wave load predictions", 37. Georg-Weinblum Gedächtnisvorlesung, Schiffbautechnische Gesellschaft

MARESX – MARITIMES RADAR MIT ELEKTRONISCHER STRAHLSCWEN- KUNG IM S- UND X-BAND

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX380

PROF. DR. ARNE F. JACOB	TU Hamburg, Institut für Hochfrequenztechnik, Hamburg
NILS HANSEN	TU Hamburg, Institut für Hochfrequenztechnik, Hamburg
STEFAN RADZIJEWski	TU Hamburg, Institut für Hochfrequenztechnik, Hamburg
JAN-PHILIP MOHNCKE	TU Hamburg, Institut für Hochfrequenztechnik, Hamburg
DR. AXEL SCHAAB	Raytheon Anschütz GmbH, Kiel
DR. CARSTEN REITER	Raytheon Anschütz GmbH, Kiel
PETER NÖCKER	Raytheon Anschütz GmbH, Kiel
KAY KALLERHOFF	Raytheon Anschütz GmbH, Kiel

EINLEITUNG

Für die Sicherheit von Besatzung und Passagieren auf Seeschiffen sind Radaranlagen unverzichtbar. Mit ihrer Hilfe werden Kurs und Position anderer Fahrzeuge auch bei schlechter Sicht bestimmt und so Kollisionen verhindert. Besonders kritisch sind allerdings kleine Objekte mit einem geringen Radarquerschnitt, die kaum vom Seeclutter (Reflexionen von Wellen und Gischt) unterschieden werden können.

Eine frühzeitige Entdeckung von Objekten, nach Möglichkeit eine Identifikation und vor allem eine kontinuierliche Beobachtung ist von großer Bedeutung, um den Schiffsführern die Möglichkeit zu geben, rechtzeitig angemessene Maßnahmen ergreifen zu können. Auch Wasserstraßen mit sehr hohem Verkehrsaufkommen und enge Hafengebiete stellen eine Herausforderung für die Brückenbesatzung dar, da die unmittelbare Umgebung des Schiffes kaum durch das Navigationsradar erfasst wird.

Der in heutigen Navigationsradaren genutzte technische Stand beruht im Wesentlichen auf Technologien aus der Mitte des 20. Jahrhunderts. In anderen Radar-Anwendungsfeldern hat es allerdings deutliche Weiterentwicklungen gegeben.

Das in MaReSX entwickelte System soll durch die Kombination mehrerer technologischer Neuerungen im Bereich der Schiffsradare den Besatzungen der Schiffe ein deutliches Plus an Sicherheit bringen, sowohl für das eigene Schiff als auch für den umgebenden Seeraum.

Vor allem nennenswert sind hier die Fusion der hohen Auflösung und Detailtreue des Radars im X-Band mit den besseren Schlechtwetter- und Clutter-Eigenschaften des Radars im S-Band.

Gemeinsam mit den Vorteilen einer kohärenten Signalverarbeitung werden so insbesondere kleine Objekte frühzeitiger und vor allem präziser detektierbar. Die Auswertung des Dopplerspektrums ermöglicht eine deutlich bessere Trennung von sich bewegenden Objekten und Seeclutter.

Die Verwendung einer aktiven Gruppenantenne mit elektronischer Strahlschwenkung ermöglicht eine größere Flexibilität in der Erfassung und Verfolgung von Zielen im Vergleich zu einer mechanisch rotierenden Antenne. Die erst dadurch mögliche häufigere Abtastung vorhandener Objekte erlaubt eine gezielte Verfolgung von kleinen, sonst schwer detektierbaren Objekten und verringert die Wahrscheinlichkeit des Verlustes des Tracks auf dem Objekt.

Und nicht zuletzt ist bei einer Gruppenantenne die Systemfunktion auf eine Vielzahl von einzelnen Sende-/Empfangelementen verteilt. Damit ist das System deutlich beständiger gegen den Ausfall eines einzelnen Elementes, da die Systemfunktion in diesem Fall dennoch grundsätzlich erhalten bleibt und lediglich eine leichte Verschlechterung der Performance erfährt.

AUFGABENSTELLUNG UND ZIELE

Das Ziel des Vorhabens war somit der Entwurf eines innovativen elektronisch schwenkbaren Radarsensors im S- und X-Band sowie dessen Einbindung in vorhandene Radar-Navigationssoftware. Hierdurch sollte ein vollständig neues Navigations-Radarsystem mit bislang in diesem Bereich nicht bekannten Eigenschaften entstehen.

Kern der Arbeiten war dabei die Entwicklung des Sensors mit seinen Sende-/Empfangelementen und der dazugehörigen Ansteuerungselektronik auf der einen und der entsprechenden Signalverarbeitung und der Darstellung auf der anderen Seite.

SYSTEMKONZEPT UND -PLANUNG

Ziel des Projektes war ein neuartiges Radar zur Navigationssicherung von Seeschiffen. An diese werden durch Normen und Nutzer Anforderungen formuliert, die somit auch das neuartige Radar erfüllen können muss. Ein Großteil der Anforderungen ergibt sich aus dem internationalen Standard IEC 62388 Mit diesem Ziel im Hintergrund wurden erste Systemkonzepte auf Basis von kombinierten S- und X-Band- Phased Arrays erstellt.

Um die Tauglichkeit der Konzepte zu ergründen, wurden Simulationen, zum Beispiel mit dem kommerziellen Berechnungstool CARPET oder Matlab durchgeführt, die insbesondere die folgenden Fragen beantworten sollten:

- > Wie viele Module werden zur Erreichung der Anforderungen benötigt?
- > Welche Sendeleistung müssen diese Module aussenden können?
- > Welche Empfindlichkeit müssen diese Module besitzen?

Aus der detaillierten Betrachtung ergaben sich dann weitere Anforderungen an die Komponenten, wie zum Beispiel die Güte der ADCs im Empfangszweig und auch die Art der Signalverarbeitung. Am Ende entstand ein Systemmodell mit dessen Hilfe die Performance des Radarsystems simuliert werden kann. Der Einfluss vieler Systemgrößen auf die Zieldetektion konnte somit genau genug festgelegt werden, um daraus dann die Basis für die Spezifikationen der Teilkomponenten festzulegen. Gerade für die geeignete Auswahl der Komponenten ist dies ein wesentlicher Schritt gewesen.

Die definierten Teilkomponenten sind im Übersichtsblöckschaltbild (Abbildung 1) zu sehen. Die kombinierte S- und X-Band-Antenne wird von Transmit-/Receive-Modulen, kurz T/R-Modulen angesprochen, die wiederum Teilmodule für S-Band, X-Band und dem gemeinsam genutzten Zwischenfrequenzbandanteil enthalten. An diese T/R-Module angeschlossen sind wiederum D/A und A/D-Module, die in Kommunikation mit den FPGA-Boards stehen, welche letztlich die Sendesignale erzeugen, die Empfangssignale auswerten und auch die gesamte Ablaufsteuerung übernehmen. Zur Ansteuerung und Darstellung der Ergebnisse kommunizieren die FPGA-Boards dann wiederum mit einem PC, auf dem eine graphische Oberfläche als Human-Machine-Interface (HMI) genutzt wird. Um die hohen Anforderungen bezüglich der zeitlichen Genauigkeit zu erreichen, leiten sich alle im System genutzten Frequenzen von einem einzigen zentralen Taktgeber ab, dessen Clocksignal an die nötigen Stellen verteilt wird.

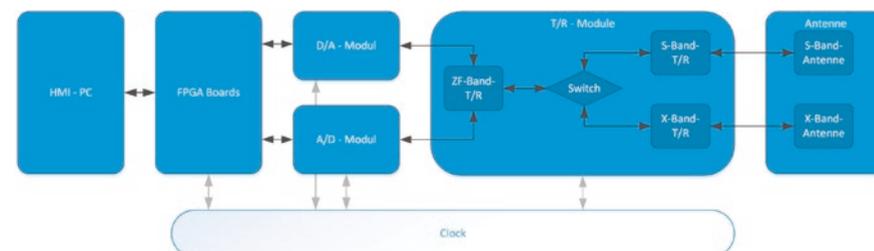


Abb. 1: Übersichtsblöckschaltbild des MareSX-Systems

Zusätzlich zu den an die hier gezeigten Module gestellten Anforderungen wurden auch frühzeitig die Schnittstellenprotokolle der einzelnen Module untereinander festgelegt, um die Module einzeln prüfbar zu gestalten und auch die auf die Projektpartner verteilte Entwicklung zielsicher zu gestalten.

Das Design der Teilkomponenten wird im Folgenden näher beschrieben.

ANTENNENDESIGN

Die Antenne bildet den Übergang von der Elektronik zum Ausbreitungsmedium und ist daher in jedem Radarsystem eine die Gesamtperformance maßgeblich beeinflussende Komponente. Daher wurde auf diesen Bestandteil besonders großer Wert gelegt. Die Kernanforderung neben den Anforderungen aus dem Standard IEC 62388 und technisch größte

Neuerung war die Integration von X- und S-Band-Antenne in einer gemeinsamen Komponente. Aufgrund des Neuheitsgrades wurden drei verschiedene Ansätze verfolgt und bezüglich ihrer Eignung für die hier beschriebene Anwendung untersucht.

Die drei Ansätze bestanden aus:

- > Erzeugung einer S-Band-Antenne durch Zusammenschalten mehrerer X-Band-Antennen
- > Aufbau durch dual-polarisierte, dual-bandige Einzelelemente in 3D-Struktur
- > Getrennter Entwurf von X- und S-Band-Antennen mit späterer Integration unter Nutzung frequenzselektiver Eigenschaften

Für jeden dieser Ansätze wurden Prototypen aufgebaut. Diese Prototypen wurden dann bezüglich ihrer Eigenschaften vermessen, wobei insbesondere die nutzbare Bandbreite in X- und S-Band von Interesse war. Diese wird üblicherweise dergestalt gemessen, dass ermittelt wird, wieviel der zur Antenne gesendeten Sendeleistung von der Antenne zurück zur Sendeleistung reflektiert wird. Die nicht reflektierte Sendeleistung ist demnach abgestrahlt worden. Ein geringer Reflektionspegel spricht also für ein gutes Übertragungsverfahren.

Der erste Ansatz der Realisierung einer S-Band-Antenne durch Zusammenschaltung mehrerer X-Band-Elemente ist in Abbildung 2 zu sehen. Die gemessenen Reflexionseigenschaften sind in Abbildung 3 zu sehen. Die gewünschte Bandbreite von mindestens 200 MHz ist im S-Band nicht ganz erreicht worden. Zudem besitzt dieser Aufbau für die Verwendung im Gruppenstrahler den Nachteil, dass die vier X-Band-Antennen jeweils nur eine Polarisation aufweisen, was nur mit erheblichem Aufwand geändert werden könnte. Der Aufbau wurde daher nicht weiterverfolgt.

Abb. 2: Darstellung der rekonfigurierbaren Antennenstruktur

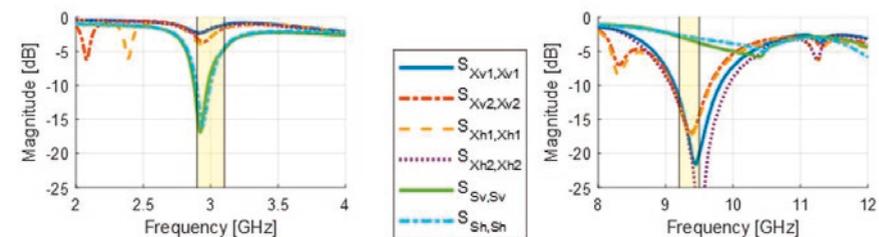
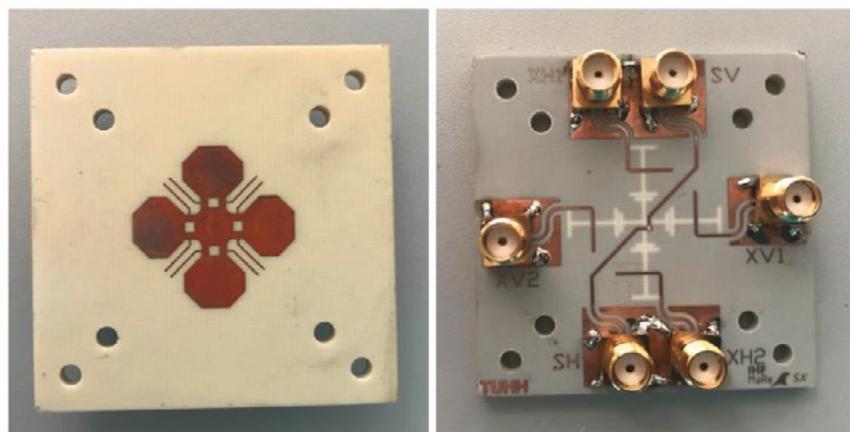


Abb. 3: Eingangsreflexion der rekonfigurierbaren Antennenstruktur

Der zweite Ansatz, bestehend aus dual-polarisierten, dual-bandigen Elementen ist in Abbildung 4 zu sehen. Der Aufbau ist durch die notwendige mechanische Montage recht zeitaufwändig. Die Reflexionseigenschaften, zu sehen in Abbildung 5, zeigen allerdings eine gute Anpassung in den gewünschten Frequenzbereichen. Sowohl im S- als auch im X-Band werden die gewünschten Bandbreiten erreicht. Die negativen Aspekte dieses Aufbaus sind auf der anderen Seite die ungenügende Polarisationsreinheit auch bei gleichzeitiger Anregung der Elemente, die großen Herausforderungen bei der Modularisierung durch die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Anregung vieler Elemente für eine gute S-Band-Antennencharakteristik und nicht zuletzt der aufgrund der komplexen Struktur schon erwähnte zeitaufwändige Aufbau. Von einer Verwendung im Radarsystem wurde aus diesen Gründen Abstand genommen.

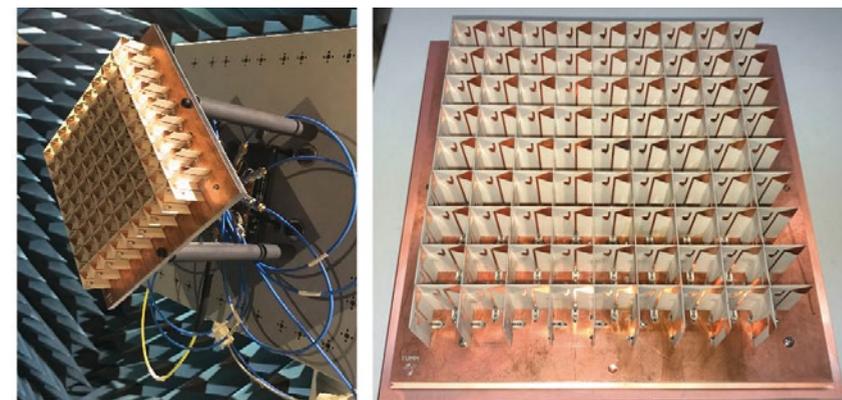


Abb. 4: Gruppenstrahler aufgebaut aus dual-polarisierten, dual-bandigen Einzelzellen

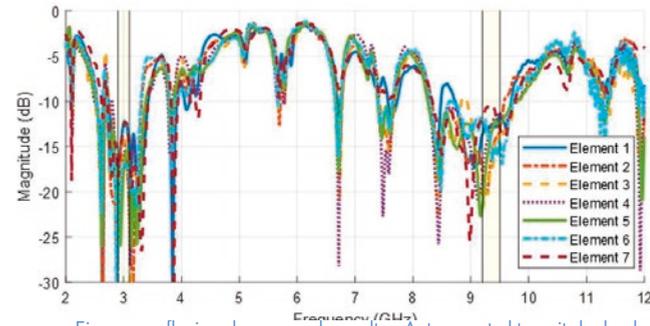


Abb. 5: Gemessene Eingangsreflexion der eng verkoppelten Antennenstruktur mit dual-polarisierten, dual-bandigen Elementen bei horizontaler Polarisation

Der dritte Ansatz bestand darin, die X- und S-Band-Antennen zunächst getrennt voneinander zu entwickeln und sie dann in einer Mehrlagenstruktur zu integrieren. Im S-Band-Antennenelement wurde eine Mikrostreifenantenne mit Sondenspeisung genutzt, während die X-Band Antenne aus aperturgekoppelten Mikrostreifenantennen besteht. Das zentrale S-Band-Element wurde schließlich derart modifiziert, dass die Abschattung der im Substratstapel darunterliegenden X-Band-Antenne minimiert wird und somit beide Bänder gut nutzbar sind (siehe Abb. 6). Dies hat den Vorteil, dass Speisetzwerk und Antennenstruktur räumlich voneinander getrennt sind. Hierdurch werden zum einen Störungen durch die Speiseleitungen reduziert, zum anderen lassen sich durch Nutzung der Apertur höhere Bandbreiten realisieren. Abbildung 7 zeigt die Einheitszelle eines Gruppenstrahlers nach diesem Ansatz sowie die gemessenen Reflexionsverfahren. Es ist zu sehen, dass die Antennen in den gewünschten Frequenzbereichen eine gute Anpassung erreichen. Negative Effekte wie ein in Elevationsrichtung erhöhtes Nebenkeulenniveau im X-Band bei vertikaler Polarisierung und im S-Band die Anfälligkeit des Designs für unsaubere Verkupferung waren zwar unerwünscht, aber nicht kritisch. Es konnten darüber hinaus im Nachhinein Verbesserungen untersucht werden, die Verkupferungs-problematik konnte sogar beseitigt werden.

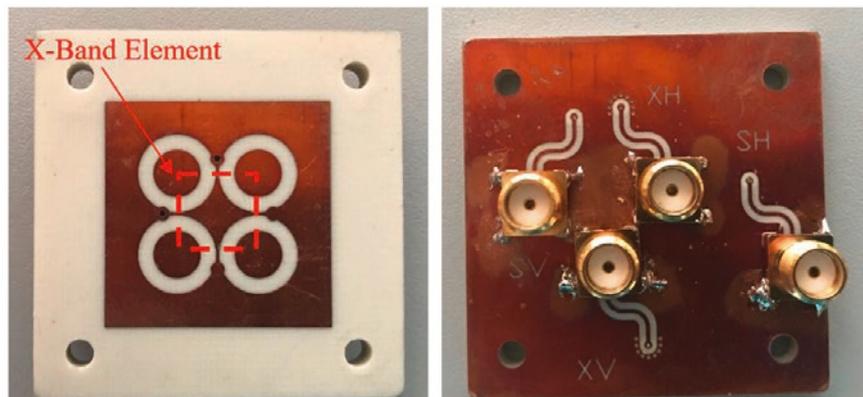


Abb. 6: S-Band-Antenne mit frequenzselektiver Oberfläche und Speisungen für die beiden Frequenzen und Polarisationen. Die X-Band-Antenne (rot gestrichelt) befindet sich in der Lage darunter

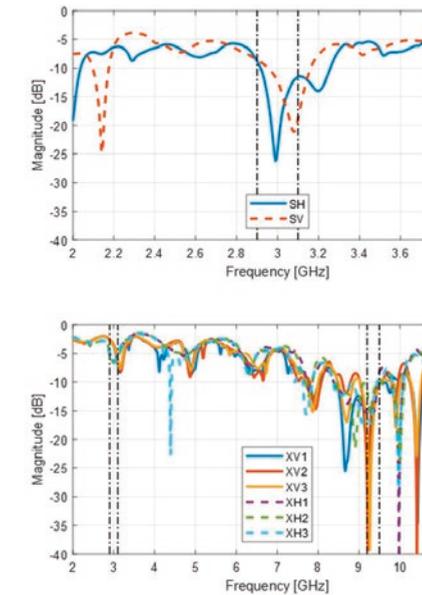
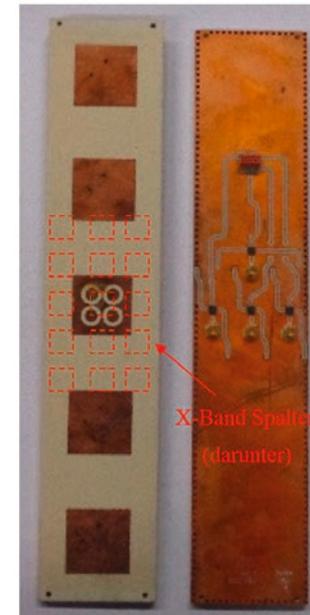


Abb. 7: Gefertigte Einheitszelle des Gruppenstrahlers nach Ansatz 3 und gemessene Reflexionsfaktoren im S- und im X-Band

Mit dem Design aus Ansatz 3 wurde eine Antenne für die Demonstration, bestehend aus zehn Modulen nebeneinander gefertigt. Abbildung 8 zeigt den aufgebauten Gruppenstrahler zusammen mit dem durch Messungen und anschließende nachträgliche Verrechnung für das X-Band erstellten Antennendiagramm. Die gewünschte Richtwirkung ist deutlich zu sehen.

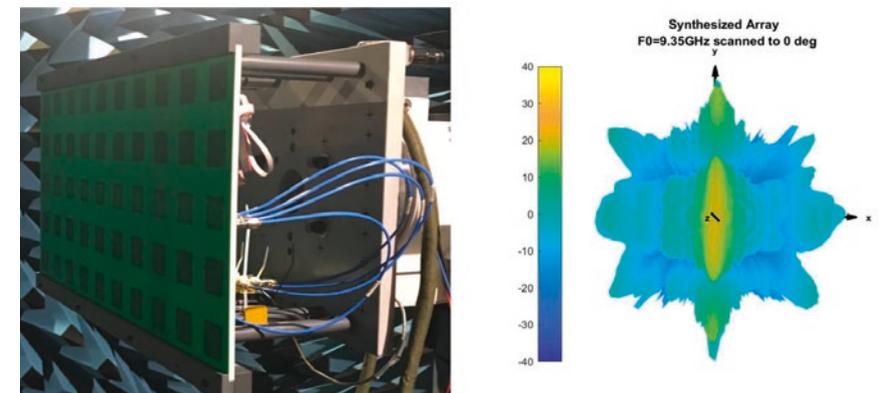


Abb. 8: Aufgebauter Gruppenstrahler aus zehn kombinierten Antennenmodulen und synthetisiertes Fernfeld der vertikalen Polarisation im X-Band

ELEKTRONIKMODULE

Für eine kombinierte X- und S-Bandantenne ist es naheliegend, auch die Elektronik so zu gestalten, dass möglichst große Teile für beide Antennenanteile nutzbar sind. Deshalb wurde für die Transmit/Receive-Module (T/R-Module) ein Aufbau gewählt, der diesem Ziel Rechnung trägt. So teilen sich X- und S-Band die Zwischenfrequenz-Stufe und nur der Anteil der Mischung auf bzw. von der Hochfrequenz wird auf je einem S-Band- bzw. X-Band-T/R-Modul durchgeführt. Über einen (elektronischen) Schalter kann zwischen S-Band- und X-Band-Betrieb umgeschaltet werden. Durch diesen Aufbau ist es dann auch möglich geworden, die gleichen AD- und DA-Module für X- und S-Band zu verwenden. Abbildung 9 zeigt eines der T/R-Module, wie sie im Demonstrator eingesetzt sind. Die Module erreichen eine Sendeleistung von etwa 27 dBm und eine Empfangsverstärkung von 10-60 dB und benötigen nur eine passive Kühlung.

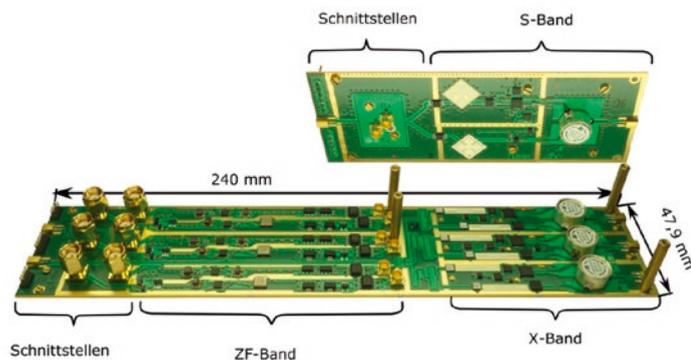


Abb. 9: Gefertigtes T/R-Modul für den Demonstrator

Des Weiteren wurden auch Komponenten eingesetzt, die nicht innerhalb des Projektes zu entwickeln waren, sondern frei am Markt verfügbar sind. Die verwendeten FPGA-Boards für die Durchführung der Signalverarbeitung, die Ablaufsteuerung sowie die Anbindung per Ethernet sind Kaufteile von Xilinx mit Virtex-7 FPGAs, es handelt sich konkret um zwei VC707-Platinen für Signalverarbeitung und Ablaufsteuerung sowie eine ZC709-Platine für die leistungsfähige Ethernetanbindung.

Für die AD-Wandlung der Empfangsdaten wurden FMC116 von der Firma 4DSP eingesetzt, für die DA-Wandlung im Sendezweig zur Erstellung der Sendesignale FMC216, ebenfalls von 4DSP. Als Clock wurde eine Kombination aus einem Si5341 Clock Generator von Silicon Labs und einem LMX2592 Wideband frequency synthesizer von Texas Instruments verwendet.

SIGNALVERARBEITUNG

Eine kurze Übersicht über die implementierte Signalverarbeitungskette zeigt Abbildung 10, wobei nur die wesentlichen Blöcke aufgelistet sind. Zuerst werden die Daten kalibriert bezüglich des Amplituden- und Phasenganges des Antennenkanals. Danach wird im

Beamformer durch geeignete kohärente Gewichtung und Überlagerung der einzelnen Kanalsignale ein Beamforming für eine gewünschte Steuerrichtung durchgeführt. Die erste Signalverarbeitungsstufe nach dem Beamformer ist das signalangepasste Filter (engl. Matched Filter). Es arbeitet auf dem momentan empfangenen Echo. Signalkenngrößen in mehreren aufeinander folgenden Range Zellen werden geschickt zusammengefasst. Anschließend werden diese Signale, die im Wesentlichen das Echo eines sehr kurzen Sendepulses darstellen, im Pulsbuffer zwischengespeichert. Dieser Buffer enthält die Echos von 32 bzw. 64 in Folge ausgesendeten Impulsen. Auf diesen Daten wird für jede Range Zelle bewertet, ob eine unzumutbar hohe Störung/Interferenz vorliegt. Dies ist die Aufgabe des Interference Rejection Filters. Anschließend verzweigt sich der Signalfluss. Die Daten im Pulsbuffer können entweder eine Inkohärente Addition erfahren, den Prozess der Moving Target Indikation (MTI), in dem Festziele unterdrückt werden, durchlaufen oder aber es findet ein Puls-Doppler-Processing (MTD) statt. Hierin werden die Signale einer Fourier Transformation unterzogen und spektral aufgespalten. Im MTD Filter kann eine spezielle Filtercharakteristik für die Dopplerverschiebung realisiert werden. Es folgt die automatische Zieldetektion mit konstanter Falschalarmrate (CFAR). Diese Daten werden dann mit hoher Datenrate über die GBIT-LAN –Schnittstelle zum Display PC versendet.

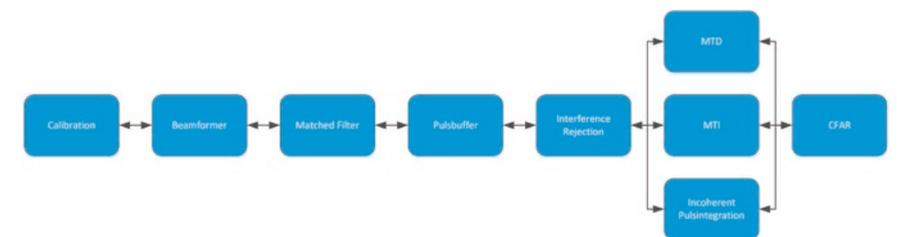


Abb. 10: Übersicht der implementierten Signalverarbeitungskette

SYSTEMINTEGRATION & DEMONSTRATION

Die einzelnen Subsysteme wurden in einem Trägersystem aus Aluminiumleisten angeordnet, sodass sie geschützt und fixiert sind. Der modulare Aufbau wurde beibehalten, sodass defekte Teile schnell ausgetauscht werden können und eine spätere Erweiterung des Demonstrators realisierbar ist. Zusätzlich erleichterte dies den Transport des Demonstrators zwischen den Projektpartnern. Der Aufbau des Demonstrators ist in Abbildung 11 zu sehen. Die dort gezeigte Konfiguration war für 16 Kanäle realisiert, insgesamt sind mit der Elektronik bis zu 32 Kanäle möglich. Mit dieser Kanalzahl ist ein System zwar nicht in der Lage, alle Anforderungen zu erfüllen, da sowohl Sendeleistung als auch Peilungsauflösung nicht ausreichen, aber zur Demonstration des Prinzips wäre es ausreichend. Darüber hinaus ließ auch das Projektbudget eine Kanalzahl in der Größenordnung von 80 nicht zu.

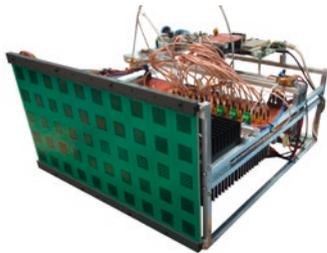


Abb. 11: Demonstrator in Schrägsicht. Im Vordergrund die S- und X-Band-Antenne, dahinter die Elektronik für die Signalverarbeitung

Zunächst wurde die Hardwaresteuerung in Betrieb genommen und getestet. Besonders wichtige Schaltzeiten, Spannungsverläufe und Ablaufsteuerungen wurden eingestellt und validiert. Parallel wurden Messungen mit einer Wärmebildkamera durchgeführt, sodass die Funktionsfähigkeit des Kühlsystems auch im Demonstrator gezeigt und bestätigt werden konnte.

Danach wurde eine Zusammenschaltung aller Systemkomponenten zum vollständigen Radarsystem durchgeführt. Hierbei konnte erfolgreich die Steuerung des Systems über das entwickelte HMI demonstriert werden. Eine Detektion von Radarzielen war allerdings nicht möglich, da sich bei der Inbetriebnahme gezeigt hat, dass die ADC und DAC in den FMC116 und FMC 216 inkohärent über alle Kanäle abtasten. Dieses Problem konnte bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht gelöst werden. Jedoch ist das Problem in der Implementierung der Kommunikationsschnittstelle zwischen der FMC116, FMC216 und den FPGA Boards lokalisiert worden. Ohne die Lauffähigkeit der AD und DA-Wandler konnte eine Demonstration auf Systemebene nicht durchgeführt werden, sodass das Projekt nur mit der Demonstration der Lauffähigkeit der einzelnen Systembestandteile, größtenteils durch einen Simulator stimuliert, abgeschlossen werden konnte. Der Simulator, der hierfür genutzt werden konnte, war im Rahmen des Projektes entstanden und ist in der Lage, in Echtzeit IQ-Daten zu liefern, in denen die Echosignale mehrerer parametrierbarer Objekte enthalten sind. Die oben beschriebenen Algorithmen (begonnen beim Matched Filter) konnten somit auf ihre Funktionalität in Echtzeit überprüft werden.

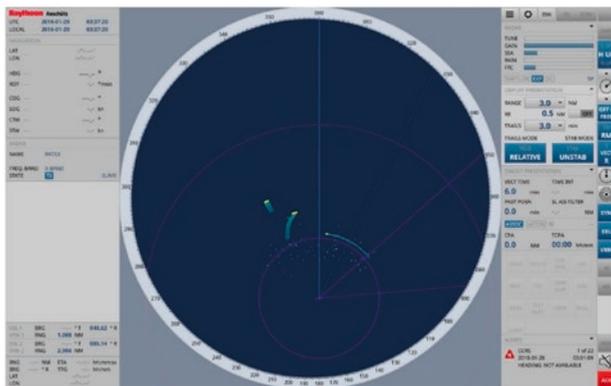


Abb. 12: Radar HMI mit Bildern aus dem MareSX-Demonstrator bei angeschlossenem Simulator. 3 bewegte Objekte mit Trails sowie Seeclutter sind zu sehen.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein Systemkonzept für ein neuartiges Navigationsradar unter Integration einer kombinierten X- und S-Band-Antenne erstellt. Daraus abgeleitet wurden die einzelnen Hardware- und Software-Komponenten entweder nach Marktrecherche beschafft oder selbst entwickelt. Hierbei ist ein Gesamtsystem entstanden, deren Einzelteile den Anforderungen genügen. Eine Demonstration als Live-System war aufgrund der Probleme mit den ausgewählten AD & DA-Karten nicht möglich, da diese nicht in der Lage waren, die Signale kohärent zu verarbeiten bzw. auszugeben. Durch Nutzung eines Simulators und anderer Messmittel konnten aber die übrigen Komponenten geprüft werden und somit konnte auch die prinzipielle Nutzbarkeit gezeigt werden.

AUSBLICK

Der erstellte Demonstrator wäre, sofern das Problem mit den ADCs und DACs gelöst wäre, bereit für eine Inbetriebnahme und dann einen Livetest. Aufgrund der budgetbedingten Reduktion der Performance-Parameter wie Sendeleistung und Winkelauflösung können aber keine übertriebenen Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Demonstrators im Vergleich zu einem aktuellen marktfähigen Navigationsradar gestellt werden. Um dies zu ändern, könnte die Struktur für eine bessere Skalierbarkeit erweitert werden, um eine höhere Kanalzahl und damit eine erhöhte Performance realisieren zu können. Dies würde dann eine bessere Vergleichbarkeit mit aktuellen Navigationsradar-Systemen ermöglichen und es erlauben, die Vorteile des Konzepts nachzuweisen. Durch eine solche Erweiterung wäre auch ein 2D-Beamforming denkbar, welches es erlauben würde, Schiffsbewegungen auszugleichen und damit Clutter besser zu unterdrücken und letztlich eine höhere Detektionswahrscheinlichkeit bei gleicher Falschalarmrate zu erreichen.

Viele der entwickelten Arbeitspakete können direkt oder mit marginalen Änderungen auch in ein System mit deutlich mehr Antennenelementen portiert werden. Zusätzlich kann die entwickelte Software als Basis für ein „normales“ – mit sich drehender Antenne betriebenes – Puls-Doppler-Radar benutzt werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren sprechen im Namen der MareSX-Projektpartner ihren Dank für die Förderung des Projektes durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aus. Ebenso gilt dem Projektträger Jülich unser Dank für die gute administrative Betreuung von MareSX.

LITERATUR

- [1] N. Hansen, J.-P. Mohncke, S. Radziewiczski und A. F. Jacob, «Concept for a Navigational Phased Array Radar,» Krakow, Polen, 2016, pp. 1-3.
- [2] N. Hansen, J.-P. Mohncke, S. Radziewiczski und A. F. Jacob, «A Compensated Dual-Band SPDT Switch for Radar Duplexers at S- and X-Band,» London, England, 2016, pp. 699-702.
- [3] N. Hansen, J.-P. Mohncke, S. Radziewiczski und A. F. Jacob, «A Compact Ultra-Wideband Microstrip Transition,» Honolulu, USA, 2017, pp. 727-729.
- [4] S. Radziewiczski, N. Hansen, J.-P. Mohncke und A. F. Jacob, «X-Band Antenna Module for Advanced Navigational Phased Array Radar,» Nürnberg, Deutschland, 2017, pp. 401-404.
- [5] S. Radziewiczski, N. Hansen, J.-P. Mohncke und A. F. Jacob, «Dual-Polarized Dual-Frequency Antenna Module for a Maritime Phased Array Radar,» Freiburg, Deutschland, 2018, pp. 25-28.
- [6] N. Hansen, W. M. Gitzel, S. Radziewiczski, J.-P. Mohncke und A. F. Jacob, «A Multilayer Dual-Band Filter using Dual-Mode Resonators with Second Harmonic Suppression,» Posen, Polen, 2018, pp. 473-476.
- [7] N. Hansen, S. Radziewiczski, J.-P. Mohncke und A. F. Jacob, «A Low Cost Dual-Band Transmit-Receive Module for a Commercial Maritime Radar with Digital Beamforming,» Bd. 69, Posen, Polen, 2018, pp. 527-530.

HERMES – WEITERENTWICKLUNG DER HARMONISCH-ERREGTE-ROLL- SCHWINGUNG-METHODE ZUR BESTIMMUNG DER ROLLDÄMP- FUNG UND DER PROPULSIONSLAUFUNG VON ROLLENDEN SCHIFFEN MIT UND OHNE DÄMPFUNGSTANKS ZUR OPTIMIERUNG DER SCHIFFSBETRIEBSKOSTEN UND SCHIFFS- SICHERHEIT

FÖRDERKENNZEICHEN 033X413

DIPL.-ING. BASTIAN MARQUARDT	HOPPE Bordmesstechnik-GmbH (Hamburg)
DIPL.-ING. ARNDT SCHUMACHER	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH
M. SC. PATRICK SUMISLAWSKI	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie
PROF.DR.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSOU	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie

EINLEITUNG

Für die Schifffahrt hat die Sicherheit von Crew, Schiff und Ladung oberste Priorität, und um diese zu erhöhen, arbeiten Mitglieder der IMO bereits seit einigen Jahren an der zweiten Generation von Intakstabilitätskriterien. Die numerische und experimentelle Bestimmung der Rolldämpfung spielt dabei eine wesentliche Rolle, um Kriterien zur Verhinderung von parametrischem Rollen und zur Reduzierung großer Rollbeschleunigungen durch überhöhte Stabilität zu entwickeln.

Eine bevorzugte Methode zur Erhöhung der Rolldämpfung ist die Anbringung von Schlingerkielen an der Schiffsaußenhaut, jedoch tragen diese zu einer Erhöhung des Schiffswiderstands bei. Ein Rolldämpfungstank bietet eine effiziente und wirksame Alternative, die zu einer signifikanten Reduzierung der Rollbewegung führen kann. Passive Rolldämpfungssysteme wie der FLUME®-Tank sind in der Schifffahrt etablierte Systeme, um die Rolldämpfung von Seeschiffen zu erhöhen. Da sich der Tank im Inneren des Schiffes befindet, erhöht er im Gegensatz zu Schlingerkielen oder Dämpfungsflossen nicht den Schiffswiderstand. Da die Tanksysteme passive Systeme sind, bedarf es keiner zusätzlichen Energie – es handelt sich um eine umweltfreundliche und kostengünstige Methode, starke Rollbewegungen zu vermeiden.

In den folgenden Kapiteln werden die im Forschungsvorhaben erzielten Weiterentwicklungen der eingesetzten numerischen und experimentellen Verfahren vorgestellt. Zum einen wird gezeigt, dass mittels einer automatisierten Versuchsdurchführung der „harmonisch erregte Rollschwingung-Methode“ (HERM) eine effiziente Bestimmung von Rolldämpfungs-

koeffizienten möglich ist, welche besonders in der Potenzialtheorie basierenden Verfahren eingesetzt werden. Zum anderen wird ein entwickelter Prüfstand für detaillierte Untersuchungen des Rolldämpfungstanks vorgestellt. Des Weiteren wird der Einsatz von CFD für eine optimierte Anwendung der HERM sowie für die Simulation der Strömung innerhalb von Rolldämpfungstanks vorgestellt. Die mögliche Treibstoffreduzierung sowie die Steigerung der tatsächlichen Ladungskapazität werden anhand einer Wirtschaftlichkeitsanalyse verdeutlicht.

VERSUCHSTECHNISCHE WEITERENTWICKLUNG DER HERM

Ein Schwerpunkt der HSVA bestand in der Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung der harmonisch-erregte-Rollschwingung-Methode, um eine Vielzahl genauer und reproduzierbarer Daten für die Validierung von numerischen Verfahren und für die Forschungsarbeiten im Vorhaben bereitzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein automatisierter Versuchsablauf in Kombination mit einer optimierten Rollerregungsanlage zur versuchstechnischen Ermittlung von Rolldämpfungskoeffizienten von Schiffen entwickelt.

Für die Forschungsarbeiten war ein zeitgemäßes 9000 TEU Containerschiff mit verschiedenen großen Schlingerkielen und einem FLUME®-Rolldämpfungstank entworfen worden. Das Schiff wird als Hamburg Container Ship (HCS) bezeichnet und hat folgende Hauptabmessungen: $L_{pp} = 312.72$ m, $B_{WL} = 48.2$ m, $T_{Design} = 13$ m, $C_{B,Design} = 0.635$.

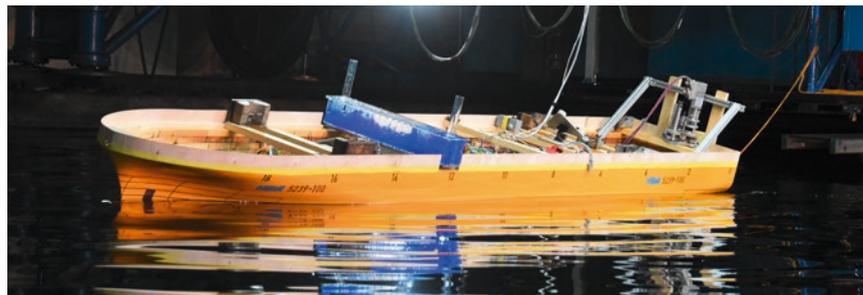


Abb. 1: HERM-Versuch mit dem Hamburg Container Ship Modell, ausgestattet mit einem FLUME®-Rolldämpfungstank

Bei der HERM wird das Schiffsmodell im Glattwasser mit einem harmonischen Erregungsmoment und einer Periode ähnlich der Schiffseigenperiode zum Rollen angeregt. Aus bekanntem Moment und sich einstellendem Rollwinkel wird die Rolldämpfung für die untersuchte Schiffsgeschwindigkeit bestimmt. Die Rolldämpfung wird für verschiedene Rollwinkel gemessen und zu Rolldämpfungskurven zusammengeführt, welche besonders in potenzialtheoretischen Seegangsprogrammen Anwendung finden.

Die optimierte Rollerregungsanlage muss Erregungsmoment und -periode stufenlos regeln können. Neben dem vorgegebenen Rollerregungsmoment dürfen keine Störmomente/-kräfte erzeugt werden. Die bisher verwendete Anlage, welche das Moment durch kontrastierende Gewichte erzeugt, genügte diesen Anforderungen nicht. Deshalb wurden alter-

native Momentenerregungsprinzipien untersucht und schlussendlich eine Gyroskopanlage konstruiert, welche mittels des Kreiseffekts ein reines Rollerregungsmoment erzeugt.

Die entwickelte Gyroskopanlage besteht aus zwei Kreisel, siehe Abb. 2. Um das Erregungsmoment um die Längsachse des Schiffsmodells zu erzeugen und die entstehenden Giermomente zu eliminieren, müssen sowohl Drehrichtung (gelbe Pfeile) als auch Kippbewegung (blaue Pfeile) der beiden Kreisel gegenläufig gesteuert werden.

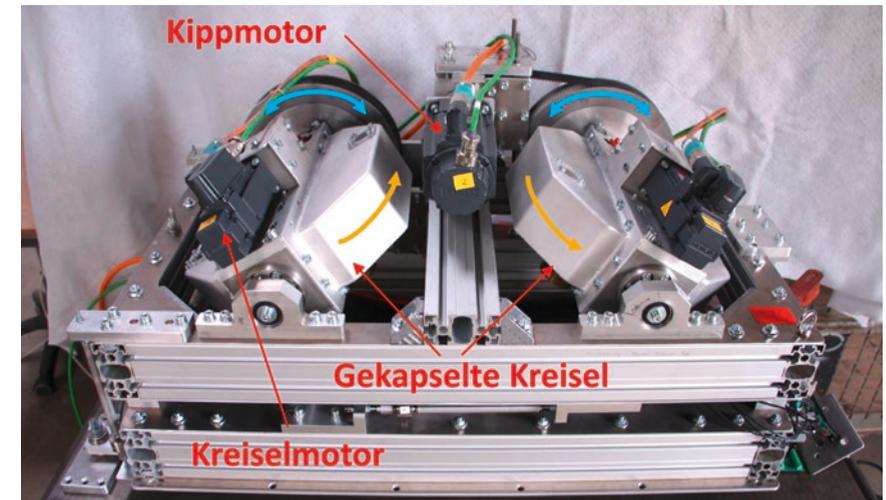


Abb. 2: Entwickelte Gyroskopanlage zum Aufbringen von Rollmomenten

Um den Versuchsablauf zu automatisieren, wurde eine Echtzeit-Auswertungsmethode in Zusammenarbeit mit der TUHH entwickelt. Während des Versuchs erfasst eine MATLAB-Routine die Messdaten, analysiert diese und stellt das nächste Erregungsmoment ein, sobald ein stationärer Zustand erreicht wurde. Ein stationärer Zustand wird erkannt, wenn die Abweichungen der Rollamplitude, Rolldämpfung, Rollperiode, Phasenlage und mittleren Modellgeschwindigkeit eine vorgegebene Toleranz unterschreiten.

Für einen typischen HERM-Versuch zeigt Abb. 3 die Verläufe von Erregungsmoment, Rollwinkel, Rolldämpfung und berechneter Toleranz. Auf einer Versuchsfahrt werden drei Erregungsmomente aufgebracht und somit drei Rolldämpfungswerte ermittelt. Dabei sinkt die Toleranz jeweils unter den vorgegebenen Grenzwert von 1.5%, wobei sich die Rolldämpfung einem stabilen Wert annähert.

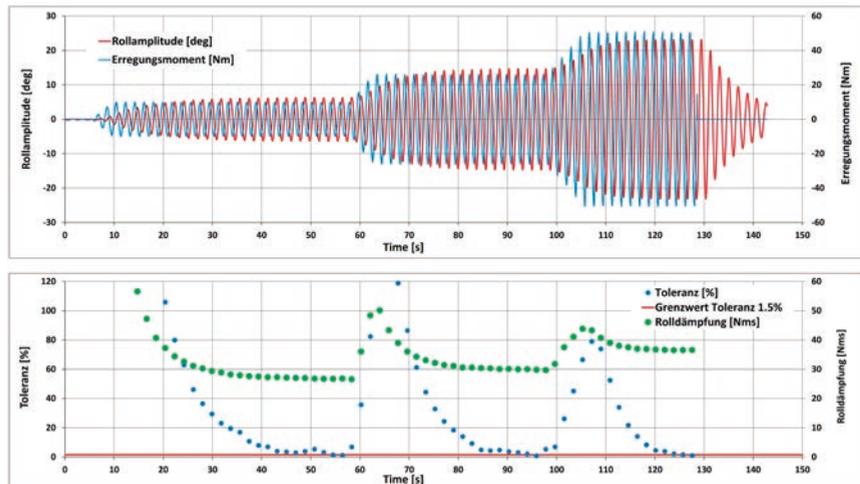


Abb. 3: HERM-Versuch bei 1.498 m/s Modellgeschwindigkeit. Erregungsmomenten- und Rollwinkelverlauf (oben) sowie erhaltene Rolldämpfung und berechnete Toleranz (unten)

Ausgiebige Erprobungen der neuen HERM zeigten, dass die Reproduzierbarkeit der Rolldämpfungswerte sehr gut ist. Diese Genauigkeit können Rollausschwingversuche, welche standardmäßig zur Bestimmung der Rolldämpfung durchgeführt werden, gewöhnlich nicht erreichen. Die ermittelte Rolldämpfung streut, und außerdem liefern Ausschwingversuche bei großen Rollamplituden nur sehr wenige oder keine Ergebnisse, siehe Abb. 4. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass beim Einsatz der weiterentwickelten Methode die erforderliche Versuchszeit nur noch 25% gegenüber der früher angewandten Technik beträgt.

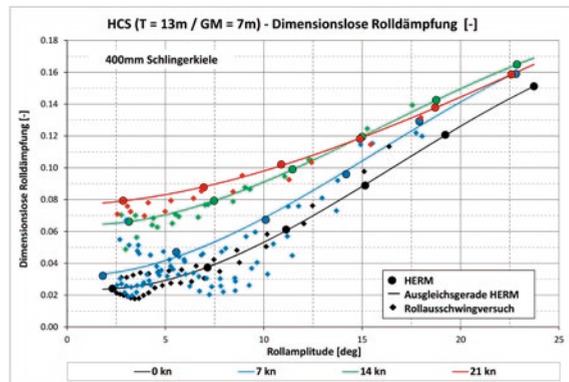


Abb. 4: Vergleich der dimensionslosen Rolldämpfung aus HERM-Versuchen und Rollausschwingversuchen für verschiedene Geschwindigkeiten.

Neben der Erzeugung von harmonischen Erregungsmomenten kann die Gyroskopanlage unregelmäßige Rollerregungsmomentenverläufe erzeugen, vergleichbar mit den Wellenerregungsmomenten, die in natürlichem Seegang auftreten. Dies ermöglicht einen einfachen und reproduzierbaren Vergleich, sowie die Optimierung verschiedener Rolldämpfungsvorrichtungen bei demselben zeitlichen Erregungsmomentenverlauf, wie in Abb. 5 dargestellt.

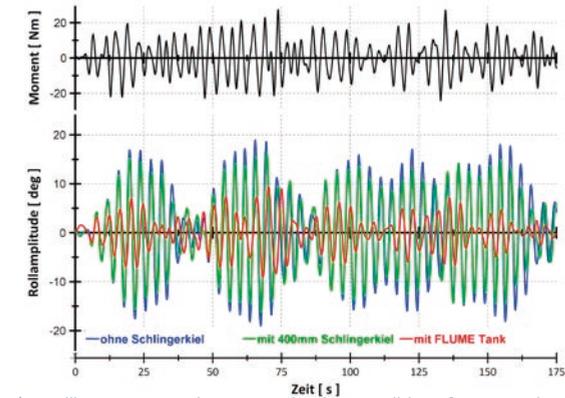


Abb. 5: Vergleich der Rollbewegungen, die mit verschiedenen Rolldämpfungsvorrichtungen (Schlingerkiel, FLUME®-Tank) bei demselben unregelmäßigen Erregungsmoment erreicht wurden (Modellwerte)

ANWENDUNG VON VERSUCHSTECHNISCH ERMITTELTEN ROLLDÄMPFUNGSKOEFFIZIENTEN IN POTENZIALTHEORETISCHEN SEEGANGSPROGRAMMEN

Für die umfassende Analyse des Bewegungsverhaltens eines Schiffsentwurfs in einer Vielzahl von Seegangszuständen sind Modellversuche aus Kostengründen oft keine Option. Deshalb wird häufig eine Kombination aus numerischen Berechnungsmethoden und ausgewählten Modellversuchen angewandt.

Auch wenn die auf RANS basierenden Feldmethoden erheblich weiterentwickelt wurden, verhindert der hohe Rechenaufwand den Einsatz für die Langzeitsimulation von Schiffsbewegungen in unregelmäßigen Seegängen. Deshalb werden weiterhin schnelle potenzialtheoretische Berechnungsmethoden für diese Untersuchungen verwendet.

Um die sicherheits- und komfortrelevante Rollbewegung von Schiffen mit Potenzialmethoden quantitativ zuverlässig berechnen zu können, muss das Rolldämpfungsverhalten so genau wie möglich bekannt sein, weil diese Methoden die dominierenden viskosen Dämpfungsanteile nicht erfassen.

Auf diesem Hintergrund bestand ein weiterer Arbeitspunkt der HSVA darin, die mit potenzialtheoretischen Seegangsprogrammen berechneten Rollbewegungen anhand von Messergebnissen von Seegangsversuchen zu überprüfen. Dabei wurden die mit der HERM bestimmten Rolldämpfungskurven in den Programmen verwendet.

Eine große Anzahl von HERM-Versuchen wurde mit einem HCS-Modell im Maßstab 52 mit verschiedenen Schlingerkielhöhen sowie mit und ohne Rolldämpfungstank durchgeführt, siehe Abb. 1. In Abb. 6 sind Rolldämpfungskurven für verschiedene Geschwindigkeiten und metazentrische Höhen von 2 m und 7 m ohne und mit Schlingerkiel dargestellt. Die Kurven zeigen deutlich, wie unterschiedlich das Rolldämpfungsverhalten eines Schiffes bei gleichem Tiefgang, aber verschiedenen metazentrischen Höhen sein kann.

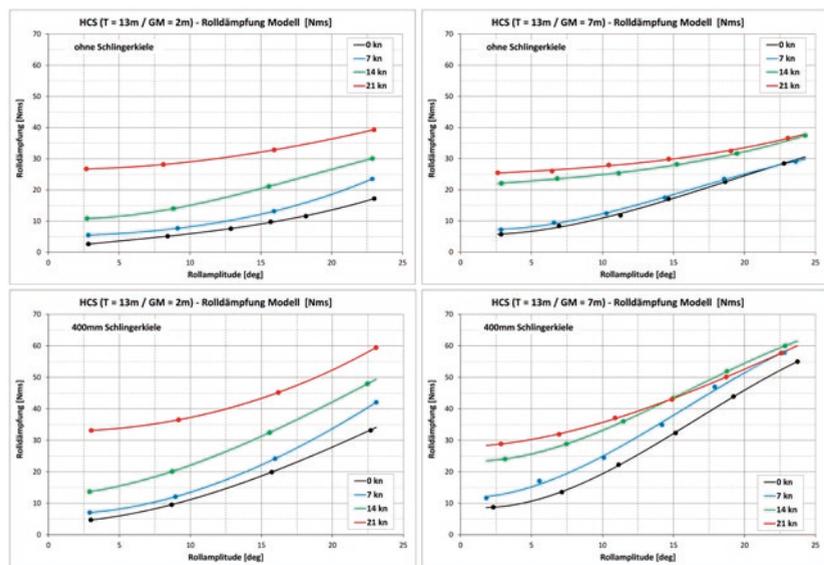


Abb. 6: Rolldämpfung (Modellwerte) als Funktion des Rollwinkels für das HCS bei 0, 7, 14 und 21 Knoten, ohne Schlingerkiel (oben) und mit 400 mm Schlingerkiel (unten) sowie bei einem GM von 2 m (links) und 7 m (rechts)

Parametrisches und welleninduziertes Rollen wurde bei Seegangsversuchen mit dem HCS-Modell untersucht. Diese Zustände wurden mit der Streifenmethode UTSTRIP im Frequenzbereich und dem Programm ROLF, welches die Rollbewegung nichtlinear im Zeitbereich modelliert, simuliert. Die berechneten statistischen Größen und Zeitverläufe der Rollbewegungen zeigen gute bis sehr gute Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen. In Abb. 7 (unten) ist exemplarisch der berechnete und gemessene Zeitverlauf der Rollbewegung eines Versuchs in unregelmäßiger See abgebildet. Das obere Diagramm in Abb. 7 zeigt die berechnete Rollbewegung, wenn die verwendeten Rolldämpfungskurven mit der immer noch häufig angewandten halbempirischen Methode von Ikeda [1] bestimmt werden. Dieser Vergleich zeigt, dass die Ikeda-Methode die Rolldämpfung für das HCS bei dem GM von 7 m bei weitem überschätzt und sie daher nicht für die quantitative Analyse des Rollverhaltens verwendet werden sollte.

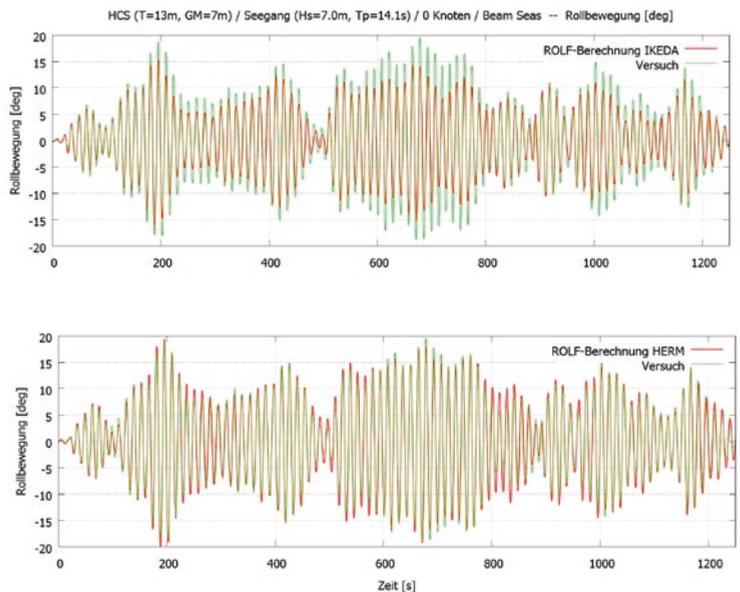


Abb. 7: Seegangsversuch quer zur See ohne Vorausfahrt - Vergleich des Zeitverlaufs der Rollbewegung zwischen Messung und Simulationen unter Berücksichtigung der HERM Rolldämpfung (unten) sowie der IKEDA Rolldämpfung (oben)

MASSGEBLICHE WEITERENTWICKLUNG DER VERSUCHSTECHNIK ZUR UNTERSUCHUNG VON ROLLDÄMPFUNGSTANKS

Hoppe hat im Zuge des Forschungsprojekts einen Hexapod angeschafft und ein komplett neues Messlabor eingerichtet, siehe Abb. 8. Mit dieser neuen Messtechnik ist es möglich, Versuche durchzuführen, bei denen der Einfluss von irregulären Bewegungen und überlagerten Bewegungen in anderen Freiheitsgraden als Rollen untersucht wird.

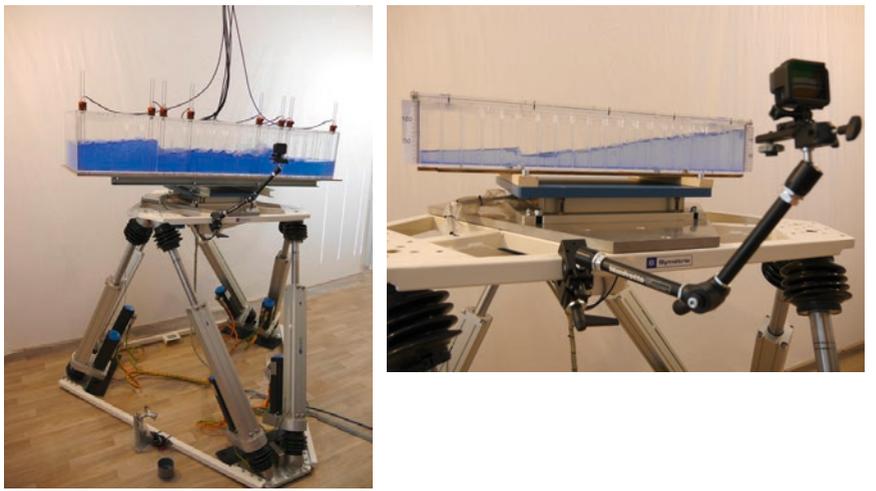


Abb. 8: HERMES Tankmodell auf dem Hexapod im Maßstab 1:26 (links) und 1:52 (rechts)

In weiteren Untersuchungen wurde der Tank in drei verschiedenen Maßstäben getestet, um zu prüfen, inwieweit die Ähnlichkeitsgesetze nach Froude bei diesen Versuchen ihre Gültigkeit haben oder ob ihre Anwendung zu signifikanten Fehlern bei der Bewertung des Tankverhaltens führt. Genauso wurde das ursprüngliche Design des eigens für das Projektschiff entworfenen Tanks durch Variation der inneren Tankeinbauten und Versperrungen verändert und untersucht. Damit konnte bewertet werden, inwieweit bei einer gegebenen Grundabmessung durch Anpassung der Tankinneneinbauten der Tank auf einen bestimmten Betriebspunkt hin weiter optimiert werden kann. Verschiedene getestete Konfigurationen sind in Abb. 9 dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen dabei den Phasenversatz zwischen der Tankwasserbewegung und der Erregung durch die Schiffsbewegung. Die durchgezogenen Linien stellen die Amplitude des Tankmoments bei verschiedenen harmonischen Erregungsfrequenzen dar. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass durch geschickte Variation der Tankinneneinbauten der Tank auf andere Bedürfnisse angepasst werden kann, ohne die Grundabmessungen im Schiff verändern zu müssen.

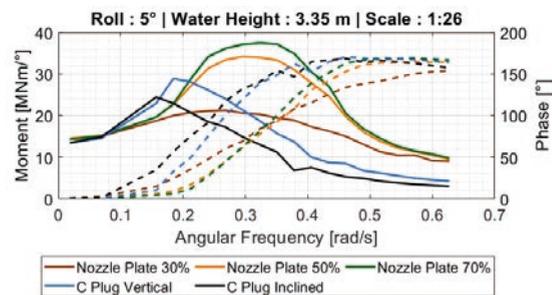


Abb. 9: Momenten- und Phasenverläufe des FLUME®-Tanks für verschiedene innere Versperrungen

Außerdem konnte im Zuge des Forschungsprojekts ein neues Messverfahren entwickelt werden. Im Gegensatz zum bisherigen Verfahren, bei dem die Wasserkräfte indirekt über Kraftmessensoren unterhalb des Tanks ermittelt werden, wird das Tankverhalten aus der Wasserstandserhebung an über den Tank gleichmäßig verteilten Punkten ermittelt. Der Vorteil dieses Messverfahrens wird darin gesehen, dass es auch an Bord realisiert und somit das Tankverhalten auch in der Großausführung gemessen werden kann. Es ist durchaus denkbar, dass im Anschluss an das Projekt ein ähnliches Messverfahren an Bord eines Schiffes zur Erprobung eingesetzt wird.

EFFIZIENTE BESTIMMUNG DER ROLLDÄMPFUNG MITTELS NUMERISCHER SIMULATION VON HERM-VERSUCHEN

Neben der experimentellen Bestimmung der Rolldämpfung ist der Einsatz von effizienten numerischen Verfahren besonders wichtig, um die Rolldämpfung sowie den durch Rollen verursachten Zusatzwiderstand von komplexen und modernen Schiffsgeometrien zu ermitteln. Im Entwurfsstadium von Rolldämpfungssystemen ist dies von zentraler Bedeutung, um kostenintensive Modellversuche zu vermeiden. Durch den Einsatz der modernen Methode der Overset-Technik für Gitterbewegungen können sehr große Rollamplituden ($>20^\circ$) bei stets akzeptablem Rechenaufwand untersucht werden.

Die Rollbewegung eines Schiffes kann mittels eines linearen Feder-Masse-Dämpfer-Systems idealisiert werden. Konfigurationen mit geringer Dämpfung weisen bei harmonischer Anregung teils erhebliche Einschwingzeiten auf. Mittels zusätzlich eingeführter künstlicher Rolldämpfung kann dieser Einschwingprozess deutlich verkürzt werden, um kostbare Rechenzeit einzusparen.

Die zunehmende Bedeutung von umweltpolitischen Aspekten rückt neben der Rolldämpfung die Zunahme des Schiffswiderstandes auf Grund von Schlingerkielen und Rollbewegungen in den Vordergrund. Die heutige Genauigkeit der Berechnungsmethoden ermöglicht eine zuverlässige Widerstandsprognose auch für die Großausführung.

Angewandtes Berechnungsverfahren

An der Technischen Universität Hamburg wird für die Simulation der Schiffsbewegungen die Simulationssoftware starCCM+ von CD-adapco verwendet. Es handelt sich dabei um ein auf Finite-Volumen basierendes RANS-Verfahren. Zur Lösung der 2-Phasenströmung ist das VOF-Modell implementiert. Ein nicht unerheblicher Anteil der Rolldämpfung wird durch viskose und turbulente Effekte verursacht, welche mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell von Menter modelliert werden. Die Realisierung von Gitterbewegungen erfolgt mithilfe überlappender Gitter. Dabei bewegt sich ein an das Schiff angepasstes Rechengitter mit der Starrkörperbewegung des Schiffes in allen 6 Freiheitsgraden mit. Hinzu kommt ein Hintergrundgitter, welches der Längs-, Quer- und Gierbewegungen des Schiffes in horizontaler Ebene folgt. In Abb. 10 ist das Berechnungsgebiet mit der freien Wasseroberfläche während einer HERM-Simulation abgebildet. Zudem können die Detailansichten des Berechnungsgitters betrachtet werden, siehe Abb. 11.

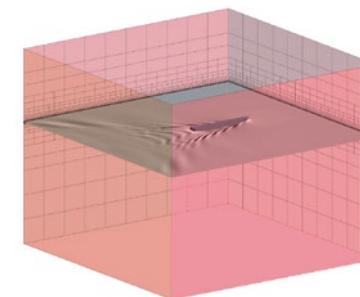


Abb. 10: Ansicht der gesamten Berechnungsdomain

Des Weiteren wird die Ruderbewegung mithilfe eines gleitenden Gitters ermöglicht, wodurch insgesamt drei miteinander gekoppelte Berechnungsgitter vorhanden sind. Deren Zusammenwirken ist in Abb. 12 verdeutlicht. Das Ruder wird wie in den Modellversuchen zum Kurshalten verwendet. Eine Untersuchung des Einflusses der Rudersteuerung bei HERM-Versuchen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens von Sumislawski et al. durchgeführt [4].

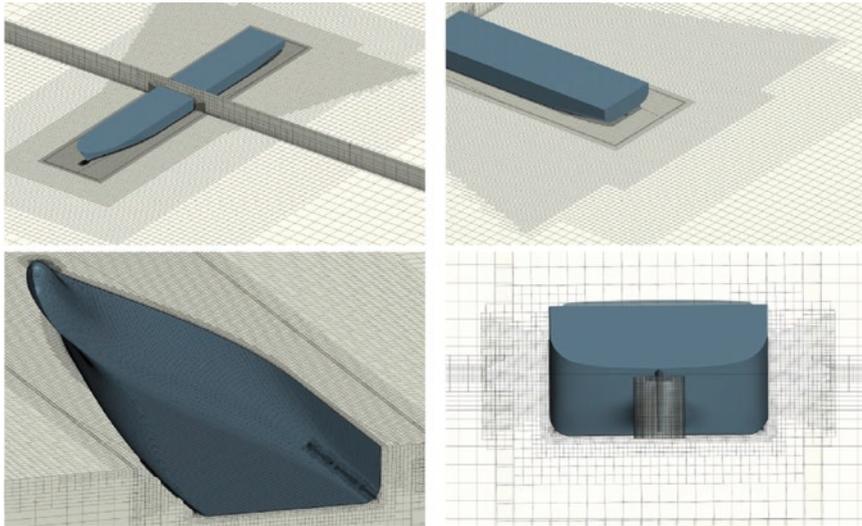


Abb. 11: Detailansichten des Berechnungsgitters

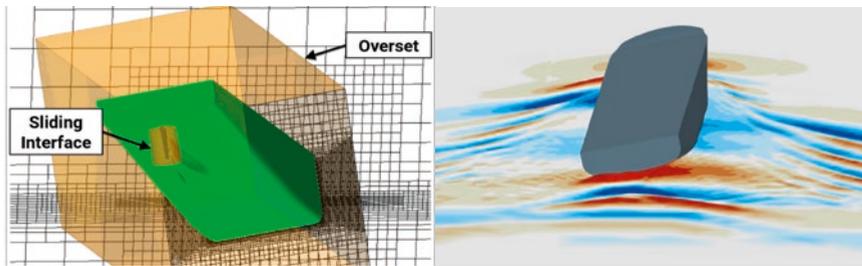


Abb. 12: Beschreibung der Gitterbewegunge

Abb. 13 das HCS-Modell während einer HERM-Simulation mit instationärem Wellenbild.

Im Allgemeinen wird mit dem CFD-basierten Einsatz der HERM eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit durchgeführten Modellversuchen (EFD, Experiment) erzielt. Dies gilt sowohl für Nullfahrt als auch für Vorfahrt. Der Vergleich der numerischen Berechnungen mit dem experimentell ermittelten schiffbaulichen Dämpfungsverhältnis φ_h/φ_a verdeutlicht diesen Zusammenhang für eine Froude-Zahl von 0,195, siehe Abb. 14.

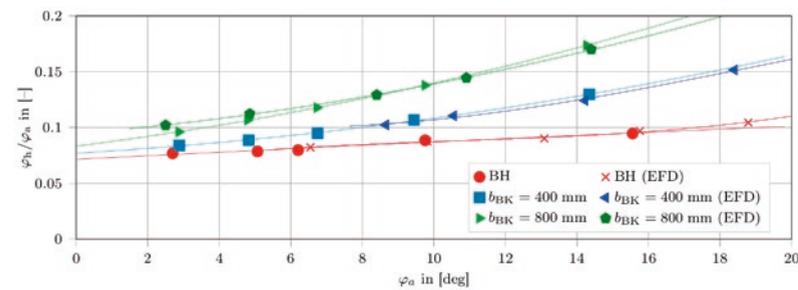


Abb. 14: Dämpfungsverhältnis für reinen Schiffsrumpf (BH) und zwei unterschiedlich hohe Schlingerkeile (HCS Modell 1:52, CFD und EFD, Fr=0,195)

Darüber hinaus wurde an der Technischen Universität Hamburg der numerische Ansatz für detailliertere Untersuchungen hinsichtlich der Maßstabseffekten im Hinblick auf die Rolldämpfung bei großen Modellmaßstäben verwendet. Neben den Modellversuchen, die in zwei unterschiedlichen Maßstäben (52 und 90) durchgeführt wurden, kamen CFD-Berechnungen zur Verifizierung zum Einsatz. Zusätzlich sind HERM-Simulationen für die Großausführung in Abb. 15 dargestellt. Im Fall des HCS ist zu erkennen, dass Maßstabseffekte bezüglich der Rolldämpfung vernachlässigbar sind, denn selbst für den sehr großen Maßstab von 1: 90 ist kein nennenswerter Unterschied zur Großausführung feststellbar.

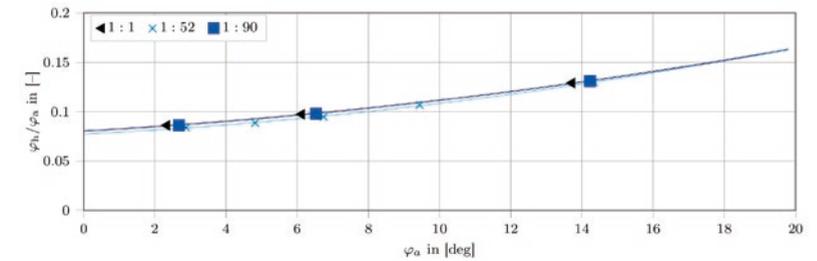


Abb. 15: Rolldämpfungsverhältnis für verschiedene Maßstäbe (CFD, HCS, Fr=0,195, b_{BK}=400mm)

Beschleunigte HERM

Zur Einsparung von Versuchs- und Simulationszeit wurde an der Technischen Universität Hamburg eine beschleunigte HERM entwickelt. Der Einschwingvorgang von harmonisch angeregten Rollbewegungen bestimmt den Simulationsaufwand maßgeblich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Rollbewegung sehr schwach gedämpft ist, siehe Abb. 16. Durch das Erhöhen des Dämpfungsverhältnisses von 0,1 auf 0,7 wird der Einschwingvorgang beträchtlich verkürzt, sodass die maximale Rollamplitude praktisch schon nach einer Schwingung erreicht wird.

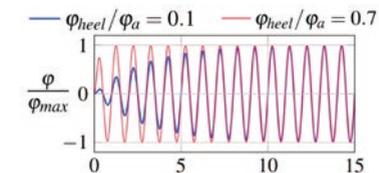


Abb. 16: Einschwingvorgänge unterschiedlich gedämpfter Feder-Masse-Dämpfer-Systeme

Ausgehend von der Bewegungsgleichung eines Ein-Massen-Schwingers kann das Erregermoment $M_{E,\varphi}(t)$ für eine bestimmte Rollamplitude wie folgt beschrieben werden:

$$M_\varphi \ddot{\varphi} + N_\varphi \dot{\varphi} + S_\varphi \varphi = M_{E,\varphi}(t). \quad (1)$$

Mit der Rollbewegung φ , dem Massenträgheitsmoment M_φ , der Rolldämpfung N_φ sowie dem hydrostatischen Rückstellkoeffizienten S_φ kann der entwickelte Ansatz zur künstlichen Steige-

zung der Rolldämpfung hergeleitet werden. Hierfür wird die Bewegungsgleichung folgendermaßen modifiziert:

$$M_{\varphi} \ddot{\varphi} + (N_{\varphi} + N_{\varphi, \text{AID}}) \dot{\varphi} + S_{\varphi} \varphi = M_{E, \varphi}(t) + M_{E, \varphi, \text{AID}}(t). \quad (2)$$

Zum einen wird die Dämpfung um einen künstlichen Anteil $N_{\varphi, \text{AID}}$ und zum anderen das Erregermoment um $M_{E, \varphi, \text{AID}}(t)$ erweitert, um die gestiegene Dämpfung zu kompensieren.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass dieses Verfahren im Rahmen der HERM-Versuche sowohl in den numerischen Simulationen als auch bei den Modellversuchen ohne Verlust an Genauigkeit angewendet werden kann. Ein Einsparpotenzial an Versuchszeit von bis zu 80% wurde erreicht. Das detaillierte Verfahren wurde von Wassermann et al. beschrieben und validiert [5], [6].

Vergleich des Zusatzwiderstandes durch Schlingerkiele bei moderaten Rollbewegungen

Eine zentrale Fragestellung des Verbundvorhabens war, welchen Einfluss Schlingerkiele auf den Schiffswiderstand bei moderaten Rollwinkeln haben und inwieweit die Möglichkeit zur Leistungseinsparung von bei gleichzeitiger Verkleinerung des Schlingerkiels oder Verzicht auf einen solchen besteht. Abb. 17 zeigt den mit CFD berechneten Schleppwiderstand für 21 Knoten in Glattwasser ohne und mit harmonischer Anregung. Eine starke Zunahme des Widerstands mit steigender Rollamplitude ist erkennbar. Vor allem nimmt der Zusatzwiderstand auf Grund von Schlingerkielen bei großen Rollamplituden deutlich zu.

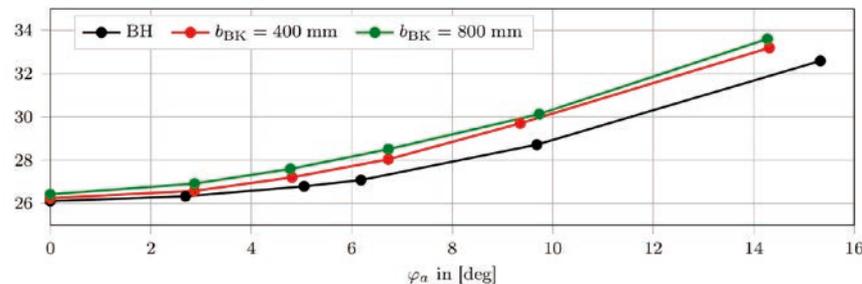


Abb. 17: Schleppwiderstand für verschiedene Schlingerkiele (CFD, HCS Modell 1:52)

Etablierung numerischer Methoden zur Berechnung des Rolldämpfungstanks

Im FLUME®-Tank kommt es zu „sloshing“-Effekten, die man ansonsten in Tanks gern vermeidet. Dadurch entstehen Luftpneumatische Einschlüsse im Wasserbereich und eine starke Durchmischung von Wasser mit Luft. Bei numerischen RANS-Methoden kann das dazu führen, dass die Wasserphase kontinuierlich Luftphase „aufnimmt“. Der sich einstellende Effekt bewirkt, dass im Prinzip die Dichte des Wassers bei gleichzeitiger Zunahme des Volumens sinkt. Wenn dies in großem Maße geschieht, werden die Simulationsergebnisse unbrauchbar. Durch künstliche Erhöhung der Viskosität in der Wasseroberfläche bzw. Verwendung

von sehr feinen Gittern kann dieses Problem einigermaßen beherrscht werden. Allerdings führt die zusätzliche künstliche Viskosität ebenfalls zu verzerrten Ergebnissen und ein zu feines Gitter zu unrealistisch langen Rechenzeiten für industrielle Anwendungen.

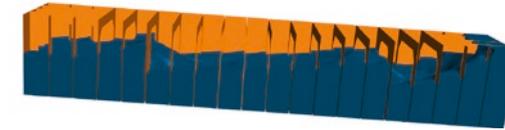


Abb. 18: RANSE CFD Simulation von Sloshinglasten in einem FLUME®-Rolldämpfungstank

Es wurde deshalb intensiv untersucht, mit welchen Einstellungsparametern in RANS-Methoden sich solche „sloshing“-Effekte am besten simulieren lassen. Insgesamt konnten für kleine Rollamplituden sehr gute Ergebnisse erzielt werden, für größere Amplituden immerhin noch zufriedenstellende. In Abb. 18 ist eine solche Simulation eines FLUME®-Tanks dargestellt, Abb. 19 zeigt exemplarisch den Vergleich der Ergebnisse von Simulation und Modellversuch.

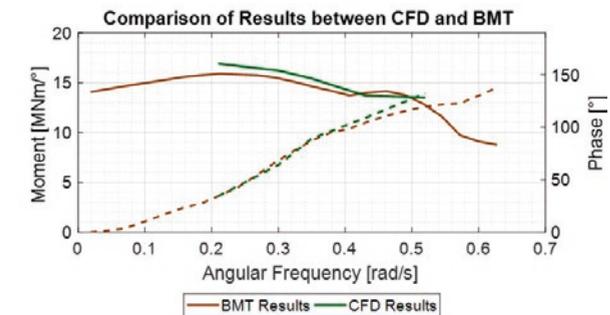


Abb. 19: Vergleich der Mess- und Rechenergebnisse für das durch den FLUME®-Tank (Moment: Durchgehende Linien, Phase: gestrichelte Linien)

WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE DES FLUME®-TANKS

Der FLUME®-Rolldämpfungstank stellt eine ideale Lösung für die Rolldämpfung von Schiffen dar und verdient daher wesentlich mehr Aufmerksamkeit als ihm aktuell zukommt. Als passiver Schwingungsdämpfer benötigt er im Betrieb keinerlei Energie und kann zudem als einfacher Ballasttank behandelt werden, sodass Installation und Anschaffung kostengünstig sind.

Durch die Reduktion der Rollbewegung des Schiffes um bis zu 60% bietet dieser Tank im Besonderen für moderne Containerschiffe eine Vielzahl von Vorteilen. Wie in der Übersicht in Abb. 20 dargestellt, gibt es eine Reihe von positiven Effekten, die zu einer Effizienzsteigerung und erhöhter Schiffssicherheit führen.

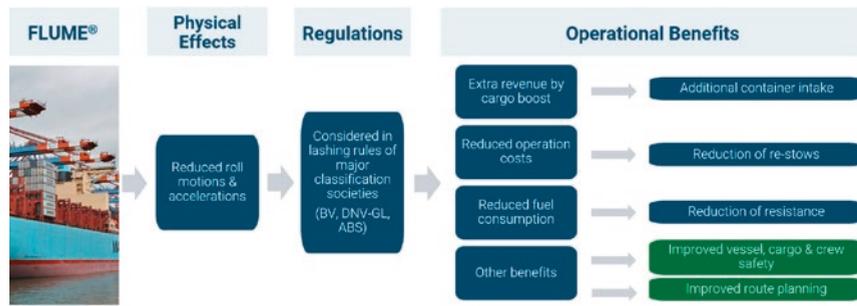


Abb. 20: Schematische Darstellung der Vorteile einer FLUME®-Rolldämpfungstank-Installation auf modernen Containerschiffen

Hierbei kann man zwischen den folgenden Effekten unterscheiden:

- › Erhöhung der Schiffssicherheit
- › Einsparung von Treibstoff durch verminderte Rollbewegung und verbesserte Schiffs-routenplanung
- › Erhöhung der Ladungskapazität durch Reduktion der Laschkkräfte

Während eine Quantifizierung der erhöhten Sicherheit nur sehr schwer möglich ist, konnte Hoppe die anderen Effekte an konkreten Beispielen untersuchen.

Einsparung von Treibstoff durch verminderte Rollbewegung

Um das Kraftstoffeinsparpotenzial eines FLUME®-Tanks zu quantifizieren, müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden: die Rollintensität eines Schiffes bei einem bestimmten Betriebsprofil und die Rollreduzierung, die mit einem FLUME®-Tank für alle vorkommenden Rollszenarien erzielt werden kann.

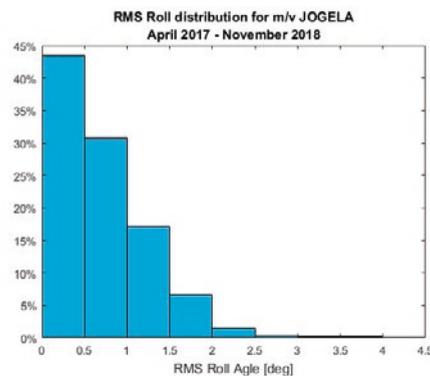


Abb. 21: Statistische Verteilung des Auftretens bestimmter RMS-Rollwinkel der M/V JOGELA

Abb. 21 zeigt die Verteilung der Rollintensität während 1,5 Betriebsjahren des Peter Döhle Schiffes M/V JOGELA. Es ist zu erkennen, dass das Schiff fast täglich einer signifikanten Rollbewegung ausgesetzt ist.

Die möglichen Energieeinsparungen wurden aus den Ergebnissen der HERM-Modelltests für diese Verteilung abgeleitet. Die Multiplikation dieser möglichen Einsparungen mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens der einzelnen definierten Fenster ergibt die Energieeinsparung, die das Schiff bei der Installation eines FLUME®-Tanks erzielen kann. Das Fahrprofil der JOGELA z. B. zeigt eine mögliche Leistungseinsparung von 1,4%. Die für diese Berechnung verwendeten Daten sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Verteilung des Rollwinkels und entsprechende Leistungseinsparungen bei diesen Rollszenarien durch den FLUME®-Tank

RMS	Auftretens-wahrscheinlichkeit	Roll Reduktion	Mögliche Leistungs-einsparungen	Leistungseinsparungen (unter Berücksichtigung des Auftretens)
0.0°-0.5°	43%	0%	0.0%	0.0%
0.5°-1.5°	46%	40%	1.4%	0.9%
1.5°-3.0°	10%	60%	4.0%	0.4%
>3.0°	1%	30%	5.1%	0.1%
Durchschnittliche Einsparung				1.4%

Effizienzsteigerung durch Aufnahme zusätzlicher Ladung

Aufgrund der verminderten Rollbewegungen und Beschleunigungen sind die Kräfte, die auf die Container einwirken, geringer. Damit wird die Gefahr von Containerverlusten reduziert, und die Sicherheit des Schiffes für Besatzung, Ladung und Umwelt erhöht sich.

Zudem ist es möglich, bei Einhaltung des aktuell von den Klassifikationsgesellschaften vorgeschriebenen Sicherheitslevels mehr Ladung aufzunehmen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde deshalb untersucht, welcher zusätzliche Profit mit einem Schiff durch Ladungszunahme erzielt werden kann. Hierzu wurde eine Ladungsrechnersoftware so modifiziert, dass der FLUME®-Tank darin berücksichtigt wird. Es wurde für ein 9.000TEU und ein 17.000TEU Schiffes untersucht, wie viele zusätzliche Container für den Fall aufgenommen werden können, dass der FLUME®-Tank die Rollbeschleunigung um 15% bzw. 30% reduziert. Abb. 22 zeigt exemplarisch für eine Mittschiffs-Bay des 17.000TEU Schiffes die zusätzlichen leeren 40-Fuß Container, die gestaut werden können, wenn die Beschleunigungen durch den FLUME®-Tank lediglich um 15% reduziert werden.

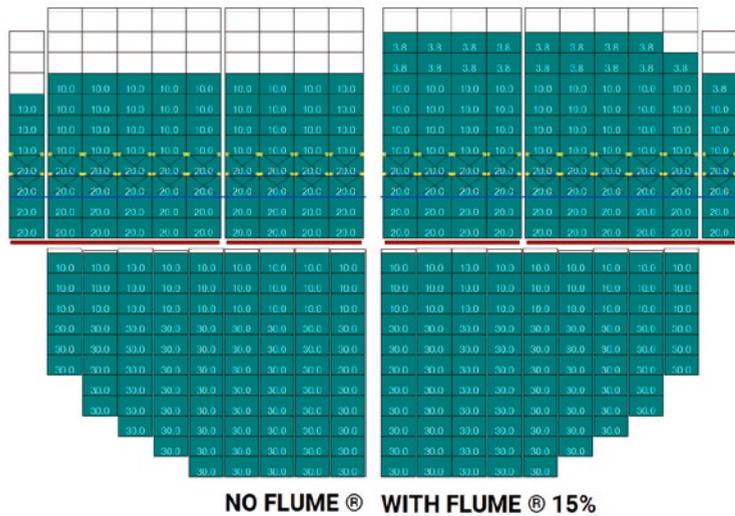


Abb. 22: Darstellung einer Mitschiffssektion im Ladungsrechner eines 17000 TEU Containerschiffes, beladen bis zur maximal zulässigen Laschkraftgrenze mit und ohne Berücksichtigung des FLUME®-Tanks

Bei einem typischen Routenprofil Europa-Asien ergibt sich unter der Annahme, dass dreimal jährlich zusätzliche Container zur Verfügung stehen, für das 17.000 TEU Containerschiff ein zusätzlicher Gewinn von über 2 Mio. Euro jährlich.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellten Auszüge aus dem Forschungsvorhaben HERMes verdeutlichen, dass durch den Einsatz einer verbesserten HERM die versuchstechnische Bestimmung der Roll-dämpfungskoeffizienten hoher Genauigkeit signifikant beschleunigt wird und somit groß angelegte Studien zulässt. Es wurde gezeigt, dass mittels dieser Koeffizienten zuverlässige Prognosen der Rollbewegung in irregulärem Seegang möglich sind, wodurch die Schiffssicherheit bewertet werden kann. Ebenso erzielen CFD-Simulationen übereinstimmende Ergebnisse und erlauben darüber hinaus Großausführungsprognosen. Des Weiteren wurde ein Ansatz vorgestellt, der die Versuchszeit der HERM-Methode deutlich verkürzt. Mit Hilfe eines Hexapod wurde ein FLUME®-Tank isoliert vom Schiff experimentell untersucht. Zusätzlich lieferten ausführliche CFD-Simulationen neue Erkenntnisse zum Dämpfungsverhalten des Rolldämpfungstanks. Am Beispiel eines modifizierten Ladungsrechners wurde gezeigt, dass durch die Reduktion der Rollbeschleunigung aufgrund des FLUME®-Tanks eine Steigerung der Ladungskapazität sowie Treibstoffeinsparungen möglich sind.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens, dem Projektträger Jülich für die stets zuvorkommende und kompetente Betreuung und dem Kooperationspartner Peter Döhle Schifffahrts-KG sowie der Besatzung der MV JOGELA für die Bereitstellung des Schiffes für Langzeitmessungen.

LITERATUR

- [1] Ikeda Y., Himeno Y., Tanaka N., "A Prediction Method for Ship Roll Damping", Report of Department of Naval Architecture No. 00405, University of Osaka Prefecture, 1978
- [2] Schumann C., "Ein Simulationsprogramm für Schiffsbewegungen im Seegang – Das Programm ROLF Version 1.0", SchiffsRat-Bericht, Hamburg, 7. März 2014
- [3] Söding H., "UTStrip: Strip Method for Program System Uthlande", Juli 2015
- [4] Sumislawski, P., Wassermann, S., Abdel-Maksoud, M., "Rudder influence on roll damping estimation", Proceedings of the 13th Int. Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB), Kobe, Japan, 2018
- [5] Wassermann, S., Sumislawski, P., Abdel-Maksoud, M., "Accelerated HERM Technique by Induced Artificial Damping for Efficient Ship Roll Damping Estimation", Proceedings of the 13th Int. Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB), Kobe, Japan, 2018
- [6] Wassermann, S., Schumacher, A., Langer, G., Sumislawski, P., Valanto, P., Abdel-Maksoud, M., "Effective Improvements in Ship Roll Damping Estimation", 32nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, Germany, August 2018
- [7] Schiller, P., Wang, K., Abdel-Maksoud, M., Flow study on a ducted azimuth thruster, Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering - MARINE 2017. May 2017.
- [8] Schiller, P., Wang, K., Palm, M., Abdel-Maksoud, M., Unsteady loads on an azimuth thruster in off-design conditions, Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors - smp'17. June 2017.

INNOSHIP – ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN MEHRZWECKSCHIFFS FÜR WARTUNG UND REPARATUR VON OFFSHORE-WINDENERGIE- ANLAGEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX416

DIPL.-ING. ROLF ROHDEN	INNOVEN GmbH, Bremerhaven
PROJEKTPARTNER:	
DIPL.-ING. MICHAEL PALM	J. M. Voith SE & Co. KG VTA
PROF. DR. OUD EL MOCTAR	Universität Duisburg-Essen, ISMT

TEILPROJEKT 1:

Schiffentwurf und Definition des Einsatzzwecks. Konzept und Konstruktion von teilbaren Standbeinen eines Mehrzweckschiffes für Wartung und Reparatur für den Einsatz im Semi-Jack-Up (INNOVEN GmbH)

TEILPROJEKT 2:

Konzeption und Auslegung von Voith-Schneider-Propellern für DP-Betrieb bei gleichzeitig hoher Transitgeschwindigkeit (J.M. Voith SE & Co. KG | VTA)

TEILPROJEKT 3:

Sicherheit und Effizienz eines Mehrzweckschiffes für Wartung und Reparatur von Offshore-Windenergieanlagen im Seegang (Universität Duisburg-Essen, Institute of Ship Technology, Ocean Engineering and Transport Systems (ISMT))

EINLEITUNG

Im Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) stellen einen bedeutenden Beitrag zur ökologischen und wirtschaftlichen Nutzung der Windenergie in Deutschland dar. Nach Schätzungen der European Wind Energy Association (EWEA) werden im Jahre 2020 zwischen 72 und 102 Terrawattstunden (TWh) Strom aus Offshore-Windenergie erzeugt¹. Die Vorteile der Errichtung von Windenergieanlagen (WEA) auf See liegen dabei in einer großflächigen Nutzung des Windes ohne Beeinträchtigung durch die Topologie des Aufstellungsortes und ohne Auswirkungen auf das Landschaftsbild. Der Wind weht auf See beständiger und stärker als an Land, so dass WEA häufiger und effizienter Strom ins Netz einspeisen können.

Windenergieanlagen auf See sind jedoch deutlich schlechter zu erreichen als Anlagen an Land. Der Transport von Personal und Material zu Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten,

aber auch für akute Reparaturen, kann nur über den Wasserweg geschehen. Der kritische Punkt für die Durchführbarkeit solcher Arbeiten ist der sichere Übergang von Personen und Material vom Schiff auf die Anlage. Da OWEA in der Regel fest mit dem Meeresboden verbunden sind bewegt sich ein Schiff im Wellengang relativ dazu, was ein Übersteigen erschwert bzw. oft auch verhindert. Somit sind die Offshore-Arbeitseinsätze wettergebunden, was sich auch auf die mögliche Betriebszeit der Anlagen niederschlägt. Deswegen hat die Zugänglichkeit der Anlagen eine enorme Bedeutung hinsichtlich der Verfügbarkeit und damit Wirtschaftlichkeit von Offshore-Windenergie.

Zu Beginn der Offshorenutzung wurde ein hohes Augenmerk auf die Planung und Installation gelegt, da hier extrem hohe Kosten anfallen. Nachdem sich nun nach einigen Jahren viele Windparks in der regulären - bis zu 20-jährigen - Betriebsphase befinden, verschiebt sich der Fokus auf Service und Wartung, zumal bei einigen Windparks bereits nach kurzer Betriebszeit größere Schäden, z. B. an den Rotorblättern aufgetreten sind²:

OFFSHORE WIND FIASCO: RENEWABLES INDUSTRY FACES \$BILLIONS IN COMPENSATION FOR EARLY REPAIRS

Date: 23/02/18 | Jillands-Posten

Ørsted is in danger of having to repair the blades of more than 600 offshore wind turbines.



Ørsted's wind farm at Anholt was completed in 2013. The turbines' blades are so worn down already that they have to be brought to land and repaired. Photo: A2Sea

Ørsted must repair up to 2,000 wind turbine blades because the leading edge of the blades have become worn down after just a few years at sea. The company has a total of 646 wind turbines from Siemens Gamesa, which may potentially be affected to some extent, Ørsted confirmed. The wind turbine owner will not disclose the bill, but says that the financial significance is "small".

Siemens Gamesa also does not want to comment on the costs, but the company's Danish subsidiary has just provided 4.5 billion Danish Krone (\$750 million) or 16% of its revenue to guarantee its commitments. [...]

Ørsted's problems mean, among other things, that almost 300 blades at its offshore wind farm at Anholt have to be taken down after just a few years of operation, sailed ashore and transported to Siemens Gamesa's factory in Aalborg.

However, it is far from just the Anholt Park that is affected. The blades at several British Ørsted offshore wind farms must also be repaired after just a few years on the water.

The total bill is uncertain, but according to Finans's information, the manufacturer's warranty typically covers the first five years. However, there has been disagreement between Ørsted and Siemens Gamesa as to whether the problems are covered by the guarantee or are a case of ordinary wear and tear.

Abb. 1: Artikel zum Thema Rotorblattschäden in Offshore Windparks

Aktuell existieren in der Flotte der Arbeitsschiffe im Bereich der Offshore-Windenergie keine Fahrzeuge, die auf die Durchführung unterschiedlicher Wartungs-, Reparatur- und Überwachungs-tätigkeiten (Mehrzweckschiffe) ausgelegt sind. Zum Betrieb eines Windparks auf See werden heute ca. fünf unterschiedliche Schiffstypen benötigt, um die regelmäßigen Service-Tätigkeiten abzudecken. Es kommt häufig zum Einsatz mäßig bis ungeeigneter Spezialschiffe. So wird zum Beispiel für die Inspektion oder den Austausch von Rotorblättern ein Schiff eingesetzt, welches für die Installation von Windkraftanlagen ausgelegt ist und daher „überqualifiziert“ und überteuert ist.

Das Gesamtziel dieses Vorhabens war deswegen die Entwicklung eines neuartigen Mehrzweck-Service-Schiffs mit einem innovativen Einsatzkonzept für Wartungs- und Reparaturarbeiten von Offshore-Windenergieanlagen. Hierbei ging es um konzeptionelle und methodische Entwicklungen, auf deren Basis die Weiterentwicklung zu einem fertigen Produkt erfolgen kann.

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ZIELE

Im Rahmen des Projektes sollte unter anderem folgendes erreicht werden:

- › Entwicklung eines Grundkonzeptes für ein Mehrzweck-Service-Schiff für Wartung und Reparatur von Offshore-WEA. Das Grundkonzept beinhaltet unter anderem die Entwicklung der Rumpfform, die Standbeine, Propulsions- und Steuerorgane, die Antriebsanlagen und Maßnahmen zur Verbesserung der Standfestigkeit und Aufnahme von Stoßlasten in verschiedenen Einsatzszenarien (Transit, schwimmend, semi-jack-up).
- › Konstruktion und Auslegung von abnehmbaren und segmentierten Standbeinen unter Berücksichtigung der beschriebenen Betriebsmodi, inklusive Konzept zum Auf- und Abbringen und Verstauen an Bord.
- › Untersuchung des Zustands „Semi-Jack-Up“ und den daraus resultierenden Belastungen für Standbeine, Rumpf und Untergrund (gefederte Beinaufnahmen im Rumpf, Ausfahrssystem, etc.).
- › Entwurf und Optimierung der Propulsions- und Steuerungsorgane im Hinblick auf die Nutzung von Voith-Schneider-Propellern (VSP) für hohe Schiffsgeschwindigkeiten und einer geforderten exakten Positionierbarkeit des Schiffes. Für das dynamische Positionieren wird eine DP3 Klasse umgesetzt, um z. B. die Arbeitssicherheit für Personen im sogenannten Mannkorb und für Taucher gewährleisten zu können. Dabei wird auch die Nutzung der VSP zur Rolldämpfung in den unterschiedlichen Zuständen untersucht.
- › Weiterentwicklung eines effizienten Berechnungsverfahrens (Randelementtheorie) zur Berechnung des Manövrierverhaltens und Leistungsbedarfs von Jack-Up-Schiffen im Seegang.
- › Ganzheitliche Optimierung des Schiffes, insbesondere Rumpf, Propulsionssystem, Raumkonzept, Jack-Up-System und Steuerung, in Bezug auf den Energieverbrauch bei hohen Froude-Zahlen jenseits 0,3 zur Verkürzung von Transitzeiten sowie See- und Positionierungsverhalten.
- › Stand- und Strukturfestigkeit des Spezialschiffes auch mit Hinblick auf herrschende Bodenverhältnisse und notwendiges Ballastieren während der Kranoperationen

ANGESTREBTER FORTSCHRITT IM VERGLEICH ZUM STAND DER TECHNIK

Das geplante Forschungsvorhaben sollte sich detailliert mit den zuvor genannten Themen befassen. Hierbei sollten folgende Fortschritte im Vergleich zum Stand der Technik erzielt werden:

- › Entwicklung eines Konzeptes für ein Spezialschiff (Mehrzweck-Service-Schiff) mit unterschiedlichen Betriebsmodi mit Fokus auf Versorgung, Reparatur und Instandsetzung von Offshore-Windenergieanlagen, welches speziell an die Anforderungen von Windenergieanlagen und Wetterbedingungen angepasst ist. Durch z. B. abnehmbare Standbeine, und kürzere Transitzeiten soll die Effizienz der Versorgung deutlich gesteigert werden. Das Mehrzweckschiff soll weiterhin möglichst viele Tätigkeiten, die während des Betriebs in einem Offshore-Windpark anfallen, wahrnehmen, die heute den Einsatz unterschiedlicher Schiffstypen erfordern. Die Installation ganzer Anlagen war davon ausgenommen.
- › Entwicklung abnehmbarer und segmentierter Jack-Up-Standbeine. Dabei sollte das gesamte Jack-Up-System wartungsarm sein, sich für den Transit platzsparend verstauen und mit bordeigenen Mitteln auf- und abriggen lassen. Es wird davon ausgegangen, dass für viele Arbeitseinsätze die Standbeine nicht benötigt und daher ganz an Land gelassen werden können. Dies optimiert die Tragfähigkeit und Decksfläche entsprechend des Einsatzszenarios.
- › Entwicklung eines Konzeptes für den Semi-Jack-Up-Zustand. Dies beinhaltet unter anderem die Randbedingungen wann dieser Zustand eingenommen wird, welche Operationen in diesem Modus möglich sind und welche sicherheitsrelevanten Besonderheiten hier zu beachten sind. Des Weiteren musste die Belastung auf Beine und Rumpf und die Struktureinbindung entsprechend untersucht und berücksichtigt werden. Weiterhin wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Standfestigkeit im Seegang (z. B. durch eine aktive Steuerung der Propulsions- und Manövrierorgane) und zur Aufnahme von Stoßlasten (z. B. durch Federn im Jack-Up-System) entwickelt. Die Vorteile eines Semi-Jack-Up Zustandes im Vergleich zum kompletten Aufjacken liegen zum Beispiel in der Zeitersparnis und der geringen Grundpenetration, sowie in einem vereinfachten Schiffsbetrieb (Kühlung) und in der Kosteneffizienz gegenüber einem Full-Jack-Up. Daher war es erstrebenswert diesen Zustand fundiert zu untersuchen.
- › Entwicklung eines an den Schiffstyp angepassten Vortriebs- und Steuerungsorgans (Voith-Schneider-Propeller) für den Einsatz bei Mehrzweck-Service-Schiffen für Offshore-WEA. Hier lag vor allem die Vorgabe einer Geschwindigkeit von bis zu 18 kn für den Transit im Fokus.
- › Weiterentwicklung eines Randelemente-Berechnungsverfahrens zur Berechnung des Manövrierhaltens (inkl. dynamischer Positionierung) von Service-Schiffen für Offshore-WEA im Seegang.
- › Ganzheitliche Optimierung des Versorgungsschiffes in Bezug auf Energieverbrauch sowie See- und Positionierungsverhalten mit dem Ziel, die Einsatzzeit und die Anzahl nutzbarer Wetterfenster zu erhöhen.

PROJEKTSTATUS

Das Projekt wurde zum 31.05.2019 im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen abgeschlossen. Alle Arbeitspakete wurden bearbeitet und die Ergebnisse ausgewertet.

Es wurde ein Schiffsentwurf erstellt, der die gestellten Anforderungen an ein Mehrzweck-Schiff erfüllt:



Abb. 2: Konzeptentwurf INNOSHIP (Bild: INNOVEN)

Das Schiff weist die folgenden technischen Daten auf:

Länge über alles:	110m
Breite:	22m
Antriebsleistung:	6x 2.600kW
Jack-up:	4 segmentierte, demontierbare Hubbeine
Zuladung:	ca. 4.500t
Kran 1:	100t SWL bei 120m Hakenhöhe
Kran 2:	100t SWL bei 20m Hakenhöhe
Kran 3:	25 t SWL bei 15m Hakenhöhe
Pfahlzug:	240t
Dynamisches Positioniersystem:	DP3
zusätzliches Equipment:	Moonpool, 2 Tenderboote, A-Frame, Boatlanding
optionales Equipment:	Walk-to-work gangway, LARS-System (Taucher, ROV), Schleppwinde



Abb. 3: Rotorblatttausch Offshore mit INNOSHIP, semi-gejackt (Bild: INNOVEN)

Für den Semi-Jack-Up Zustand wurden Lasten berechnet und mit Versuchen im Wasserkanal der Universität Duisburg verifiziert. Damit wurden die Hubbeine berechnet und eine Konstruktion durchgeführt, die auch das Aus- und Einbringen der Beine berücksichtigt.

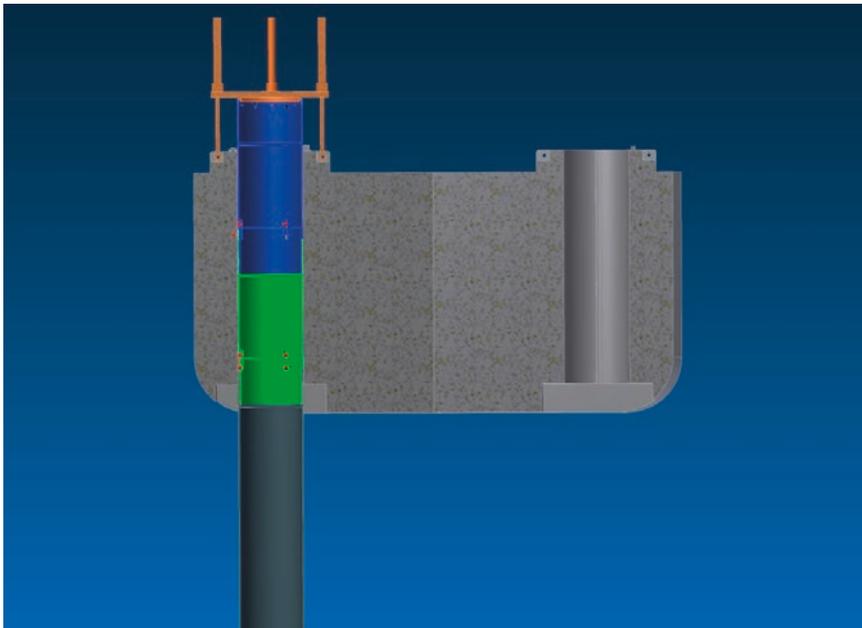


Abb. 4: Hubbeinkonstruktion mit Ausbringvorrichtung (Schnitt) (Bild: INNOVEN)

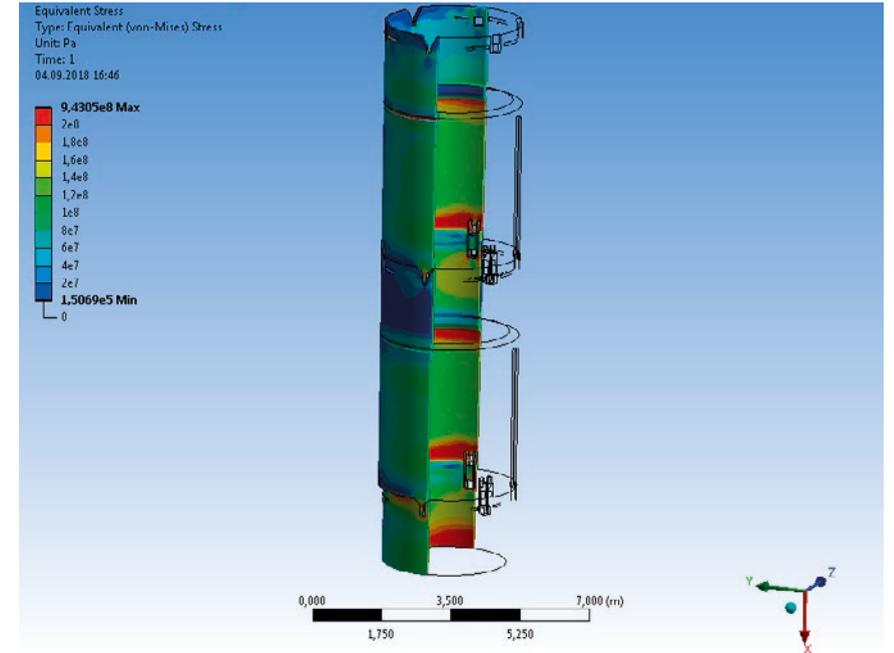


Abb. 5: Finite Elemente Berechnung der Hubbeine. (Bild: INNOVEN)

Die Propellerschaufeln des Voith-Schneider-Antriebs wurden u.a. mittels CFD-Strömungsberechnungen für hohe Schiffsgeschwindigkeiten optimiert und den Anforderungen nach z.B. erhöhter Rolldämpfung angepasst.

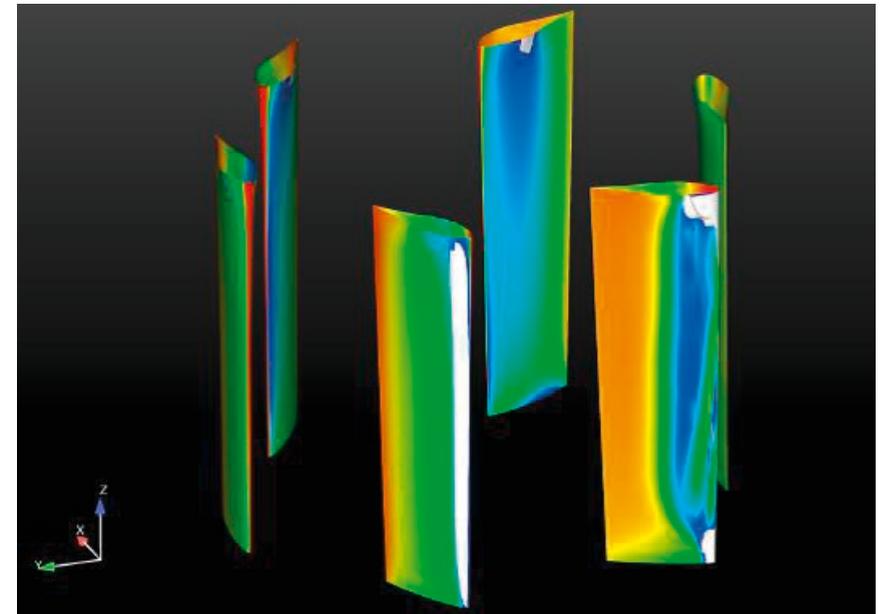


Abb. 6: CFD-Strömungsberechnung an den VSP Propellerschaufeln (Bild: Voith)

Auch der komplette Unterwasserschiffsentwurf wurde einer Strömungsoptimierung unterworfen, vor allem im Bereich des Hinterschiffs, wo die 4 VSP-Antriebe platziert sind:

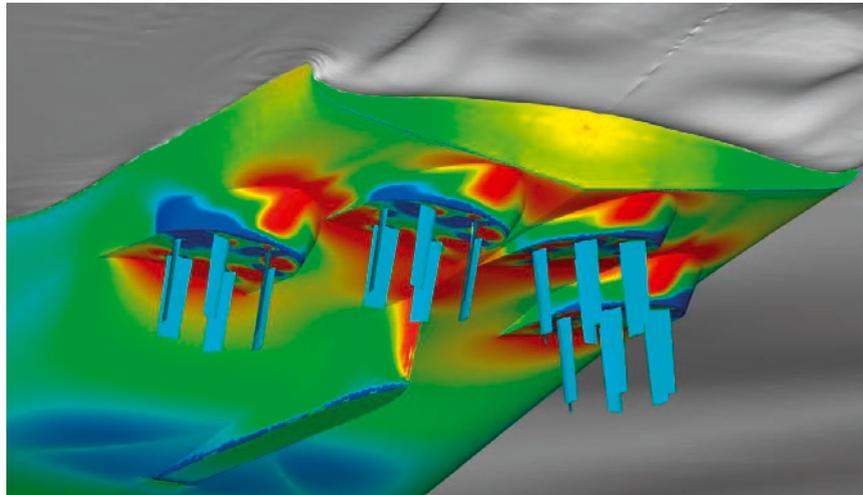


Abb. 7: CFD-Strömungsberechnung des Unterwasserschiffs

Darüber hinaus wurde für das Schiff ein Raumkonzept entwickelt, das alle notwendigen Einbauten berücksichtigt:

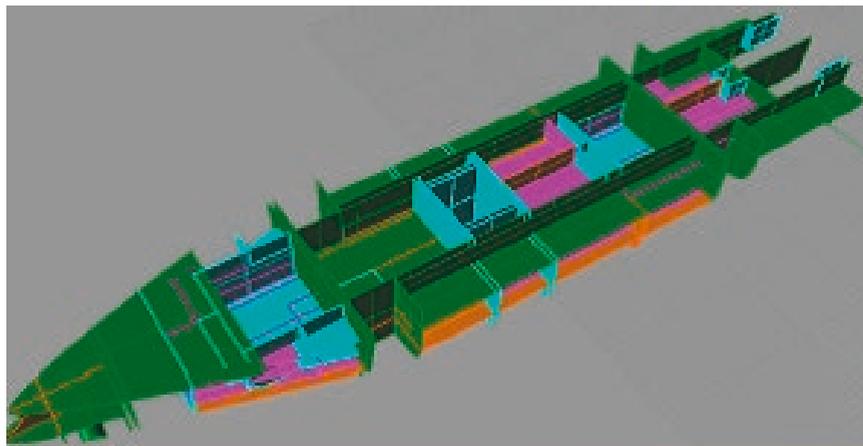


Abb. 8: Raumkonzept für das Gesamtschiff (Bild: ISMT)

ZUSAMMENFASSUNG

Das Verbundvorhaben INNOSHIP befasste sich mit der Entwicklung eines neuen Schiffstyps zur Wartung und Reparatur von Offshore-Windenergieanlagen. Hierbei handelt es sich um ein schnelles Mehrzweck-Service-Schiff, welches Aufgaben von den bisher genutzten, unterschiedlichen Serviceschiffen übernehmen kann. Nach Festlegung des Einsatzprofils, der Betriebsszenarien und der Umgebungsbedingungen in den Einsatzgebieten wurde ein Grundkonzept für das Mehrzweckschiff, welches neben dem Entwurf und der Konstruktion innovative Elemente im Entwurf und Betrieb des Schiffes enthält, aufgestellt. Zu den Innovationen zählen abnehmbare Standbeine und der Semi-Jack-Up-Operationsmodus, die besondere Herausforderungen darstellen. Zur Berechnung der Bewegung, der Lasten und des Leistungsbedarfs des Mehrzweckschiffs wurde ein existierendes Berechnungsverfahren erweitert und angewendet, mit Hilfe dessen auch Rumpf und Anhänge optimiert werden. Für einen effizienten Betrieb des Schiffes war die Weiterentwicklung der Propulsions- und Steuerorgane von besonderer Bedeutung. Weiterhin wurden Fragestellungen der Struktursicherheit des Schiffes, der Standbeine und des Jack-Up-Systems untersucht.

Der nun vorliegende Schiffsentwurf bildet die Basis für die nun folgende Detailkonstruktion und Baubeschreibung für das Schiff. Parallel werden Finanzierungsoptionen und dafür notwendige Chartervereinbarungen geprüft, um die Basis für den Bau eines ersten Prototyps zu legen.

DANKSAGUNG

Unser Dank gilt den Verbundpartnern für die erfolgreiche Kooperation in dem vorliegenden Projekt, so wie dem Projektträger Jülich für die effiziente und gute Zusammenarbeit sowie die Unterstützung während der Antrags- und auch der gesamten Projektphase.

HYSTOH – HYDRODYNAMISCHE UND STRUKTURMECHANISCHE OPTIMIE- RUNG EINES HALBTAUCHERS FÜR OFFSHORE-WINDENERGIE- ANLAGEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX409

PROF. DR.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSOUD	Technische Universität Hamburg
PROF. DR.-ING. ALEXANDER DÜSTER	Technische Universität Hamburg
DR.-ING. ANDREAS BOCKSTEDTE	DNV GL, Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg
DR.-ING. GERRIT HAAKE	JÖRRS - BLUNCK - ORDEMANN GmbH, Hamburg
SÖNKE SIEGFRIEDSEN	aerodyn engineering GmbH, Büdelsdorf
JENS CRUSE	CRUSE Offshore GmbH, Hamburg

MOTIVATION

Es ist offensichtlich, dass der Energiebedarf weltweit in den letzten Jahrzehnten immer weiter gestiegen ist. Gleichzeitig bestehen Bemühungen, insbesondere seit der Reaktorkatastrophe in Fukushima, die umstrittene Kernenergiegewinnung zurückzufahren. Ferner wurden im Kyoto-Protokoll und im Übereinkommen von Paris Ziele für den Klimaschutz definiert, deren Fokus auf der Begrenzung der globalen Erwärmung liegt. Daher ist man bestrebt, Alternativen zur CO₂-intensiven Energiegewinnung mit Braun- und Steinkohle zu entwickeln. Dies hat zur Folge, dass zwei Technologien mehr oder weniger gleichzeitig ersetzt werden müssen.

Eine solche Kompensation der Energiegewinnung bedarf eines immensen Aufwands, da hierfür nach Möglichkeit erneuerbare Energien genutzt werden sollen. Deutschland hat dabei weltweit eine Vorreiterrolle in der Erschließung und dem Ausbau verschiedener erneuerbarer Energiequellen übernommen. Zurzeit sind große Offshore-Windparks in der Nord- und Ostsee in Betrieb, und weitere sind in der Entstehung.

Nord- und Ostsee als Flachwassermeere mit geringen Wassertiefen von um 50m und weniger stellen allerdings weltweit eine Ausnahme dar, weil unter diesen Bedingungen Offshore-Windenergie-Anlagen im Meeresboden fest gegründet werden können. Da in vielen anderen Küstenregionen der Meeresboden mit zunehmendem Abstand zur Küste wesentlich stärker abfällt und schnell Tiefen von 100–1000 m erreicht, können sich fest gegründete Anlagen nicht als weltweiter Industriestandard durchsetzen. Daher müssen Lösungen für größere Wassertiefen entwickelt werden. In Abb. 1 sind Gebiete mit solch großen Wassertiefen dargestellt, in welchen ein besonders hoher Energiebedarf besteht, wodurch sie ein großes Potenzial für den Ausbau von Offshore-Windenergie darstellen.



Abb. 1: Potenzielle Märkte für schwimmende Windenergieanlagen

Um die mit zunehmender Wassertiefe steigenden Bau- und Installationskosten zu vermeiden, ist der Einsatz schwimmender Windenergieanlagen unabdingbar. Eine Lösung ist die Verwendung schwimmender Fundamente, die am Meeresboden verankert sind. Im Rahmen des HyStoH-Verbundvorhabens wurde eine effiziente, robuste und kostengünstige Anlage entwickelt, die für die Massenproduktion geeignet ist.

DAS KONZEPT

Für die Offshore-Windenergiegewinnung in Regionen mit großer Wassertiefe wurde von der CRUSE Offshore GmbH eine innovative schwimmende Anlage konzipiert und konstruiert, die „SelfAligner-FOWT“. Die Struktur der Anlage ist eine sich selbst ausrichtende Halbtaucherplattform, die der Windrichtung automatisch folgt. Das Fundament ist an einem einzigen Punkt gelagert und dreht sich frei um eine „Turret Buoy“, die im Meeresboden verankert ist, siehe Abb.2. Ein Downwindrotor und ein profilierter Turm induzieren aerodynamische Kräfte, die ein selbstausrichtendes Drehmoment erzeugen und somit eine passiv gesteuerte Ausrichtung der gesamten schwimmenden Anlage ermöglichen.

Das dynamische Verhalten des schwimmenden Fundaments wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Konsortialpartnern untersucht und optimiert: Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie, Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen, TUHH, DNV GL, aerodyn engineering GmbH und Jörss-Blunck-Ordemann GmbH.

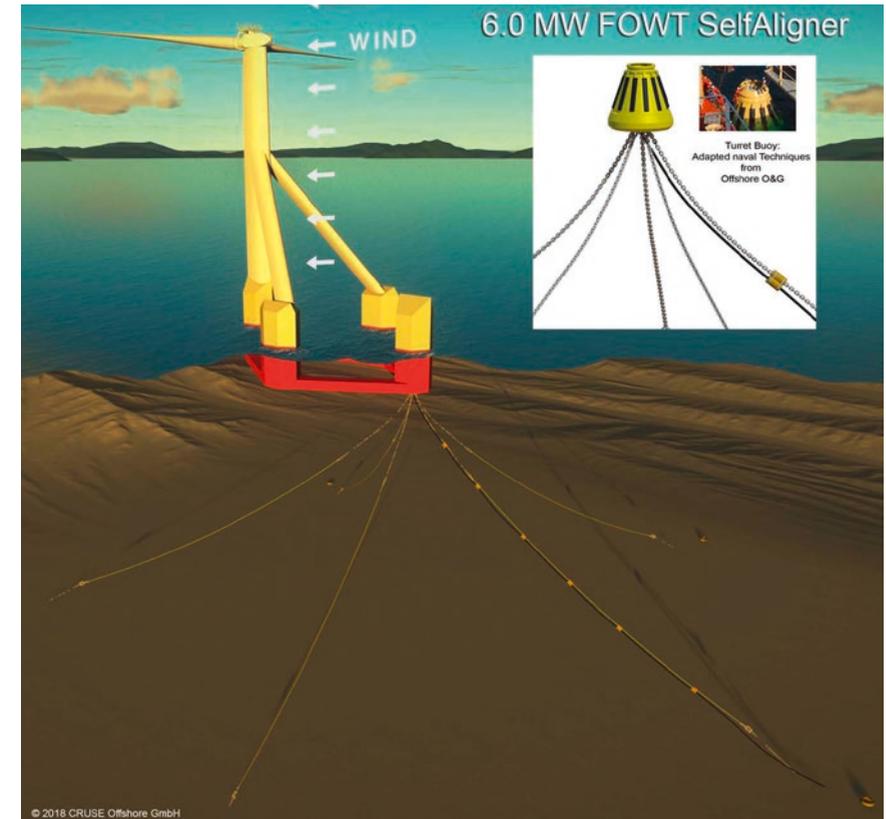


Abb. 2: Gestaltung der schwimmenden selbstausrichtenden Windenergieanlage „SelfAligner-FOWT“

Die entwickelte Offshore-Windenergieanlage zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

HOHE STABILITÄT TROTZ REDUZIERTER KOMPLEXITÄT

Das Fundament der SelfAligner-FOWT wird durch ca. 5.000 Tonnen Ballastwasser stabilisiert - selbst bei rauen Wetter- und Wellenbedingungen beeinträchtigen die Beschleunigungen in der Nabhöhe von 100 Metern den Betrieb nicht.

OPTIMIERTE STRUKTUR FÜR DIE MASSENPRODUKTION

Die Stahlkonstruktion des schwimmenden Fundaments orientiert sich an Schiffbaukonstruktionen und kann problemlos in jeder Werft gebaut werden. Bei der Entwicklung der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass diese ohne zusätzlichen Aufwand auf automatisierten Fertigungslinien hergestellt werden kann.

NIEDRIGE INSTALLATIONSKOSTEN

Die SelfAligner-FOWT verspricht zudem eine wesentlich einfachere Installation in Gewässern bis zur Tiefe des Festlandssockels. Die fertig im Dock installierten und betriebsbereiten

FOWTs können einfach an ihre Positionen geschleppt werden. In einem simplen Manöver werden sie an das „Turret Buoy“-Mooring angeschlossen, ohne dass ein spezielles Installationschiff erforderlich ist. Für umfangreiche Reparaturen, Stilllegungen oder Aufrüstungen können die Einheiten an die Küste zurückgeschleppt werden. Die Transfermanöver für die Wartungsscrew sind einfacher und erfordern eine weniger ausgefeilte Ausrüstung. Damit wird zugleich die Sicherheit des Personals erhöht.

GERINGE UMWELTBELASTUNG

Der Offshore-Baulärm, ein Problem für einige maritime Lebewesen, entsteht nur in geringem Maße. Das „Suction“-Ankersystem ist einfach zu installieren und zu entfernen, sofern der Meeresboden für diesen Ankertyp geeignet ist. Darüber hinaus deckt das Ankersystem nur einen kleinen Bereich des Meeresbodens ab und lässt sich einfach und fast rückstandslos entfernen.

WINDENERGIETURBINE

Kriterien für die Auswahl der Windenergieturbine waren ein geringes Gewicht und möglichst störungsfreier Betrieb. Die von der aerodyn engineering GmbH (aerodyn) entwickelten SCD-Technologie-Turbinen „Super Compact Drive“ erfüllen diese Voraussetzungen. Bei der SCD-Technologie handelt es sich um ein vollständig integriertes Konzept für Antriebe und Windenergiegenerator in Leichtbauweise, wodurch die Massen des Turms und dessen Fundament verringert werden. aerodyn übernahm als industrieller Partner im HyStOH-Verbundprojekt die Entwicklung und Integration der Windenergieturbinen in die Turmstruktur. So konnten die Erfahrungen im Turbinendesign mit einer neuen schwimmenden Fundamenttechnologie für eine wettbewerbsfähige Marktlösung kombiniert werden.

Ausgehend von der Turbinenlastbewertung wurden Anfangslastgrenzen für die Turmkopfverbindung bestimmt. In die Untersuchung wurden Parameter wie Rotorausrichtung, Turbinenleistung, Flügelanzahl, Rotordurchmesser, Nabenhöhe und Typenklasse einbezogen. Zusätzlich wurden für das Rotor-Nacelle-Assembly (RNA) die notwendigen Massendaten ermittelt und für die strukturelle Vorplanung von Turm und Fundament verwendet. Die berechnete aerodynamische Belastung und detailliertere Turbinendaten wurden für die Verifikation der Detailmodellierung anderer Projektpartner eingesetzt.

Das Design der RNA wurde von aerodyn basierend auf den abgeleiteten Lasten in einer vollständig gekoppelten Simulationsumgebung unter Berücksichtigung der Aeroelastik, der Hydrodynamik, des Strukturverhaltens und der Windenergieanlagensteuerung erstellt. Die Ergebnisse flossen in den Entwurfsprozess für die Turm-Gondel-Schnittstelle, das Getriebe, den Generator, die Rotornabe und das Rotorblattdesign ein. Abschließend wurde ein Konzept für die Antriebsstranganordnung und die Rotorblätter unter Berücksichtigung der schwimmspezifischen Regleranforderungen abgeleitet, um eine voll funktionsfähige Windenergieanlage auf dem schwimmenden Fundament zu ermöglichen. Das Design berücksichtigt standortspezifische Umweltbelastungen einschließlich Betriebsbelastungen und Überlebensbedingungen.

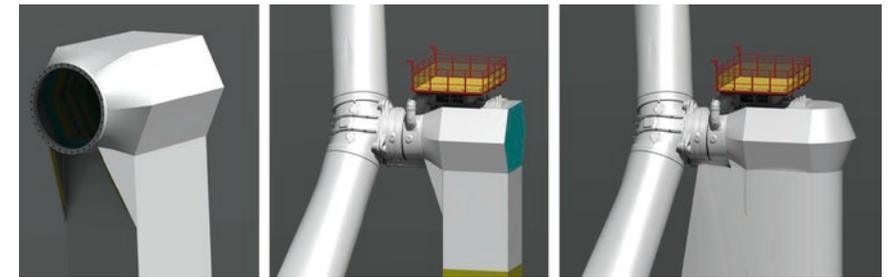


Abb. 3: Turmkopfdesign, ohne und mit aerodynamischer Verkleidung aus glasfaserverstärktem Kunststoff

HYDRODYNAMISCHES VERHALTEN

Die genaue Vorhersage des Bewegungsverhaltens einer schwimmenden Windenergieanlage ist ein entscheidendes Thema beim Entwurf und der Entwicklung eines selbstausrichtenden Systems, da zur Beurteilung der Ausrichtung viele Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Die Fähigkeit zur Selbstausrichtung hängt nicht nur von den momentan wirkenden Kräften des Seegangs und der Strömung ab, sondern auch von den aerodynamischen Belastungen, die im Wesentlichen durch den Turm und den Turbinenrotor hervorgerufen werden. Außerdem trägt die Spannung der Ankerleinen, die das System in Position halten, erheblich zu den auf die Schwimmstruktur wirkenden Kräften bei.

Darüber hinaus werden aufgrund unterschiedlicher dynamischer Effekte durch den Windturbinenbetrieb zusätzliche Kräfte induziert. Kleine Roll- und Stampfbewegungsamplituden der Plattform erzeugen große Bewegungsamplituden der Gondel und des Rotors in Längs- (entlang der Rotationsachse) und Querrichtung. Die Bewegung entlang der Längsrichtung verursacht eine komplexe Wechselwirkung zwischen dem Rotor und seinem Nachlauf. Die Bewegung in Querrichtung induziert ein Kreiselmoment. Eine zuverlässige Simulation der Plattformbewegung erfordert die Berücksichtigung aller wirkenden Kräfte und Momente.

Während des Konstruktionsprozesses müssen alle o. g. Lasten im Zeitbereich einbezogen werden. Die angewandte numerische Simulationsmethode für die Berechnung des aero- und hydrodynamischen Verhaltens muss in der Lage sein, die Kräfte des Rotors bei Schräganströmung zu berechnen. Die instationären hydrodynamischen Belastungen hängen stark von der aktuell benetzten Oberfläche der Plattform ab. Daher muss die relative Position zwischen der tatsächlichen Wasserlinie der Plattform und der Wellenhöhe zu jedem Zeitpunkt aktualisiert werden. Insbesondere muss die Widerstandskraft sich selbst ausrichtender schwimmender Windenergieanlagen mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden, da sie einen starken Einfluss auf die Bewegung der Plattform hat.

Um die o. g. Voraussetzungen zu erfüllen, wurde am Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie der Technischen Universität Hamburg das Simulationsverfahren *panMARE* weiterentwickelt und im Rahmen des HyStOH-Verbundprojekts zur Simulation der umfassenden Belastung von Turbine und Plattform der SelfAligner-FOWT eingesetzt. Das Verfahren basiert auf der Potentialtheorie und dient zur Berechnung des dreidimensionalen aero- und

hydrodynamischen Strömungsfeldes. Die berechnete Rotorumströmung umfasst die Nachlaufflächen der Rotorblätter und deren Wechselwirkung mit dem Rotor unter Berücksichtigung der Roll- und Stampfbewegung der Anlage. Die Simulation ermöglicht die Berechnung der jeweils aktuell benetzten Oberfläche der Struktur. Außerdem erlaubt das Verfahren die Einbeziehung externer Kräfte wie Rumpfwiderstand. Im Rahmen des Projekts wurde ein dynamisches Verankerungsmodell entwickelt, das in der Lage ist, die Zugkräfte entlang der Ankertrasse in Abhängigkeit von der Bewegung der Struktur und der Seegangseigenschaften zu erfassen. Bei der Berechnung der Bewegungen einer schwimmenden Anlage wie der SelfAligner-FOWT werden die gekoppelten aerodynamischen und hydrodynamischen Kräfte sowie die Ankerkräfte synchron behandelt [1].

panMARE eignet sich insbesondere zur Vorhersage der Bewegungen bei extremen Belastungszuständen und zur Analyse der Fähigkeit zur Selbstausrichtung [2][3]. Das passive Ausrichten von Plattform und Rotor kann für unterschiedliche Wind-, Strömungs- oder Wellenwinkel simuliert werden. Ebenso können dynamische Bedingungen mit wechselnden Wind- bzw. Strömungsrichtungen oder Geschwindigkeiten simuliert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Verifikationsstudie durchgeführt indem Simulationsergebnisse mit etablierten numerischen Methoden verglichen wurden [4]. Für die untersuchten Lastfälle wurde eine gute Übereinstimmung erzielt. Ferner wurden Windkanal- und Wellentankversuche durchgeführt, um das aero- und hydrodynamische Modell zu validieren.

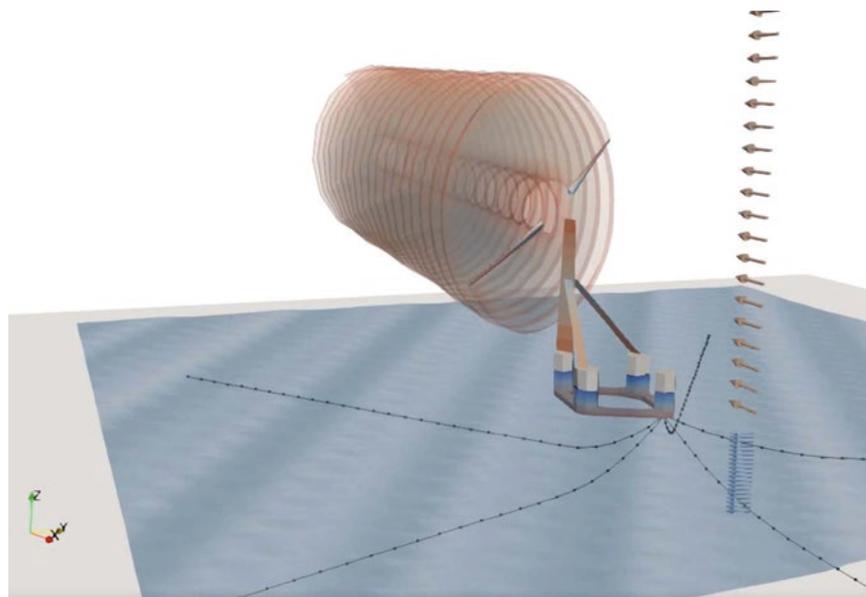


Abb. 4: *panMARE* Simulation

NUMERISCHE SIMULATION DER FLUID-STRUKTUR-INTERAKTION

Schwimmende Windenergieanlagen können im Seegang erhebliche Belastungen erfahren. Um ihre strukturelle Integrität sicherzustellen und ihre Leistung zu bewerten, ist es wichtig, die Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) zu berücksichtigen. Hierdurch kann der Einfluss der aerodynamischen und hydrodynamischen Fluidkräfte auf das Bewegungsverhalten der Struktur und auch auf die Deformationen und Spannungen der einzelnen Komponenten ermittelt werden. Im Rahmen des Verbundprojekts HyStOH wurden am Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen umfangreiche FSI-Simulationen mit zum Teil sehr detaillierten finite Elemente (FE)-Modellen der SelfAligner-FOWT durchgeführt, siehe Abb. 5.

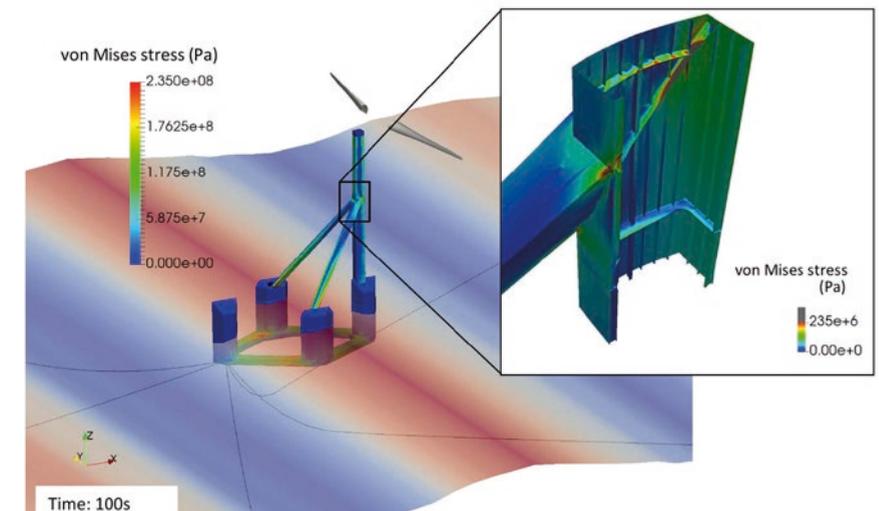


Abb. 5: Simulation der FSI und Spannungsanalyse mit sehr detailliertem FE-Modell im Entwurfsstadium.

Für die Simulation der FSI wurde die Softwarebibliothek *comana* [5] entwickelt, die einen partitionierten Lösungsansatz für gekoppelte Mehrfeldprobleme ermöglicht. Hierdurch können für die einzelnen Felder, d.h. für das Fluid- sowie das Strukturproblem verschiedene Löser verwendet werden. In einem Zeitschritt der dynamischen Simulation werden die Teilprobleme abwechselnd berechnet und die jeweiligen Lösungen in Form von Fluidlasten und sich daraus ergebenden Verschiebungen bzw. Deformationen am gemeinsamen Rand ausgetauscht, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Aufgrund der getrennten Behandlung der Teilprobleme ist es möglich, verschiedene räumliche und zeitliche Diskretisierungsverfahren sowie bereits vorhandene spezialisierte und schnelle Algorithmen für die numerische Lösung der jeweiligen Teilprobleme zu verwenden. Folglich ist der partitionierte Ansatz nicht nur sehr flexibel, sondern ermöglicht auch eine effiziente Lösung von FSI- und anderen gekoppelten Mehrfeldproblemen. In diesem Projekt wurde für das Fluidproblem das Simulationsverfahren *panMARE* (Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie) mit dem auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierenden Strukturlöser ANSYS (ANSYS Academic Research Mechanical, Release 18.2) gekoppelt [6]. Die Bauteile der Struktur können dabei als starr modelliert werden, um einen Abgleich der Ergebnisse des globalen Bewegungsverhaltens mit *panMARE* vorzunehmen. Werden die Bauteile elastisch modelliert, wird die FSI

in die Simulationen einbezogen, und es sind je nach Detailgrad des FE-Modells sehr präzise Spannungsanalysen möglich. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf eine Vorgehensweise gelegt, die auch für sehr komplexe FE-Modelle eine effiziente FSI-Simulation ermöglicht. Hierdurch konnten detaillierte Strukturanalysen der SelfAligner-FOWT durchgeführt werden.

DEFINITION DER ENTWURFSGRUNDLAGEN UND DES LASTENSIMULATIONS-MODELLS

Das aerodynamische Design der SelfAligner-FOWT sowie eine spezielle Verankerung fördern die passive Selbstausrichtung der Plattform an der aktuellen Windrichtung und machen das aktive Giersystem herkömmlicher Windenergieanlagen überflüssig [7], siehe Abb. 6. Die Entwicklung dieses innovativen schwimmenden Windenergiekonzepts wurde in Rahmen des HyStOH-Verbundprojekts vom Geschäftsbereich Renewables Certification (RC) des DNV GL begleitet. DNV GL trug insbesondere zu dem Entwurfsgrundlagendokument bei, das die technischen Randbedingungen enthält, wie allgemeine Umgebungsbedingungen, Entwurfsmethoden, Sicherheitskonzept, Test- und Validierungsverfahren, sowie die Codes und Standards für die spätere Konzeptentwicklung und Prototypenzertifizierung.

Den Projektpartnern wurden die Definitionen von Auslegungslastfällen für die Konzeption des innovativen schwimmenden Fundaments zur Verfügung gestellt. Mit dem Simulationsprogramm Bladed wurden Lastberechnungen mit einem vollständig dynamisch gekoppelten, integrierten Simulationsmodell durchgeführt [8]. Dieses Modell umfasst die gesamte Turbine, den Turm, den Schwimmer und die Verankerung unter gleichzeitiger Einwirkung turbulenter Wind- und stochastischer Seezustände und Einbeziehung der nichtlinearen Turbinensteuerung.

Weiterhin unterstützte DNV GL die Projektpartner bei der Strukturberechnung sowie bei der Auslegung des Verankerungssystems.

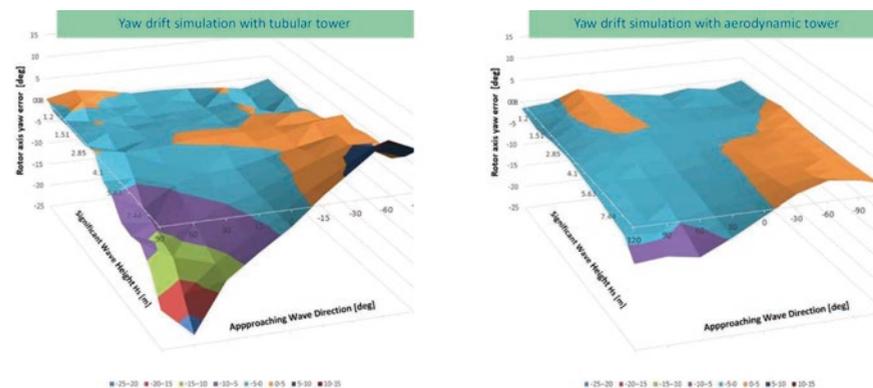


Abb. 6: Gierdrift abhängig von Windwellenversatz mit rundem (li.) und mit profiliertem Turm (re.)

KONSTRUKTIVE GESTALTUNG DER SELFALIGNER-FOWT

Die Idee der Anwendung von Schiffbauprinzipien besteht darin, das Stahlgewicht und die Herstellungskosten der Tragstruktur aufgrund einer hohen Automatisierungsrate im Herstellungsprozess zu reduzieren. Zudem soll die Tragstruktur die Selbstausrichtung des Rotors unterstützen.

Auf Basis der aerodynamischen Anforderungen bezüglich der Selbstausrichtung befindet sich der Turm auf dem leeseitigen Schwimmkörper, der mit zwei Streben mit den mittleren Schwimmern verbunden ist. Der Dreh- und Ankerpunkt befindet sich stets auf der Luv-Seite, um den Hebelarm der selbstausrichtenden Kräfte zu maximieren. Turm und Streben sind zur Optimierung des aerodynamischen Verhaltens als symmetrisch profilierte Querschnitte ausgeführt. Für die Konstruktion wird nur ein versteifter Kastenträger verwendet, während Vorder- und Hinterkante aus Leichtbaumaterial wie glasfaserverstärktem Kunststoff ohne Tragfunktion bestehen.

Die strukturelle Auslegung der SelfAligner-FOWT für die Fertigung in Standard-Schiffsfertigungsprozessen stellt eine neue Herausforderung dar. Die Extrem- und Ermüdungslasten, die auf eine Windenergieanlage bei der Stromerzeugung wirken, unterscheiden sich erheblich von jenen, die auf ein Schiff wirken. Für die Auslegung und Fertigung der Windenergieanlagen-Tragstruktur mit den Methoden des Schiffbaus müssen daher unterschiedliche Kompromisse hinsichtlich Materialstärke und Fertigungsverfahren eingegangen werden. Aufgrund der begrenzten zulässigen Wandstärke des Mastes und der Streben sind Stabilitätsprobleme der Struktur zu vermeiden. Im Verbundvorhaben HyStOH wurden Versteifungselemente unterschiedlicher Größe in Längs- und Horizontalrichtung hinsichtlich Anzahl und Abmessungen optimiert, um das Gewicht der Struktur zu reduzieren. Das Ergebnis ist in Abb. 7 dargestellt.

In Bezug auf die Prüfung der Materialermüdung existieren mehrere Standarddetails für Verbindungspunkte von T- und HP-Profilen, die aus der Schiffbauindustrie bekannt sind. Details der für den Ermüdungsnachweis relevanten Bauelemente können durch konstruktive Anpassung zu einer Verringerung der Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF) um den Faktor 3 oder mehr führen. Insbesondere die Verbindungen des Turms und der Streben mit den Schwimmkörpern, bei denen die Kräfte auf den Schwimmer übertragen werden, müssen sorgfältig ausgelegt werden. Um alle relevanten Aspekte der Aerodynamik, der Wellenbewegung und des Ankersystems abzudecken, wurden die Lasten auf die SelfAligner-FOWT in einem vollständig gekoppelten Modell analysiert.

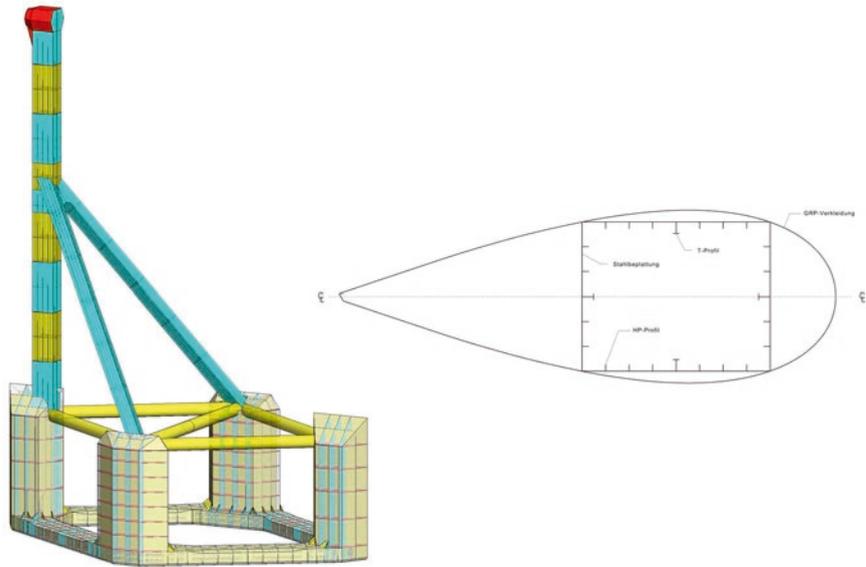


Abb. 7: Optimiertes Design: Gesamtstruktur (links), Querschnitt des Turms (rechts)

LOGISTIKKONZEPT

Um den Anforderungen und Erfahrungen bei der Untersuchung der Montagelogistik Rechnung zu tragen, wurden im Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML Interviews mit allen Projektpartnern geführt. Die Ergebnisse der Interviews und der weiteren Recherchen wurden ausgewertet und in ein Logistikkonzept einbezogen.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch das Verbundvorhaben HyStOH ist es gelungen, die selbstausrichtende Windenergieanlage „SelfAligner-FOWT“ zu entwickeln. Für die Berechnung des Bewegungsverhaltens der Anlage wurde ein Simulationsmodell erstellt, das in der Lage ist, den gekoppelten aero- und hydrodynamischen Einfluss, kombiniert mit den Verankerungskräften, abzubilden. Anhand der Simulationsergebnisse wurde die Geometrie der SelfAligner-FOWT optimiert und unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Interaktion für die Festigkeit analysiert. Es ergab sich eine im Vergleich zu anderen schwimmenden Windenergieanlagen relativ leichte Struktur, die jedoch auf Grund ihrer gewollt einfachen Konstruktion sehr robust ist. Für den anspruchsvollen Offshore-Einsatz in windreichen Gebieten ist eine solche Anlage geeigneter als eine mit aktiver Windnachführung. Somit erscheint eine kommerzielle Verwertung in absehbarer Zukunft als sehr wahrscheinlich.



Abb. 8: SelfAligner-FOWT

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Namen des HyStOH-Konsortiums für die Förderung des Verbundprojekts sowie dem Projektträger Jülich für die herausragende administrative Projektbetreuung. Darüber hinaus gilt unser Dank den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, E.ON, Climate & Renewables Central Europe GmbH, für die aktive Mitarbeit in diesem Projekt.

LITERATUR

- [1] Stefan Netzband, Christian W. Schulz, Ulf Götsche, Daniel Ferreira González, Moustafa Abdel-Maksoud. A panel method for floating offshore wind turbine simulations with fully integrated aero- and hydrodynamic modelling in time domain. *Ship Technology Research*, 65(3):123–136, September 2018
- [2] Stefan Netzband, Christian W. Schulz, Moustafa Abdel-Maksoud. Self-aligning behaviour of a passively yawing floating offshore wind turbine. *Ship Technology Research*, 0(0):1–11, December 2018
- [3] Stefan Netzband, Christian W. Schulz, Moustafa Abdel-Maksoud (2018): Assessment of floating and yaw stability of a self-aligning floating offshore wind turbine, in: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2018*
- [4] Stefan Netzband, Christian W. Schulz, Moustafa Abdel-Maksoud (2017): A Fully Coupled Simulation Method for Floating Offshore Wind Turbine Dynamics Using a Boundary Element Method in Time Domain, *10th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics 2017*
- [5] Marcel König, Lars Radtke, Alexander Düster (2016): A flexible C++ framework for the partitioned solution of strongly coupled multifield problems, *Computers & Mathematics with Applications*, 72:1764-1789
- [6] Bjarne Wiegard, Lars Radtke, Marcel König, Moustafa Abdel-Maksoud, Alexander Düster (2019): Simulation of the fluid-structure interaction of a floating wind turbine, *Ships and Offshore Structures*, DOI: 10.1080/17445302.2019.1565295
- [7] Andreas Manjock, Stefan Netzband (2018): Drift stability of HyStOH semi-submersible supported by airfoil shaped structures, *Journal of Physics Conference Series*, DOI: 10.1088/1742-6596/1222/1/012025
- [8] Andreas Manjock, Markus S. Starr (2019): Loading and Structural Analysis of the Self-Aligning HyStOH Floating Wind Turbine Concept, *2nd International Offshore Wind Technical Conference 2019*

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH

1. Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie
Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung
hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten
ISBN: 978-3-95806-006-7
7. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten
ISBN: 978-3-95806-104-0
8. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten
ISBN: 978-3-95806-187-3
9. STATUSSEMINAR MEERESFORSCHUNG mit FS SONNE
14. – 15. Februar 2017 in Oldenburg – Tagungsband (2017), 221 Seiten
ISBN: 978-3-95806-207-8
10. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2017 (2017), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-277-1
11. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2018 (2018), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-366-2

12. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2019 (2018), 187 Seiten
ISBN: 978-3-95806-439-3