STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2018

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH

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

Für den Inhalt 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
©Daniel Clören

Druck
Weiss-Druck GmbH & Co.KG, Monschau

Schriftenreihe Projektträger Jülich
ISBN 978-3-95806-366-2

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.

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH

STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2018

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH

GRUSSWORT

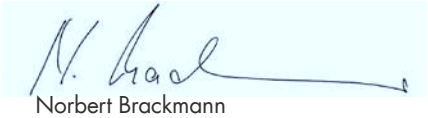
Als international aufgestellte Branche ist die maritime Wirtschaft den Veränderungen durch Megatrends wie Globalisierung und Digitalisierung in besonderer Weise ausgesetzt. Unter dem Dach der Maritimen Agenda 2025 hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Maritimen Forschungsstrategie 2025 mit seinen beiden neuen Förderinstrumenten: dem „Maritimen Forschungsprogramm" und den „Echtzeittechnologien für die maritime Sicherheit" auf diese Herausforderungen reagiert. Neben Entwicklungen in den Bereichen Schiffbau, Produktion, Schifffahrt und Meerestechnik setzen wir Impulse in wichtigen bereichsübergreifenden Handlungsfeldern: Umweltschonende maritime Technologien MARITIME.green, maritime Digitalisierung und smarte Technologien MARITIME.smart, maritime Sicherheit MARITIME.safe und maritime Ressourcen MARITIME.value.

Unser Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Wirtschaft zu stärken und Wachstumspotentiale zu heben. Deutsche maritime Unternehmen verfügen über exzellente Expertise und haben damit gute Ausgangspositionen für die Entwicklung innovativer Systeme für den Weltmarkt. Unsere maritimen Forschungseinrichtungen genießen international einen hervorragenden Ruf. Diese Wettbewerbsposition wollen wir weiter ausbauen.

Die Vernetzung der Branche auch über die Sektorgrenzen hinaus ist unerlässlich, damit die maritime Wirtschaft ihre Potentiale ausschöpfen kann. Mit dem Nationalen Masterplan Maritime Technologien (NMMT) als koordinierendem Instrument flankieren wir die Forschungsinitiativen und fördern die Abstimmung der Aktivitäten auf Bundes- und Länderebene, um so zusätzliche Synergien schöpfen zu können.

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

MTCAS – MARITIME TRAFFIC ALERT AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM 13

GEORG MICHELITSCH
RALF ZIEBOLD
CHRISTIAN DENKER
AXEL HAHN
WILKO C. BRUHN
MICHAEL BALDAUF
SANDRO FISCHER
MICHAEL GLUCH

LAESSI – LEIT- UND ASSISTENZSYSTEME ZUR ERHÖHUNG DER SICHERHEIT DER SCHIFFFAHRT AUF INLANDWASSERSTRASSEN 27

MARTIN SANDLER
RALF ZIEBOLD
ANJA HESSELBARTH
JÜRGEN ALBERDING
MAIK UHLEMANN
MICHAEL HOPPE

WATERTRUCK – LEICHTBAU-BINNENSCHIFF FÜR CONTAINERTRANSPORT MIT SCHIFFSEIGENEM HANDLINGSYSTEM ZUR BE- UND ENTLADUNG OHNE HAFENINFRASTRUKTUR 43

PETER KAUFMANN
STEFAN KRAUSE
HOLGER HEIDENREICH
DIRK PANNIER
MATHIAS PFAFF
TOBIAS KUTZLER
THOMAS HIPKE

SINAFA – SICHERE NAVIGATION IN DER SEESCHIFFFAHRT 53

DIRK KOWALEWSKI
STEFANO CAIZZONE
MANUEL CUNTZ
WAHID ELMARISSI
ANDRIY KONOVALTSEV
EMILIO PÉREZ MARCOS
KAZEEM YINUSA
MICHAEL MEURER
SEBASTIAN UHAREK
ANDRÉS CURA HOCHBAUM
ULRICH MANGOLD

ShipLight – NACHHALTIGER SCHIFFSLEICHTBAU DURCH EFFIZIENTES UND FLEXIBEL AUTOMATISIERTES 3D-LASER-LICHTBOGEN-HYBRIDSCHWEISSEN 67

C. EMMELMANN
O. STEINMEIER
G. CERWENKA
M. MÖLLER
F. BOEKHOFF
M. DRÖSSER
B. URBAN
W. FIEDLER
F. SCHULZE
O. MEIER
J. LINDNER

LASAAS – LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON STAHL UND ALUMINIUM FÜR DIE ANWENDUNG IM SCHIFFBAU 85

STEFAN KAIERLE
RABI LAHDO
RAINER WAGENER
BENJAMIN MÖLLER
OLIVER MEIER
FLORIAN ALBERT
MARKUS KOGEL-HOLLACHER

FLEXDI – FLEXIBLE DIREKTEINSPRITZENDE MOTOREN FÜR DIE SCHIFFFAHRT 101

MANUEL BOOG
FREDERIC DUMSER
ENRICO BÄROW
GEORG FINK
MICHAEL JUD
STEPHAN GLEIS
STEPHANIE FRANKL

PROEIS – EINFLUSS DER FORMGEBUNG VON SCHIFFEN AUF DIE PROPULSIONSEFFIZIENZ UND PROPELLER-EIS-BELASTUNG 113

MARKUS MOTZ
ALESSIO MELONI
FRANK BERNING
HOLGER MUMM
DANIELA MYLAND
QUENTIN HISETTE
LUTZ KLEINSORGE
RALF TSCHULLIK
DENNIS MIERKE

MARTIN GEHRKE
CHRISTIAN JANSSEN
THOMAS RUNG
PHILIPP HAUER

SMART PUMP – ENTWICKLUNG EINER ROBUSTEN UND INTELLIGENTEN HYDRAULISCHEN VERSORGUNGSEINHEIT FÜR ELEKTRONISCH GEREGELTE ZWEITAKT-SCHIFFSDIESELMOTOREN 131

SEBASTIAN SCHMATZ
AHMED SHORBAGY
ROMAN IVANTYSYN
ANDERS HILDINGSON
NICO LOITSCH
JÜRGEN WEBER

METHASHIP – METHANOL ALS GRUNDBRENNSTOFF FÜR DIE PASSAGIERSCHIFFFAHRT 145

GERHARD UNTIEDT
DANIEL SAHNEN
ROLF NAGEL
DIRK SCHRÖDER

ROBEMM – ROBOTISCHES UNTERWASSER-BERGUNGS- UND ENTSORGUNGSVERFAHREN INKLUSIVE TECHNIK ZUR DELABORATION VON MUNITION IM MEER, INSBESONDERE IM KÜSTEN- UND FLACHWASSERBEREICH 159

MELANIE ABBONDANZIERI
TILO KLEIN
TORSTEN FREY
PAUL MÜLLER

MPNET – MARITIME MULTIPHASENTRANSPORTNETZWERKE – FÖRDERTECHNOLOGIE ZUM BEDARFSGERECHTEN TRANSPORT VON MEHRPHASENGESCHMISCHEN 169

JENS-UWE BRANDT
JÖRG LEWERENZ
MARK REICHWAGE
ABDULMALIK ALWAN
MILAN PESCHKES
JENS DANKER
ANDREA LUKE
MARTIN MEHLICH
CHRISTOPH MÜNSTER
HANS HOFFMEISTER

SUGAR III – SUBMARINE GASHYDRAT-RESERVOIRE 193

MATTHIAS HAECKEL

INTER-THRUST – UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER DYNAMISCHEN LASTEN UND WECHSELWIRKUNGEN AUF DAS BETRIEBSVERHALTEN VON SCHIFFSANTRIEBEN (VERBUNDVORHABEN IN MARTEC ERA-NET CALL 2014) 199

MOUSTAFA ABDEL-MAKSOUD
MAXIM BRADE
JÖRN HINNENTHAL
MICHAEL PALM
ATRICK SCHILLER
KEQI WANG

HYMOTT – HYDRODYNAMISCHE OPTIMIERUNG DER MANÖVRIERFÄHIGKEIT VON OFFSHORE TRANSPORT- UND TRANSFERSYSTEMEN 213

THOMAS RUNG
TORBEN MÜHLBACH
JOCHEN MARZI
YAN XING-KAEDING
DIRK JÜRGENS
DAVID BENDL
MICHAEL PALM

MTCAS –

MARITIME TRAFFIC ALERT AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX405A-E

GEORG MICHELITSCH	AIRBUS Defence and Space (Bremen)
RALF ZIEBOLD	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation (Neustrelitz)
CHRISTIAN DENKER	OFFIS, Institut für Informatik (Oldenburg)
AXEL HAHN	OFFIS, Institut für Informatik (Oldenburg)
WILKO C. BRUHN	Raytheon Anschütz GmbH (Kiel)
MICHAEL BALDAUF	Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt (Rostock)
SANDRO FISCHER	Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt (Rostock)
MICHAEL GLUCH	Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt (Rostock)

1 EINLEITUNG

Der Großteil des stetig steigenden weltweiten Handels wird durch die internationale Schifffahrt abgewickelt. Zunehmende Verkehrsdichte, wachsende Schiffsgrößen und enge Fahrpläne erhöhen aber auch die Belastung der Seeverkehrswege und der Schiffsbesatzungen. Gleichzeitig sind sichere, saubere und zuverlässige maritime Lieferketten ein aktueller gesellschaftlicher Bedarf Deutschlands und Europas. Dies resultiert aus einem gesteigerten Sicherheits- und Umweltbewusstsein auf der einen Seite aber auch aus den potenziell schwerwiegenderen Konsequenzen auf der anderen Seite, sollte es zu Seeunfällen kommen.

Die Europäische Agentur für die Sicherheit des Seeverkehrs (European Maritime Safety Agency–EMSA) berichtet von jährlich ca. 3.200 Vorkommnissen und Unfällen auf See, von denen etwa die Hälfte auf den Bereich der Navigation (Strandungen, Kollisionen zwischen Schiffen und mit anderen Objekten) entfallen. Das Konsortium des MTCAS-Projektes hat es sich zum Ziel gesetzt, Lösungen zu entwickeln, um diese Zahl zu reduzieren.

2 AUFGABENSTELLUNG

Das Konsortium, bestehend aus:

- Raytheon Anschütz GmbH,
- AIRBUS Defence and Space GmbH (ehem. SIGNALIS GmbH),
- Bereich Seefahrt der Hochschule Wismar,
- OFFIS - Institut für Informatik e. V. und
- Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

hat es sich zum Ziel gesetzt, ein Assistenzsystem zu entwickeln, das die Schiffsführung bei der Kollisionsverhütung unterstützt. In Anlehnung an entsprechende Lösungen in der Luftfahrt sind Konzept und Prototyp für das Maritime Traffic Alert and Collision Avoidance System (MTCAS) entstanden. Der bewährte Ansatz wurde auf die Bedürfnisse der Schifffahrt angepasst, sodass MTCAS ein intelligentes Assistenzsystem für die kooperative Kollisionsverhütung ist, dessen Lösungen konform zu den internationalen Kollisionsverhütungsregeln (KVR) sind.

Um eine hohe Anwendbarkeit und Praxisnähe von MTCAS sicherzustellen, baut das System auf bestehenden Strukturen für Schiffsnavigation und Seeverkehrsüberwachung auf und erweitert diese Basis um zusätzliche Technologien.

Von zentraler Bedeutung für die erfolgreiche Kollisionsverhütung ist es, die Absichten und Bewegungen von sich auf See begegnenden Schiffen zuverlässig abschätzen zu können. Relevant hierfür sind sowohl die historische als auch die aktuelle Verkehrslage ebenso wie Kenntnisse über entsprechende Schiffsbewegungsmodelle. Hieraus sollen Aussagen über die zukünftigen Bahnverläufe der Verkehrsteilnehmer prädiziert werden. Zu diesem Zweck ist beispielsweise die Erfassung von belastbaren Positions-, Navigations- und Zeitdaten (engl.: Resilient PNT) als auch der Verkehrslagesituation notwendig. Die Integrität der PNT-Daten des eigenen Schiffs sowie der AIS-Daten weiterer Schiffe müssen überwacht und der Brückenbesatzung zur Verfügung gestellt werden, um eine präzisere Lagebeurteilung zu ermöglichen. Durch eine dynamische Manöverprädiktion, die das hydrodynamische Verhalten der Schiffe berücksichtigt, werden diese Möglichkeiten zur Lagebeurteilung weiter verbessert.

Die Harmonisierung des Situationsbewusstseins und der Lageerkennung zwischen Schiffen als auch mit der Seeverkehrsüberwachung durch Vessel Traffic Services (VTS) ist ein weiterer zentraler Aspekt der Kollisionsverhütung. Hierfür ist eine frühzeitige Detektion von potenziell kritischen Verkehrssituationen notwendig. Bei Bedarf kann dann die Schiffsführung die Berechnung und Verhandlung einer Ausweichtrajektorie mit den beteiligten Schiffen initiieren. Gleichzeitig werden Daten über den Stand der Verhandlung ausgetauscht und den Nutzern an Bord und an Land transparent dargestellt.

Die Aufgabe des MTCAS-Konsortiums war also die Entwicklung eines echtzeitfähigen Assistenzsystems, das die Schiffsführung mit belastbaren Informationen versorgt und konkrete Handlungsempfehlungen gibt. Eine automatisierte Ausführung der Maßnahmen ist jedoch explizit nicht vorgesehen, sodass die volle Entscheidungsgewalt weiterhin bei der Schiffsführung verbleibt.

3 VERBESSERTE ALARME DURCH VORHERSAGETECHNOLOGIE

Im klassischen Navigationssystem Radar mit ARPA-Funktionalitäten basieren Kollisionswarnungen auf der Berechnung des Closest Point of Approach (CPA). Dieser ist das Ergebnis einer reinen linearen Vorausextrapolation auf Grundlage zweier Schiffsbewegungen. Die jeweiligen Schiffsführungen definieren Grenzwerte für minimale räumliche und zeitliche Abstände zu anderen Schiffen. Beim Unterschreiten dieser Grenzwerte wird ein Alarm erzeugt, der auf die vermeintlich kritische Annäherung hinweist. Hierdurch wird die Schiffsführung aufgefordert, die Lage zu analysieren und ggf. kollisionsvermeidende Maßnahmen zu ergreifen. Besonders in verkehrsreichen und küstennahen Gebieten erzeugt dieses lineare Vorgehen jedoch oftmals unrealistische Alarme. So werden, wie in Abbildung 1 dargestellt, beispielsweise No-Go-Areas und geplante Routen der Vorausberechnung nicht berücksichtigt.

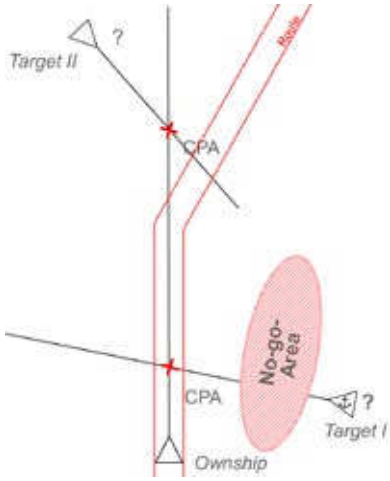


Abb. 1: Zwei klassische Kollisionswarnungen würden hier erzeugt werden, obwohl Target I nicht durch die No-Go-Area fahren kann und der CPA von Target II nicht auf der Route des Eigenschiffes liegt.

3.1 ZEITLICHE HORIZONTE VON MTCAS

Um intelligent alarmieren zu können, ist eine Betrachtung der Horizonte einer Begegnung zwischen zwei Schiffen notwendig. Auf Basis des zeitlichen und räumlichen Abstandes zu einer Nahbereichssituation finden unterschiedliche Methoden zur Detektion von potentiellen Kollisionen Anwendung. Auch sind die internationalen Kollisionsverhütungsregeln (KVR) zu berücksichtigen; Abbildung 2 stellt dies entsprechend dar. Im „Recommendation State" sind die Schiffe so weit voneinander entfernt, dass die KVR-Regeln 11 bis 19 noch keine Anwendung finden. MTCAS bietet hier eine Methode zur Verhaltensvorhersage (Kapitel 3.3). Im „Danger State" handelt es sich um eine gefährliche Annäherung zwischen zwei Schiffen, in der die KVR-Regeln 11 bis 19 Anwendung finden. MTCAS bietet der Schiffsführung hier einen intelligenten CPA (Kapitel 3.4) zur Kollisionsdektektion an. Im „Last Minute Manoeuvre (LMM) State" fordert MTCAS dazu auf, ein Manöver des letzten Augenblicks durchzuführen und errechnet hierfür auf Grundlage von hydrodynamischen Schiffsmodellen den Zeitpunkt für das letztmögliche Einleiten eines erfolgreichen Ausweichmanövers (Kapitel 3.5).

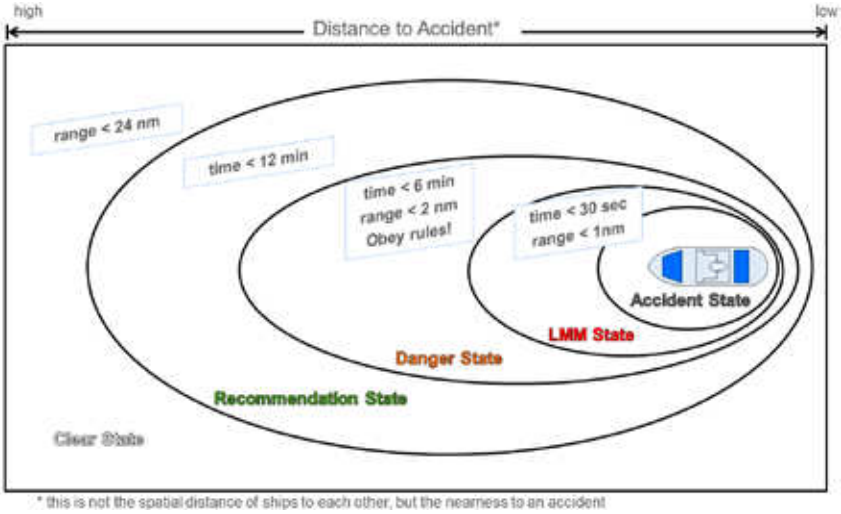


Abb. 2: Die Escalation States ‚Recommendation', ‚Danger' und ‚Last Minute Manoeuvre' (LMM) wurden im MTCAS Projekt untersucht. Es wurden exemplarische räumliche und zeitliche Werte zur Beschreibung der Übergänge zwischen den States während einer Annäherung definiert.

3.2 INTEGITÄT & PLAUSIBILITÄT VON NAVIGATIONSDATEN

Um kritische Situationen sicher zu erkennen, sind Zuverlässigkeit sowie eine niedrige Fehleralarmrate essentiell. Hierfür müssen das Soft- und Hardware-Design des Systems als auch die verwendeten Eingangsdaten den Anforderungen für sicherheitskritische Anwendungen entsprechen. Anders als TCAS in der Luftfahrt, in dem die barometrische Höhe und die Distanz als kritische Parameter in die Kollisionsvermeidung eingehen, müssen für die maritime Anwendung neben der Position auch Kurs und Geschwindigkeit über Grund sowie die Orientierung des Schiffes bestimmt werden. Diese Parameter werden sowohl für das eigene Schiff als auch für die Schiffe in der Umgebung benötigt. Für solche Schiffe, die selbst nicht mit MTCAS ausgestattet sind, kann allerdings nur die Plausibilität der Daten basierend auf AIS- und ARPA-Daten bestimmt werden.

Für sicherheitskritische Anwendungen in anderen Verkehrsbereichen wurde erfolgreich ein Integritätskonzept etabliert, das den Nutzer rechtzeitig warnt, wenn das System nicht zur Verfügung steht. Ein s.g. Protection Level schätzt den aktuellen Fehler unter Berücksichtigung eines definierten Restrisikos (IR~10-6) um sicherzustellen, dass der Fehler nicht größer als das Protection Level ist. MTCAS bestimmt also für alle Parameter des Eigenschiffes die aktuellen Fehler im Sinne eines Protection Levels zur Ermittlung des Kollisionsrisikos (Kapitel 3.4).

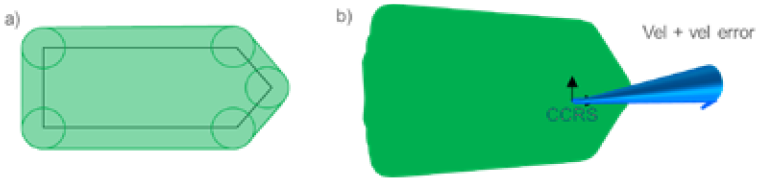


Abb. 3: a) sichere Schiffskontur unter Berücksichtigung des horizontalen Protection Levels und b) zusätzlicher Berücksichtigung des Heading-Fehlers

In Abbildung 3 a) ist die sichere Schiffskontur dargestellt, die sich aus der Berücksichtigung des horizontalen Protection Levels ergibt. Unter Berücksichtigung des Fehlers in der Orientierung (Heading) ergibt sich die sichere Schiffskontur, die in Abbildung 3 b) dargestellt ist. Für die Bestimmung des Kollisionsrisikos ist des Weiteren auch der Fehler in der Geschwindigkeit zu berücksichtigen, der durch den blauen Konus in Abbildung 3 b) dargestellt wird.

3.3 VERHALTENSPRÄDIKTION IM RECOMMENDATION STATE

Mit dem Ziel, eine Aussage über die Begegnung zweier Schiffe in der nahen Zukunft treffen zu können, wurden Schiffsbewegungen innerhalb eines Seegebiets erforscht, um typische Bewegungsmuster zu erkennen und nutzbar zu machen. MTCAS nutzt eine Methode zur Erstellung eines Wegenetzes durch Clustering historischer Bewegungen innerhalb eines Seeverkehrsgebiets, um eine Gefahrenabschätzung im „Recommendation State" zu ermöglichen. Auf Grundlage dieses Wegenetzes ist die Prädiktion der Schiffbewegung und der Begegnungen mit anderen Schiffen möglich. Die Methode wurde mit 6,3 Mio. AIS-Nachrichten evaluiert, die zwischen Dezember 2017 und März 2018 über das eMIR Testbed in der Jadebucht aufgezeichnet wurden. In diesem Zeitraum fanden 600 Fahrten von Schiffen der Typen „General Cargo" und „Tanker" statt, von denen insgesamt 50 eine Begegnung hatten. Die Evaluation auf Basis dieser sehr geringen Datenmenge ergab, dass die Verhaltensvorhersage in 70 % der Fälle das korrekte Ziel vorhergesagt hat, in 84 % der Fälle das Ausweichen korrekt vorhergesagt hat und Trajektorienprädiktionen im Median eine Abweichung von 0,204 nm (max. 1,664; min 0,075; avg. 0,889) hatten.

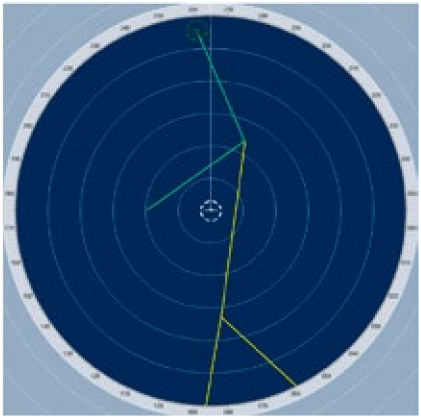


Abb. 4: Prototypische Umsetzung der Verhaltensprädiktion auf einer Radaroberfläche. Wegenetz gelb, Verhaltensprädiktion grün.

3.4 INTELLIGENTER CPA IM DANGER STATE

Ein Nachteil des klassischen CPAs ist die Missachtung von No-Go-Areas und geplanten Routen bei der Berechnung des CPAs. Der intelligente CPA des MTCAS integriert die genaue Positionierung mittels resilientem PNT mit No-Go-Areas sowie der geplanten Route des eigenen Schiffs. Im Gegensatz zum klassischen CPA wird bei der Berechnung des intelligenten CPA eine Critical Ship Pose (CSP) ermittelt. Dies ist die Pose (Latitude, Longitude, Heading) der dichtesten Annäherung eines Fremdschiffes an das eigene Schiff. In die Berechnung werden Position sowie Kurs und Geschwindigkeit über Grund als auch die jeweiligen Abweichungen mit einbezogen. Hieraus ergeben sich zwei Trichter, die Auskunft über den vorhergesagten Aufenthaltsort der Schiffe geben, wie die nachfolgende Abbildung 6 darstellt.

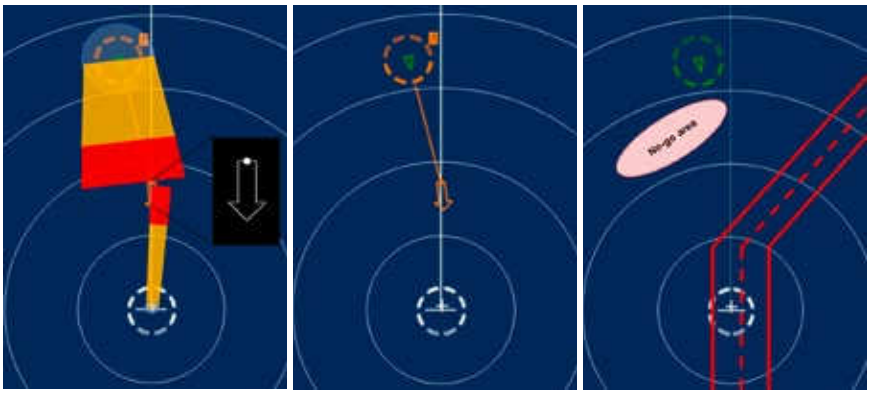


Abb. 5: Die Critical Ship Pose (CSP) zeigt die Pose der nahesten Annäherung auf Basis von Positionsgenauigkeit, Kursschwankung und Geschwindigkeitsschwankung (links mit Visualisierung, mittig ohne Visualisierung). Die CSP wird auf Grund von No-Go-Areas und/oder der Route unterdrückt. Es wird kein Alarm ausgelöst (rechts).

3.5 ULTIMATE ACTION ALERT IM LAST MINUTE MANOEUVRE STATE

Zur Kollisionsverhütung an Bord sind in den gegenwärtigen Navigationsanlagen CPA-/TCPA-Alarme entsprechend der jeweiligen IMO Performance Standards vorgesehen. Aufgrund der einfachen funktionellen Struktur und Handhabung sind diese weit verbreitet und akzeptiert. Situationsbedingt werden jedoch für unterschiedliche Begegnungssituationen verschiedene Abstände zu anderen Schiffen als sicher, bzw. unsicher betrachtet. Eine adaptive Anpassung dieser Alarmschwellwerte durch den Nutzer, ist jedoch nur eingeschränkt bzw. aufgrund der manuellen Konfiguration praktisch nicht möglich.

Als neuartiger Ansatz zur Verbesserung der Alarmierung wurde daher für MTCAS eine Dynamisierung von Alarmgrenzwerten entwickelt und erprobt. Mit einer s.g. „Last Line of Defence“ wird ein Alarm generiert, sobald der letztmögliche Zeitpunkt zur Einleitung eines Manövers zur eigenständigen Vermeidung einer Kollision erreicht wird. Dies hat zur Folge, dass der Schiffsführung nicht mehr der zeitliche Abstand bis zur dichtesten Annäherung, sondern die verbleibende Zeit angezeigt wird, innerhalb derer das eigene Schiff eine Kollision ohne Manöver des anderen Schiffs vermeiden kann.

Gegenwärtig muss die Schiffsführung das Manövrierverhalten unter den aktuell herrschenden Bedingungen (Wind, Wassertiefe, Tiefgang usw.) aufgrund von Erfahrungswerten schätzen. MTCAS unterstützt hierbei durch ein Situationseinschätzungsmodell, um potentielle Kollisionsgefahren zuverlässig zu identifizieren. Die Integration von Technologien der Fast-Time-Simulation in dieses Modell ermöglicht die Berücksichtigung von Manövriereigenschaften des Eigenschiffes sowie von Umgebungsbedingungen und verbessert zudem die Zuverlässigkeit der Alarmierung zur Kollisionsverhütung erheblich. Das Resultat ist eine dynamische Prädiktion von Standardmanöverbahnen mittels Fast-Time-Simulation, die der Schiffsführung als Handlungsunterstützung dient. In Abbildung 6 sowie in Abbildung 7 werden Beispiele möglicher Manöveroptionen dargestellt.

Abb. 6: Letzte Handlungsoption (LLoD) gegenüber einem ausweichpflichtigen, nicht ausweichenden Fahrzeug

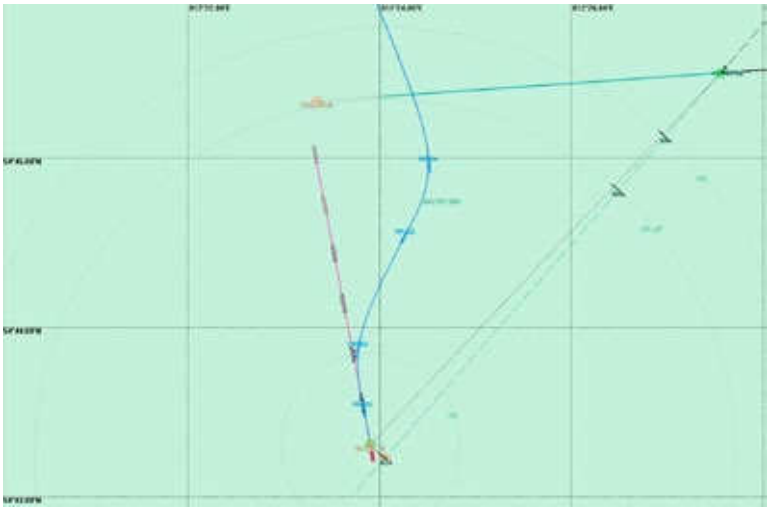


Abb. 7: Ausweichbahn mit Manöverpunkten gegenüber einem kurshaltepflichtigen Fahrzeug

3.6 EINHEITLICHES LAGEBILD IM VTS

Die Möglichkeit der Bereitstellung navigatorischer Informationen an einem landgestützten Verkehrsüberwachungsplatz durch MTCAS kann dazu beitragen, das Einwirken in kritische Begegnungssituationen besser zu koordinieren und zu regeln. Bei durchgeführten Untersuchungen zur Vorgehensweise von VTS-Operateuren beim Eingreifen zur Vermeidung von Kollisionen wurde festgestellt, dass weltweit ein ähnliches abgestuftes Eingreifen auf der Basis von CPA- und TCPA-Kriterien erfolgt. Bei Unterschreitung bestimmter Grenzwerte wird innerhalb eines definierten zeitlichen Abstands von z. B. 10 Minuten zunächst per Information an die beteiligten Schiffe reagiert. Sollte keine Reaktion erfolgen, wird bei einem TCPA von z. B. 7 Minuten eine Warnung ausgesprochen und bei TCPA-Werten unterhalb von 3 Minuten gegebenenfalls ein Instruktion zur Handlungseinleitung ausgesendet. Die befragten VTS-Operateure gaben an, dass eine Information über die Auslösung eines Ultimate Action Alert durch MTCAS (Kapitel 3.5) hilfreich sein könnte ihre Arbeit zu effektivieren.

4 REDUKTION VON MISSVERSTÄNDNISSEN DURCH VERHANDLUNG

Wurde eine kritische Begegnungssituation mit einem anderen Schiff erkannt, leitet die Schiffsführung evasive Maßnahmen ein. Dabei ist ein Schiff entweder ausweich- oder kurshaltepflichtig und muss entsprechende Maßnahmen ergreifen. Unklare Situationen führen oftmals zu in einer Kontaktaufnahme über UKW-Funk. Englisch ist hierbei häufig die Zweitsprache der Beteiligten, was zu Verständigungsproblemen führen kann. MTCAS unterstützt durch Verhandlung bei der missverständnisfreien Auflösung von potentiellen Kollisionssituationen. Hierbei werden sowohl die Schiffsführungen eingebunden als auch VTS- Operateure informiert. MTCAS umfasst somit eine Assistenzfunktion zur Begegnungsevaluation (Kapitel 4.1) und Verhandlung von Ausweichmanövern (Kapitel 4.2), in der auch das VTS eine Rolle spielt (Kapitel 4.3).

4.1 ASSISTENZFUNKTION ZUR BEGEGNUNGSEVALUATION MIT EINEM SCHIFF

Befinden sich zwei Schiffe in einer potentiellen Kollisionssituation und ist nur eines der beiden mit MTCAS ausgestattet, so hat die Schiffsführung die Möglichkeit eine Begegnungsevaluation durchzuführen, die Auskunft über die aktuelle Verkehrssituation gibt und ein KVR-konformes Ausweichmanöver berechnet. Möglich sind entweder Begegnungs-, Überhol- oder Kreuzungssituationen, die auf Grundlage der in den internationalen Kollisionsverhütungsregeln definierten Peilungen zum Fremdschiff in einer relativen Annäherung berechnet werden. Der von MTCAS ermittelte Manövervorschlag kann damit entweder eine Kursänderung als auch das Beibehalten des aktuellen Kurses sein. Ein Algorithmus zur Manöverempfehlung berechnet das minimale Manöver unter Einbeziehung der Schiffskörper, deren Bewegung und des Mindestpassierabstands für ein sicheres und effizientes Manöver. Der verwendete Mindestpassierabstand basiert dabei auf historischen Schiffsbewegungsdaten eines Seegebiets und berücksichtigt daher die lokalen Begebenheiten.

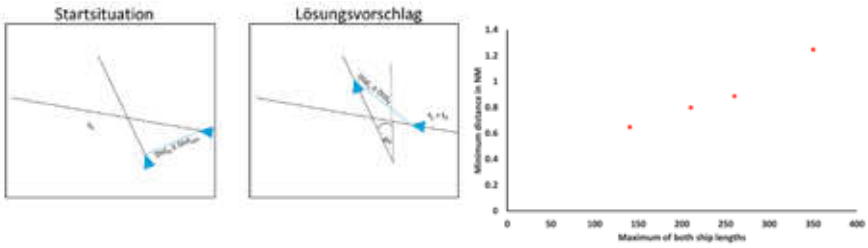


Abb. 8: Berechnung des Ausweichmanövers mit Lösungsvorschlag (links), Korrelation des Mindestpassierabstandes und des Maximums der Schiffslängen (rechts)

4.2 VERHANDLUNG VON AUSWEICHMANÖVERN MIT N-SCHIFFEN

In Situationen, in denen alle an einer potentiellen Kollisionssituation beteiligten Schiffe mit MTCAS ausgestattet sind, kann das System dafür genutzt werden, einen Vorschlag zur Auflösung der Kollisionssituation semi-automatisiert zu erzeugen. Die Verhandlung ist in die drei in Abbildung 9 dargestellten Prozessschritte gegliedert. Zunächst startet die Schiffsführung den Verhandlungsprozess manuell durch die Selektion eines Fremdschiffs auf dem MTCAS-Display. Ein automatisierter Auswahlalgorithmus selektiert auch die weiteren relevanten Schiffe, sofern diese von der kritischen Situation bzw. von Ausweichmanövern betroffen sind. MTCAS berechnet rundenbasiert und automatisch mögliche konsistente Ausweichmanöver und verteilt diese an die beteiligten Einheiten. Der Vorschlag wird auf den MTCAS-Displays dargestellt, sodass ein einheitliches Lagebild auf jedem Schiff entsteht. Auf Basis des Vorschlags entscheidet die Schiffsführung über die Annahme oder Ablehnung des Manövervorschlags. Durch eine Ablehnung besteht die Möglichkeit, zusätzliches Wissen, welches dem System nicht vorliegt, mit in den Verhandlungsprozess zu integrieren. Die Information über Annahme oder Ablehnung des Manövervorschlags wird transparent zwischen allen Beteiligen und auch an das VTS verteilt. Sobald alle Einheiten den Manövervorschlag angenommen haben, sollte dieser ausgeführt werden; anders als in der Luftfahrt ist dies jedoch nicht verpflichtend. Werden alle Manövervorschläge abgelehnt, empfiehlt MTCAS einen Rückfall auf die konventionelle UKW-Funkkommunikation.

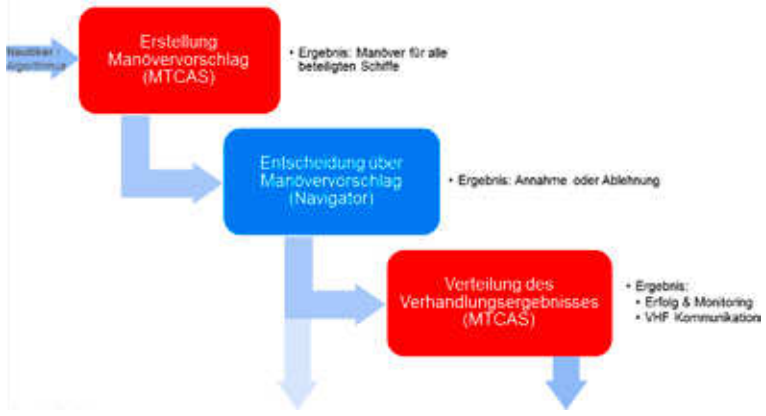


Abb. 9: Der generelle Verhandlungsprozess des MTCAS

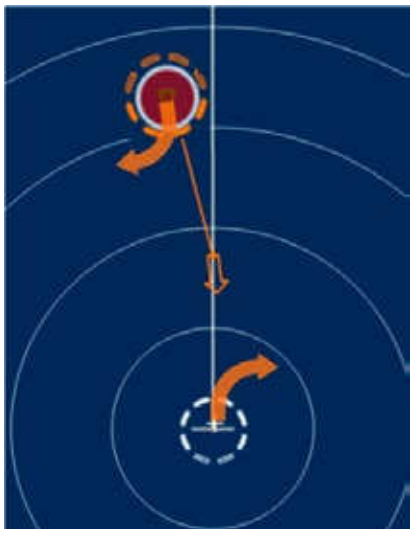


Abb. 10: Verhandlung zwischen zwei Schiffen (unten Eigenschiff, oben Fremdschiff) mit MTCAS. Beiden Schiffen wurde ein Steuerbordmanöver vorgeschlagen. Die rote Fläche im Fremdschiffsymbol signalisiert dem Navigator, dass er ausweichpflichtig ist.

4.3 DIE ROLLE DES VTS

Im Spannungsfeld zwischen etablierten und kodifizierten Aufgaben von Vessel Traffic Services (VTS) und eines möglichen zukünftigen und durch e-Navigation inspirierten Dienstleistungsspektrums wurden im Projekt MTCAS Optionen einer landgestützten Instanz zur Kollisionsverhütung auf See erforscht. Hierbei spielen neben den unabdinglichen Sicherheitsaspekten auch wirtschaftliche Interessen eine zentrale Rolle.

Ziel der landseitigen Integration von MTCAS ist es, alle am Seeverkehrsgeschehen beteiligten Akteuren mit einem gemeinsamen Lagebild und einer möglichst zweifelsfreien Erkennung der Absichten aller Parteien zu versorgen. Hierzu wurden sowohl konventionelle und standardisierte Mechanismen wie z. B. der Routenaustausch im RTZ-Format verwendet, als auch neuartige Wege beschritten. So wurden die kommandierten Werte der Schiffsbrücke mit den von MTCAS erzeugten Warnhinweisen mittels Heuristiken verknüpft und als potentielle Intention der Schiffsbesatzung automatisch an das VTS weitergeleitet. Dies soll es den dortigen Operateuren die frühzeitige Erkennung einer potentiellen Gefahrenlage sowie ein zeitgerechtes und angepasstes Eingreifen ermöglichen. In diesem Kontext fungiert die VTS-Zentrale als eine Art Relaisstation, die insbesondere Verkehrsteilnehmer ohne MTCAS weiterhin in das Verkehrsgeschehen einbindet und somit einen wesentlichen Beitrag zur Aufrechterhaltung der„Situational Awareness“ aller Beteiligten leistet.

5 SYSTEMTESTS IM SIMULATOR UND AUF SEE

Während der Projektlaufzeit wurde MTCAS fortlaufend in Simulatoren und auf See erprobt und getestet. Hierzu wurde zu Projektbeginn ein komplexer Szenarienkatalog erstellt, der Testläufe in unterschiedlichen Seegebieten (freier Seeraum, Küstengebiet, Linienrevier), mit und ohne Vessel Traffic Service (VTS) und Verkehrstrennungsgebiet (VTG), mit unterschiedlichen Schiffs-Ausstattungsgraden (mit und ohne MTCAS-Ausstattung) sowie eine

Differenzierung der anzuwendenden Kollisionsverhütungsregeln vorsieht. Die Szenarien wurden im Simulator des eMIR Testbeds sowie im Schiffsführungssimulator des Maritimen Simulationszentrums Warnemünde der Hochschule Wismar dazu genutzt, die korrekte Funktionstüchtigkeit von MTCAS zu validieren. So wurden die bordgestützten Anwendungen in den Simulatoren implementiert, um die Funktionen zur Verbesserung der Alarme durch Vorhersagetechnologie und zur Reduktion von Missverständnissen durch Verhandlung zunächst simulativ getestet, bevor sie auf See erprobt wurden. Die Simulation bietet hierbei den Vorteil, mehrere Szenarien in kurzer und auch in beschleunigter Zeit durchlaufen zu können, was die Entwicklungszeit bzw. die Testdauer reduziert. Nach der erfolgreichen simulativen Erprobung wurden MTCAS in unterschiedlichen Ausbaustufen an Bord von realen Schiffen getestet. Das Ziel hierbei war es, die Praxistauglichkeit der erforschten Funktionalitäten in der Realität sicherzustellen. Hierfür kam das OFFIS-Forschungsboot ZUSE und der Forschungskutter SENCKENBERG zum Einsatz. Beide Schiffe wurden mit MTCAS ausgestattet und fuhren in definierte Begegnungssituationen. Die Systemtests im Simulator und auf den Schiffen verliefen erfolgreich und validierten das MTCAS. Abbildung 10 zeigt die Schiffe während einer Begegungssituation im Sommer 2018.

Abb. 11: Während der Systemtests auf der Jade im Juli 2018 kamen sich die mit MTCAS ausgestatteten Schiffe FK SENCKENBERG und FB ZUSE recht nah

6 ZUSAMMENFASSUNG

Bordseitig wurden die entwickelten Lösungen in die Navigationssoftware Radar NX der Raytheon Anschütz GmbH integriert. Zur landseitigen Unterstützung erfolgte entsprechend die Integration in die VTS-Software STYRIS der AIRBUS Defence and Space GmbH. In mehreren Testkampagnen konnte in Real- und Simulationsumgebungen die Funktionsweise von MTCAS nachgewiesen werden.

Das Assistenzsystem ist in der Lage, die Schiffsführung in unterschiedlichen Verkehrssituationen zu unterstützen. Detektiert MTCAS die Möglichkeit der Gefahr eines Zusammen-

stoßes, wird die Brückenbesatzung hiervor gewarnt und erhält außerdem Vorschläge für sichere und KVR-konforme Ausweichtrajektorien, unabhängig von der Anzahl der beteiligten Schiffe. Die Entscheidung über die Durchführung von Ausweichmanövern liegt aber weiterhin allein bei der Schiffsführung, da MTCAS nicht eigenständig tätig wird. Ruderlagen- und Maschinenkommandos werden also weiterhin allein von der Schiffsführung gegeben.

DANKSAGUNG

Das Verbundprojekt MTCAS 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.

Die Projektpartner bedanken sich ebenfalls für die wertvolle und profunde Unterstützung der Scandlines Deutschland GmbH, der STENA Line GmbH & Co. KG und der JAKOTA Cruise Systems GmbH in Rostock, der Senckenberg-Gesellschaft in Wilhelmshaven sowie des Instituts für Biologie und Chemie des Meeres (ICBM) der Universität Oldenburg für deren stets unkompliziert gewährte Unterstützung bei der Durchführung des Projekts.

LITERATUR

[1] Baldauf M., Mehdi R., Fischer S. & Gluch M., "A perfect warning to avoid collisions at sea?" Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, vol. 52(124), no. 4, pp. 53-64, 2017.

[2] Baldauf, M.; Benedict, K.; (2018) Simulations for Ship Handling. Port & Technology International, Henley Media Group, London, Edition 77, Spring 2018

[3] Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Motz, F., & Schröder-Hinrichs, J. U. (2011). Collision avoidance systems in air and maritime traffic. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability (pp. 333–343). Sage Publications volume 225.

[4] Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Schaub, M., Baldauf, M., Müller, B. (2017). Innovative Fast Time Simulation Tools for Briefing/Debriefing in Advanced Ship Handling Simulator Training and Ship Operation. Transactions on Maritime Science, Vol 6(1). 24-38, doi:10.7225/toms.v06.n01.003

[5] Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., & Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: analysis of collisions at sea using the HFACS. Accident Analysis and Prevention, 59, 26–37.

[6] Christian Denker, Michael Baldauf, Sandro Fischer, Axel Hahn, Ralf Ziebold, Elke Gehrmann, Mika Semann (2016). e-Navigation based cooperative collision avoidance at sea: The MTCAS approach. Proceedings of ENC'16.

[7] Christian Denker, Axel Hahn (2016). MTCAS - An Assistance System for Maritime Collision Avoidance. 12th International Symposium on Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference.

[8] EMSA (2017) Annual overview of marine casualties and incidents. http://www.emsa.europa.eu/publications/technical-reports-studies-and-plans/item/3156-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2017.html

[9] Fischer, S.; Gluch, M.; Benedict, K.; Klaes, S.; Krüger, C.; Baldauf, M.: Application of Fast Time Manoeuvring Simulation for Training of Challenging Situations in Voyage Planning at Arrival & Departure and for Collision Avoidance. 20th International Navigation Simulator Lecturers' Conference; Auckland (New Zealand), September 10-13, 2018

[10] Mazen Salous, Axel Hahn, Christian Denker (2016). COLREGs-Coverage in Collision Avoidance Approaches: Review and Identification of Solutions. 12th International Symposium on Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference.

[11] Ziebold, R., Dai, Z., Noack, T. & Engler, E. (2010). Concept for an Integrated PNT Unit for Maritime Applications. Proceedings of 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technology Navitec 2010.

LAESSI –
LEIT- UND ASSISTENZSYSTEME ZUR ERHÖHUNG DER SICHERHEIT DER SCHIFFFAHRT AUF INLANDWASSERSTRASSEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX402A, B, D, Z

DR.-ING. MARTIN SANDLER	in-innovative navigation GmbH (Kornwestheim)
DR. RALF ZIEBOLD	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation (Neustrelitz)
DR. ANJA HESSELBARTH	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation (Neustrelitz)
JÜRGEN ALBERDING	Alberding GmbH (Wildau)
MAIK UHLEMANN	Alberding GmbH (Wildau)
MICHAEL HOPPE	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Fachstelle für Verkehrstechniken (Koblenz)

EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Binnenschifffahrt in Deutschland ist ein wichtiger Verkehrsträger. Sie hat 2017 8,3 % der gesamten Verkehrsleistung erbracht, das entspricht 55,5 Milliarden Tonnenkilometern [DESTATIS2018]. Dabei ist die Binnenschifffahrt der Verkehrsträger mit dem niedrigsten spezifischen Energieverbrauch. Die Transportleistung der Binnenschifffahrt stagniert in den letzten Jahren.

Im Bereich der Binnenschifffahrt kam es in den letzten Jahren immer wieder zu folgenschweren Unfällen von Schiffen an Brücken. Steuerhäuser der Schiffe kollidierten mit Brückenüberbauten, da die Steuerhäuser nicht oder nicht rechtzeitig abgesenkt wurden. Hierbei wurden die Steuerhäuser der Schiffe oft vollständig zerstört, teilweise auch mit Personenschäden. Für leicht konstruierte Brücken, wie z. B. Fußgänger- und Fahrradbrücken kann dieses Szenario auch eine Gefahr für die Brücke selbst darstellen.

Die Binnenschifffahrt steht im Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern. Daher ist es wichtig, dass auch in der Binnenschifffahrt neue Entwicklungen umgesetzt werden, um die Leistungsfähigkeit und Sicherheit dieses Verkehrsträgers zu steigern. Insbesondere im Bereich der Lastkraftwagen sind eine ganze Reihe von Entwicklungen im Gang, die Fahrt teilweise zu automatisieren.

Für die Binnenschifffahrt wird es immer schwieriger, geeignetes Personal für den Einsatz auf den Schiffen zu finden Gleichzeitig steigt die Größe der Schiffe, die so die vorhandenen Dimensionen der Wasserstraße maximal ausnutzen, um einen effizienten Transport zu ermöglichen.

Die konkreten Anforderungen aus den Unfällen mit den Brückenüberbauten sowie die allgemeine Situation der Binnenschifffahrt führen zu dem Bedarf, die Binnenschifffahrt durch neuartige Assistenzsysteme zu unterstützten, und damit den Betrieb der Schiffe sicherer und gleichzeitig effizienter zu machen.

Gleichzeitig stehen eine Reihe von Technologien zur Verfügung, die die Basis für neuartige Assistenzfunktionen für die Binnenschifffahrt bilden.

Im Bereich der Satellitennavigation können leistungsfähige Empfänger mehrere Frequenzen der Navigationssignale auswerten. Darüber hinaus ist die gleichzeitige Nutzung von verschiedener Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS, BEIDOU und GALILEO) möglich. Eine Auswertung an Bord auf Basis von Real Time Kinematic (RTK)-Verfahren erlaubt eine Positionsgenauigkeit im Dezimeter und Zentimeterbereich. Auf Basis von Phasenauswertungen ist darüber hinaus eine Richtungsbestimmung des Schiffskörpers mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von 0,1 Grad möglich.

Die Automatic Identification System (AIS)-Technologie ist mittlerweile Pflichtausrüstung auf Binnenschiffen. Zur Anzeige der AIS-Daten kommt in der Regel ein Inland-ECDIS Kartenanzeigesystem zum Einsatz. Entlang der größeren Wasserstraßen sind sogenannte AIS-Basisstationen eingerichtet, die dort eine lückenlose Erfassung des Verkehrs erlauben.

Im Bereich der International Maritime Organization (IMO) wird schon seit Jahren an einer Weiterentwicklung des AIS-Standards gearbeitet. Dieser wird als VHF Data Exchange System (VDES) bezeichnet und enthält neben dem standardisierten AIS zusätzliche Frequenzkanäle für eine deutlich höhere Datenübertragungskapazität. Der neue Standard soll bis 2020 in Kraft treten. Es ist wichtig, für diese Technologie Nutzungsmöglichkeiten, insbesondere auch im Bereich der Binnenschifffahrt, aufzuzeigen sodass entsprechende Dienste bei einer Verteilung der Übertragungskapazitäten mit in die Überlegungen aufgenommen werden können.

An Bord des Schiffes ist das Navigationsradar der primäre Sensor für die Erfassung der Navigationsumgebung. Dieser Sensor kann einen Bereich ab 20 m Entfernung von der Radarantenne bis zu mehreren Kilometern abdecken. Mit modernen Laserscannern stehen Sensoren zur Verfügung, die als Ergänzung den Nahbereich, zwischen 0 und ca. 50 Metern Entfernung, abdecken können.

SYSTEMAUFBAU

Eine wichtige Funktion, die im Rahmen dieses Projekts betrachtet wurde, ist die Überwachung der Integrität einer GNSS-Lösung. Die in diesem Projekt die realisierten Assistenzfunktionen basieren auf den Ergebnissen der GNSS-Auswertung. Daher wird es für den Nutzer immer wichtiger eine Kontrolle zu haben, ob man sich auf die Ergebnisse der GNSS-Auswertung verlassen kann. Genau dies leistet die Integritätskontrolle, für die in LAESSI ein umfassendes Konzept realisiert wurde.

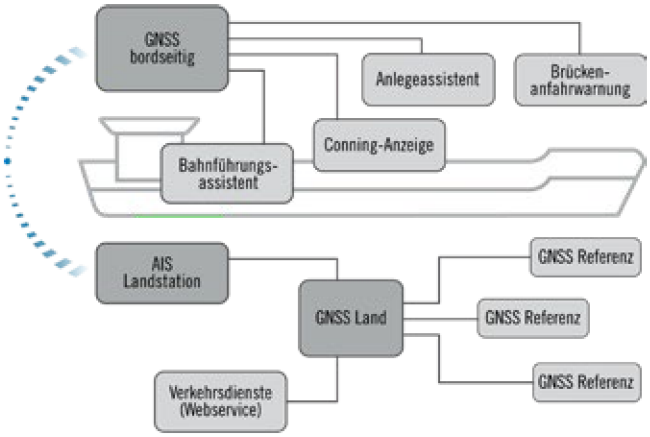


Abb. 1: LAESSI Systemaufbau

Abbildung 1 zeigt den Systemaufbau im Projekt LAESSI. An Bord des Schiffes werden folgende neuartige Assistenzfunktionen realisiert: Brückenanfahrwarnung, Anlegeassistent, Conning-Anzeige sowie eine automatische Bahnführung.

Diese Funktionen stützten sich auf die Ergebnisse der GNSS-Auswertung an Bord des Schiffes. Neben Position, Höhe und Vorausrichtung des Schiffes ist die Integritätsinformation ein wichtiges Ergebnis der GNSS-Auswertung. Die RTK–GNSS Auswertung braucht spezielle Korrekturdaten, die im Falle von LAESSI über VDES zur Verfügung gestellt werden.

Ein AIS-Transponder an Bord des Schiffes empfängt die Korrekturdaten, die von der landseitigen Basisstation ausgestrahlt werden. Darin ist bereits eine Integritätsinformation basierend auf der landseitigen Verarbeitung enthalten. Neben den Korrekturdaten werden auch Informationen zur Wasserstraße übertragen.

Die landseitige Komponente beinhaltet die Bereitstellung und Überprüfung der Korrekturdaten, die für die RTK-Auswertung benötigt werden. Basierend auf verschiedenen Referenzstationen erfolgt eine Bestimmung und Überprüfung der Korrekturdaten, die der AIS-Basisstation zur Verfügung gestellt werden. Gleichzeitig werden von RIS-Diensten Informationen über die Wasserstraße abgefragt und mit an Bord übertragen.

LANDSEITIGER DIENST UND DATENÜBERTRAGUNG

Basierend auf dem entwickelten Konzept der Fahrerassistenzsysteme, sind die Anforderungen an den landseitigen Dienst abgeleitet worden. Ziel dieses Dienstes ist die Bereitstellung von integritätsgeprüften GNSS-Korrekturdaten in Verbindung mit aktuellen Wasserstraßeninformationen. Des Weiteren galt es eine zuverlässige Kommunikation über AIS/VDES mit hohen Datenraten (bis zu 9600 bps), einer hohen Zuverlässigkeit (24/7) und einer möglichst geringen Verzögerung (<4 s) zu realisieren. Aus dem Systemaufbau in

Abbildung 1 ist zu erkennen, dass der landseitige Dienst die Schnittstelle zwischen den existierenden Verkehrs- und GNSS-Positionierungsdiensten und der AIS/VDES-Kommunikationsinfrastruktur bildet.

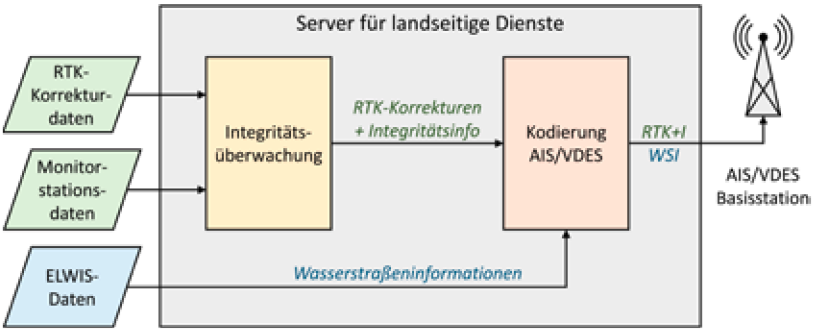


Abb. 2: Detaillierter Systemaufbau des landseitigen Dienstes

Der Server des landseitigen Dienstes realisiert den Bezug der GNSS-RTK-Korrekturdaten von externen Dienstanbietern, wozu unter anderem der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) zählt. Hierbei steht ein landesweites Netz von Referenzstationen zur Verfügung bzw. die Korrekturen werden für einen frei wählbaren Ort generiert – in diesem Vorhaben die Standorte der AIS-Basisstationen (Prinzip der virtuellen Referenzstation (VRS)). Dies wurde für die Integrationstests im Oktober 2017 am Main für fünf AIS-Standorte realisiert und ist schematisch in der Karte in Abbildung 3 dargestellt.

Abb. 3: Aufbereitung der RTK-Korrekturdaten für die AIS-Standorte

Um die Güte der Korrekturdaten beurteilen zu können, werden diese einer Integritätsüberwachung unterzogen, d. h. die Wirkung der Korrekturdaten wird vor deren Aussendung geprüft (Pre-Broadcast Monitoring). Hierfür wird eine RTK-Positionierung mit Daten einer unabhängigen Monitoringstation durchgeführt und hinsichtlich definierter Qualitätsmerkmale (Fix-Status, Lage- und Höhenabweichung, Anzahl Satelliten, ...) beurteilt. Das entwickelte Integritätskonzept unterstützt dabei sowohl eine Software- als auch eine Hardware-Lösung und setzt auf existierende Protokolle und Datenformate auf (Abbildung 4). Als Ergebnis steht ein aufbereiteter Datenstrom zur Verfügung, welcher kodierte Integritätsinformationen enthält. Die Verwendbarkeit der Korrekturdaten wird somit für den Endnutzer gewährleistet (Statusflags).

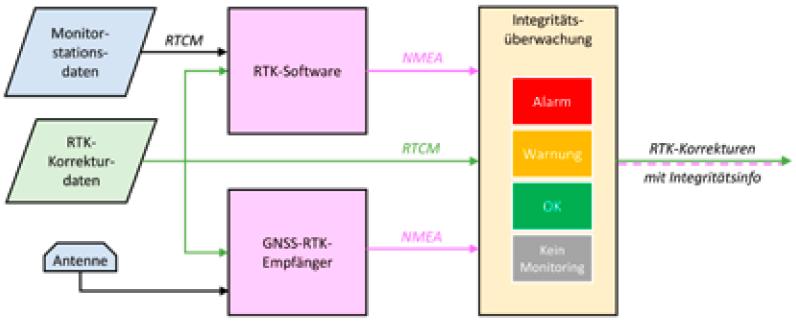


Abb. 4: Flussdiagramm Integritätskonzept

Der Server des landseitigen Dienstes realisiert auch die Bereitstellung von aktuellen Wasserstraßeninformationen. Dazu zählen neben den Nachrichten für die Binnenschifffahrt (NfB) auch Daten von Pegelmessstellen entlang der Flussläufe. Diese Informationen sollen zur Anzeige und Warnung im bordseitigen Assistenzsystem genutzt werden, daher gilt es alle wesentlichen und wichtigen Informationen aus den NfBs zu extrahieren, zu kodieren und zu übermitteln. Die Grundlage für den Inhalt der Nachrichten bildet der Standard „Notices to Scippers (v3.0)", der eine Komponente der europäischen River Informationen Services (RIS) darstellt. In Deutschland dient der Elektronische Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS) der WSV als Bezugsquelle für die NfBs und Pegeldaten. Über die Schnittstelle dieses Online-Services wurden gezielt Abfragen für Nachrichtentypen, Gültigkeitsdauer und Wasserstraßenabschnitte gestellt und dann entsprechend den AIS-Standorten zugeordnet (vergleiche Abbildung 3).

Für die Aussendung der integritätsgeprüften GNSS-RTK-Korrekturdaten sowie der Wasserstraßeninformationen über AIS wird die Message Type #8 (Binary Message) verwendet. Diese bietet den Rahmen für beliebige Anwendungsdaten im Rahmen sogenannter „Application Specific Messages (ASM)". Da die bisher beschriebenen ASMs hinsichtlich Art und Umfang für die hier entwickelten Assistenzsysteme ungeeignet waren, wurden neue ASMs definiert. Für die Wasserstraßeninformationen wurde basierend auf der Referenz-

tabelle des RIS-Standards eine Bit-Kodierung abgeleitet, welche eine sehr kompakte Übertragung relevanter Meldungen erlaubt. Die Korrekturdaten, welche im RTCM-Format vorliegen, werden als kompletter Datenblock kodiert, was aufgrund der Datenmenge (bis zu 8232 Bits) eine Aufteilung dieser auf mehrere ASMs nötig werden ließ. Eine variable Belegung der AIS-Kanäle ermöglicht des Weiteren eine sehr effiziente Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

Eine Applikation an Bord des Schiffes empfängt die AIS-Datensätze, dekodiert diese und stellt die enthaltenen Daten den jeweiligen Systemkomponenten bereit (PNT, Assistenzfunktionen).

NUTZUNG VON VDES ZUR ÜBERTRAGUNG DER KORREKTURDATEN

Für die Assistenzfunktionen an Bord, die den Schiffsführer zuverlässig unterstützen sollen, sind sowohl präzise, integritätsgeprüfte GNSS-Korrekturdaten, als auch relevante Wasserstraßeninformationen (WSI) erforderlich. Bei den WSI handelt es sich um aktuelle Informationen zu Einschränkungen im Fahrwasser (z. B. geänderte Brückendurchfahrtshöhen) und um aktuelle Pegeldaten. Diese Informationen werden zeit- und ortsspezifisch ausgewertet und für die Aussendung mittels AIS/VDES auf einem Server bereitgestellt. Eine Übersicht der landseitigen Systemarchitektur ist in Abbildung 5 dargestellt.

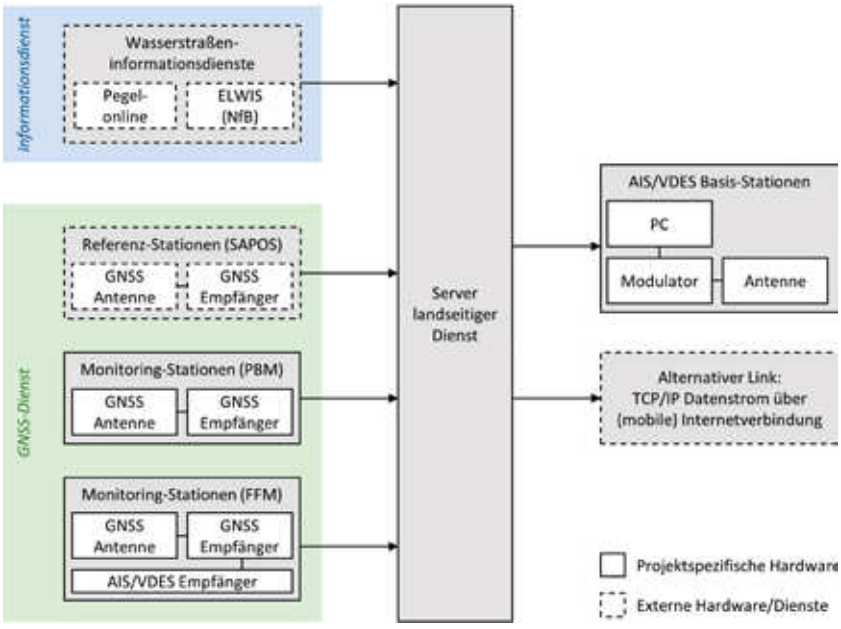


Abb. 5: Landseitige Systemarchitektur

AIS ist in der See- und Binnenschifffahrt bereits für den Austausch von Navigationsdaten zwischen Schiffen, zwischen Schiff und Land und zwischen Land und Schiff standardisiert. Zu diesem Zweck haben einige Länder Netzwerke an Land installiert, welche den Daten-

austausch ermöglichen. Die deutsche Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes hat ein AIS-Netzwerk errichtet, das die Küste sowie größere Binnenwasserstraßen abdeckt. In Verbindung mit einer Ausrüstungspflicht ist AIS eine geeignete Möglichkeit für die geplante Übertragung von Korrekturen und Wasserstraßeninformationen. Nichtsdestotrotz ist die Datenkapazität des bestehenden AIS beschränkt. Insbesondere die erforderliche hohe Aktualisierungsrate würde eine große AIS-Datenlast verursachen. Im Rahmen des LAESSI-Projekts ist VDES für die Datenübertragung von Land zu Schiff vorgesehen. VDES beinhaltet neben den Standard-AIS-Frequenzen weitere terrestrische Frequenzkanäle die gebündelt eine deutliche höhere Datenübertragungskapazität ermöglichen. VDES befindet sich derzeit noch in der Standardisierungsphase, sodass noch keine land- und bordseitigen Sender/Empfänger für die Übertragung verwendet werden konnten. Für die Datenübertragung wurden daher im Test- und Demonstrationsgebiet zusätzliche AIS-Landstationen errichtet, welche auf den Frequenzen des terrestrischen VDE-Kanals arbeiten. Dies ermöglicht die Verwendung der vollen AIS-Datenübertragungskapazität ohne den eigentlichen AIS-Dienst zu stören. Durch die Verwendung von AIS-Technik konnten die Daten an Bord mit üblichen AIS-Standard-Geräten empfangen und weiterverarbeitet werden. Nachteilig bei dieser Lösung ist die zu geringe Datenübertragungskapazität für die RTK-Korrekturdaten. Wie die Auswertung von Messfahrten zeigte, wurde durch die geringe Bandbreite des Datenkanals das Datenalter der RTK-Daten negativ beeinflusst.

GNSS VERARBEITUNG UND INTEGRITÄTSMONTORING AN BORD

Grundlage für die Fahrerassistenzfunktionen ist Bereitstellung präziser Positions-, Navigations- und Zeit (PNT)-Daten. Die Genauigkeiten von 1-3 m der bisher genutzten codebasierten Ansätze in der Binnenschifffahrt sind für diese Anwendungen nicht ausreichend, sodass ein Übergang zu den deutlich genaueren phasenbasierten Verfahren notwendig ist. Das in diesem Projekt verwendete RTK-Verfahren ermöglicht neben der cm-genauen Positionsbestimmung auch ein schnelles Erreichen (< 10 s) dieser Genauigkeit nach einem vollständigen Signalabriss, z. B. verursacht durch Brückendurchfahrten. Voraussetzung dafür sind Korrekturdaten einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes welche in Echtzeit bereitgestellt werden müssen (siehe Abschnitt Landseitiger Dienst und Datenübertragung). Die Herausforderung bei der RTK-Auswertung ist das zuverlässige Festsetzen der Trägerphasenmehrdeutigkeit, denn nur so kann die angestrebte Genauigkeit von wenigen cm erreicht werden. Um dies zu erreichen wird folgender Ablauf angewendet (Abbildung 6).

Basierend auf den Korrekturdaten sowie den gewonnenen Beobachtungsdaten des Schiffes sowie den Satellitenkoordinaten werden im ersten Schritt die Positionen ggf. Geschwindigkeiten und die Phasenmehrdeutigkeiten mittels eines Navigationsalgorithmus geschätzt. Da die so erhaltenen Positionsgenauigkeiten nicht ausreichend sind, müssen im nächsten Schritt die Trägerphasenmehrdeutigkeiten festgesetzt werden. Nach einer erfolgreichen Festsetzung können die geschätzten Positionen und Geschwindigkeit cm-genau bestimmt werden.

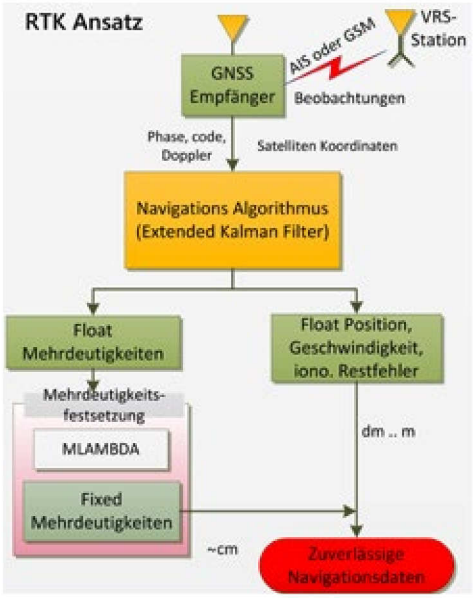


Abb. 6: RTK-basierte präzise Positionsbestimmung

Um zu beurteilen ob die Mehrdeutigkeiten zuverlässig festgesetzt wurden und eine genaue Positionsbestimmung, auf die sich der Schiffsführer verlassen kann, vorliegt, wurde eine Integritätsbewertung durchgeführt (Abbildung 7).

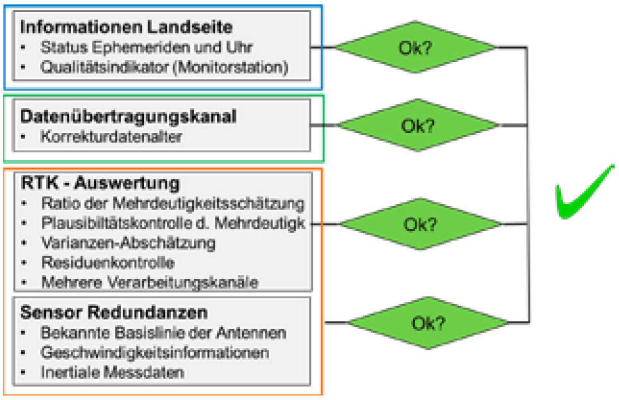


Abb. 7: Integritätskonzept

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit werden zunächst die von der Landseite bereitgestellten Informationen berücksichtigt (siehe Abschnitt Landseitiger Dienst und Datenübertragung). Ebenso fließt das Alter der Korrekturdaten mit in die Bewertung ein. Die RTK-Auswertung selbst liefert Parameter welche in die Bewertung der Zuverlässigkeit mit einbezogen werden können. Dies sind vor allem die Plausibilität der festgesetzten Mehrdeutigkeiten sowie die Residuen und Varianzen, die sich aus der Schätzung ergeben.

Zusätzlich können noch andere Sensoren oder andere Informationen, wie eine inertiale Messeinheit, mit einbezogen werden.

Verschiedene Validierungsmesskampagnen haben gezeigt, dass bei einer kontinuierlichen und stabilen Korrekturdatenübertragung zuverlässige und hochgenaue PNT-Daten bereitgestellt werden. Stehen diese Korrekturdaten nicht in der gewünschten Qualität und Updaterate zur Verfügung kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit nicht mehr garantiert werden (siehe Abschnitt NUTZUNG VON VDES ZUR ÜBERTRAGUNG DER KORREKTURDATEN).

ASSISTENZSYSTEME FÜR DIE BINNENSCHIFFFAHRT

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Assistenzfunktionen realisiert:

Der Anlegeassistent stellt dem Schiffsführer die Abstände der Schiffswand zu Spundwänden und anderen relevanten Objekten entlang der Wasserstraße dar. Dazu nutzt er zwei verschiedene Herangehensweisen. Einerseits werden aufgrund der mit GNSS bestimmten Lage des Schiffskörpers die Abstände zu den Konturen in der Karte berechnet. Gleichzeitig wird mit einem Laserscanner der Abstand zu dem nächsten Objekt in der Umgebung gemessen. Damit können dann auch andere Schiffe erfasst werden.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Installation des Laserscanners am Bug des Schiffs. Er erfasst Messungen in einer senkrechten Ebene rechtwinklig zur Schiffslängsachse. Der Scanner hat freie Sicht nach links, rechts und auch nach oben.

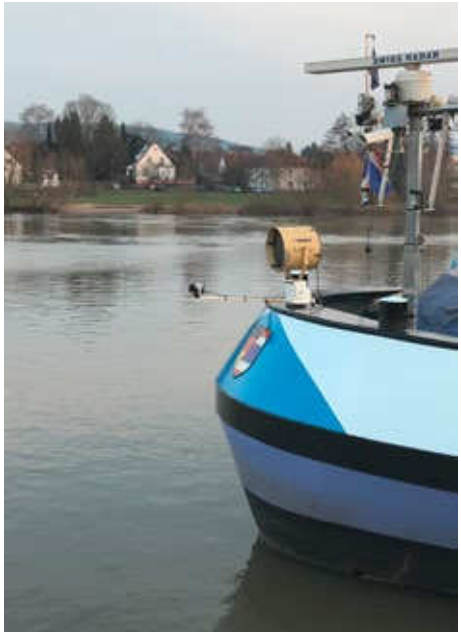


Abb. 8: Montage Laserscanner an einem Erprobungsschiff

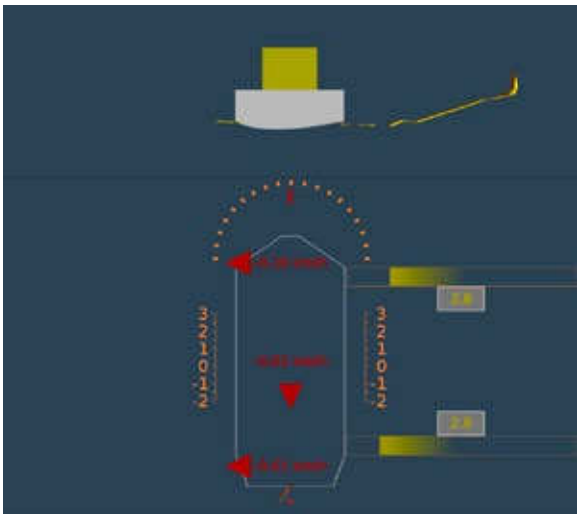


Abb. 9: Anzeige Anlegeassistent, Laserscanner-Messung und aus GNSS berechnete Abstände

Abbildung 9 zeigt eine Situation in einem Hafenbereich mit einem geböschten Ufer. Das Bild des Laserscanners ist im oberen Bereich als gelbe Punkte wiedergegeben. In den Laserscanner-Messungen rechts wird das Ansteigen der Böschung gut abbildet. Die Laserscannerpunkte direkt rechts und links des Schiffes stammen von Schaum auf dem Wasser, der vom Bugstrahlruder verursacht wurde. Sonst werden von der Wasseroberfläche kaum Messungen im Laserscannerbild verursacht.

Auch andere Schiffe werden vom Laserscanner gut erkannt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für eine dichte Begegnungssituation auf der Wasserstraße, links ist der Bug eines anderes Schiffs und rechts Gebüsch am Ufer zu erkennen. Der eingesetzte Laserscanner hat eine Reichweite von 20 Metern.

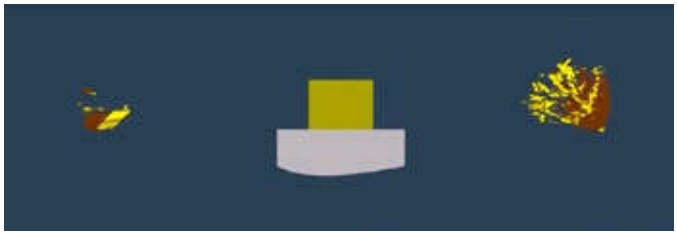


Abb. 10: Laserscannerbild bei Begegnungssituation

Eine Brückenanfahrwarnung zeigt schon in großer Entfernung vor der Brücke an, ob eine sichere Passage möglich ist.

Abbildung 11 zeigt eine Situation bei der eine Warnung ausgegeben wird. Die Höhe des Steuerhauses des eigenen Schiffs wird im oberen Teil, innerhalb der Darstellung der Brücke,

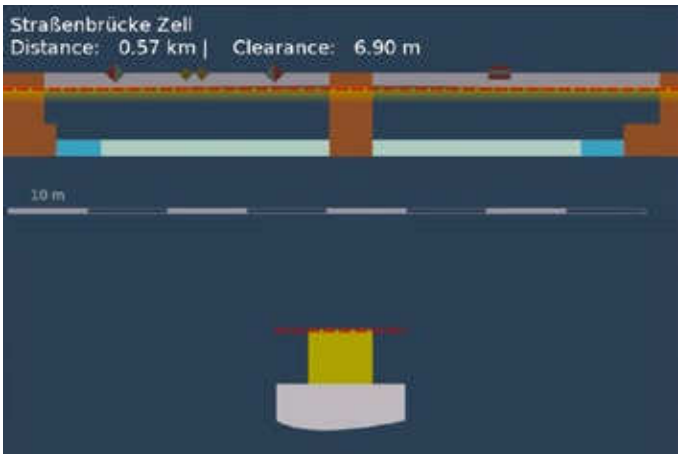


Abb. 11: Anzeige Brückenanfahrwarnung

durch den gelben Balken dargestellt. Er ist höher als die Alarmhöhe für diese Brücke, die durch die gestrichelte rote Linie im oberen Bildbereich dargestellt wird. Im unteren Bildbereich wird analog dazu das Schiff selbst dargestellt, die Höhe des gelben Balkens entspricht der Steuerhaushöhe. Auch hier wird zusätzlich die Alarmhöhe der Brücke als gestrichelte rote Linie eingeblendet. Die Informationen ganz oben in der Anzeige, der Brückenname und die Clearance, werden aus der Karte der Wasserstraße entnommen. Auch die Schilder und die Brückenpfeiler werden auf Basis der Inland-ECDIS-Karte gezeichnet. Die Brückenkontur selbst stammt aus externen Daten, die die WSV mit Hilfe von Laserscanner-Messungen bereits im Vorfeld des Projekts erstellt hatte.

Die Alarmierung vor einer Brückenanfahrwarnung ist in zwei Stufen organisiert, zunächst erfolgt eine Warnung, danach ein Alarm. Die Warnung bzw. Alarmierung erfolgt im Bildschirm und durch akustische und optische Signale.

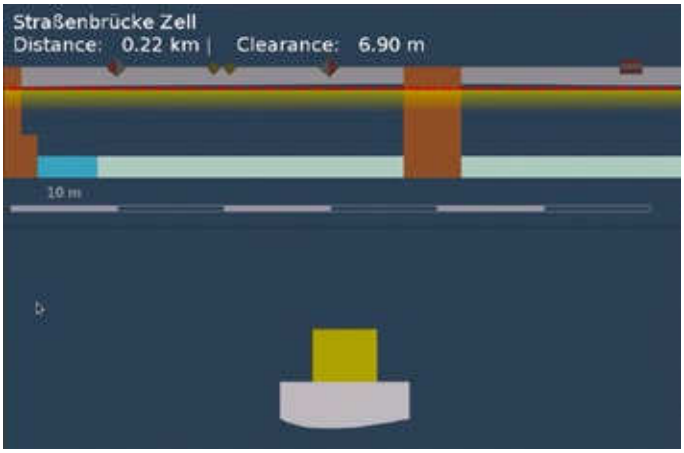


Abb. 12: Vorbereitung Brückenpassage

In Abbildung 12 hat der Schiffsführer das Steuerhaus bereits abgesenkt, der gelbe Balken ist jetzt unterhalb der Alarmlinie, die Einblendung der roten Linie unten ist entfallen. Gleichzeitig wurde die Brückendarstellung auf die relevante Durchfahrtsöffnung hin ausgerichtet und vergrößert.

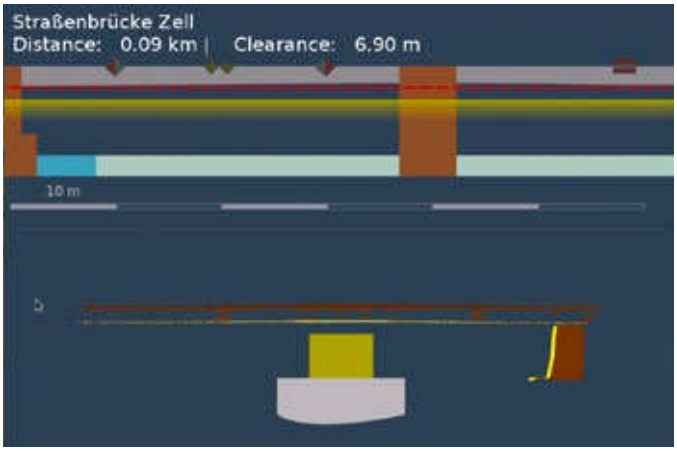


Abb. 13: Brückenpassage

In Abbildung 13 befindet sich das Schiff am Anfang der Brückenpassage. Der vor dem Bug montierte Laserscanner erfasst in diesem Moment auch den Brückenüberbau sowie rechts den Brückenpfeiler.

Abb. 14: Brücke mit temporärer Einschränkung der Durchfahrtshöhe

Durch Bauarbeiten an Brücken kann es zu temporären Einschränkungen der Durchfahrtshöhe kommen. An Bord erfolgt die Verknüpfung der über VDES übertragenen NTS-Nachrichten mit der Information der Brücke: Statt der nominellen Durchfahrtshöhe von 6,70 m stehen nur 4,68 m zur Verfügung.

Die Conning-Anzeige dient dazu, dem Schiffsführer die Bewegung des Schiffes zu verdeutlichen. Aufgrund der genauen GNSS-Position und -Orientierung ist auch eine entsprechend genaue Erfassung der Bewegung möglich. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Situation beim Drehen des Schiffs im Oberwasser einer Schleuse. Rechts unten innerhalb des Schiffssymbols wird die Längsgeschwindigkeit sowie die Quergeschwindigkeit am Bug- und Heck

angezeigt. Ebenfalls angeschlossen ist der Wendeanzeiger für die Drehgeschwindigkeitsanzeige (vor dem Schiffssymbol) sowie der Ruderlagenanzeiger, dargestellt am Heck des Schiffssymbols.

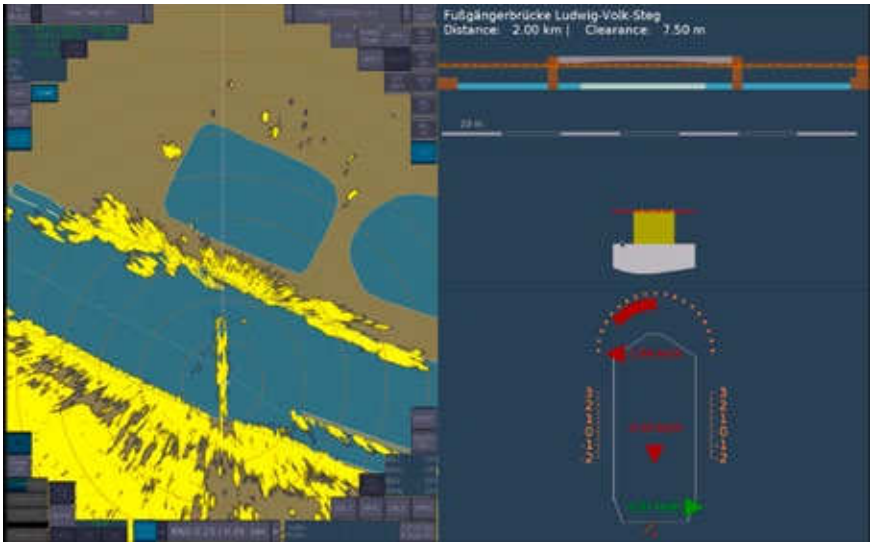


Abb. 15: Conning-Anzeige beim Wenden

Die Darstellung der Information zur Schiffsführung erfolgt auf zwei Monitoren, die, wie auf Binnenschiffen üblich, in der Portrait-Orientierung betrieben werden. In dem Bildschirmfoto wird die Darstellung beider Monitore nahtlos aneinander gefügt.

Während die bisher dargestellten Assistenzfunktionen den Schiffsführer durch neue Anzeigen unterstützen, verändert der Bahnführungsassistent die Arbeit des Schiffsführers wesentlich. Bisher erfolgt die Steuerung des Schiffs hauptsächlich über einen Wendegeschwindigkeitsregler, den sogenannten Autopilot. Um annäherungsweise geradeaus zu fahren, wird eine Wendegeschwindigkeit von 0 Grad pro Minute eingestellt. Eine Information über die zu fahrende Bahn ist nicht vorhanden. Der Bahnführungsassistent stellt diese Verbindung her. Er verwendet spezielle gekrümmte Bahnkurven, die sich gut an den Verlauf natürlicher Flüsse anpassen. Diese Bahnkurve wird an das Bahnführungssystem übertragen, das daraus unter Berücksichtigung der fahrdynamischen Eigenschaften des Schiffs eine Vorgabe für die Wendegeschwindigkeit ermittelt, die dem vorhandenen Autopilotsystem als Sollwert zur Verfügung gestellt wird.

Um auf die Verkehrssituation reagieren zu können, ist der Schiffsführer in der Lage, die aktuelle Bahnvorgabe seitlich zu verschieben. Das Schiff schwenkt dann automatisch auf die neue „Fahrspur" ein. Der Schiffsführer wird daher stark entlastet und kann sich auf die Beobachtung der Verkehrssituation konzentrieren.

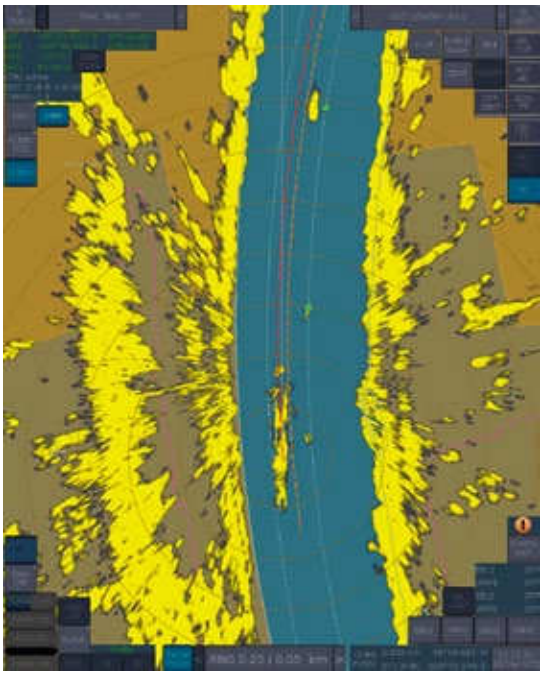


Abb. 16: Bahnführungsassistent bei Fahrt auf dem Main bei Würzburg

Abbildung 16 zeigt eine Situation mit der Steuerung des Schiffes durch den Bahnführungsassistent. Als braune gestrichelte Linie im Fluss ist die gespeicherte Bahnvorgabe dargestellt. Die aktuelle Leitlinie ist rot dargestellt. Der Schiffsführer hat sie in dieser Situation etwas nach links versetzt um weiter in der Mitte des Fahrwassers zu fahren.

Wichtig für die Beurteilung der Verkehrssituation ist die Darstellung des Radarbilds. Daher wurde die Anzeige des Bahnführungsassistenten auf der Basis der überlagerten Darstellung von Karte und Radarbild realisiert.

Die Arbeiten im Rahmen des Projekts LAESSI wurden auf unterschiedlichen Schiffen in der Praxis erprobt, Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen einige davon.

Abb.17: MS Naab

Abb. 18: Koppelverband "El Nino"

Abb. 19: MS Jenny

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt LAESSI hat gezeigt, dass die Fahrerassistenzfunktionen eine wertvolle Unterstützung für den Schiffsführer sein können. Hervorzuheben ist die umfangreiche praktische Erprobung der Verfahren auf verschiedenen Schiffen. Damit ist eine wichtige Basis gelegt, um derartige Systeme zukünftig in der Praxis der Binnenschifffahrt einsetzen zu können.

Das Projekt LAESSI ist ein gutes Beispiel für die Digitalisierung des Verkehrs auf Binnenwasserstraßen. Es werden verschiedene digitale Ressourcen genutzt und miteinander verknüpft um zu einem neuartigen System zu kommen: Karten der Wasserstraßen,

Informationen über Brückenkonturen, GNSS Korrekturdaten und Nachrichten an die Binnenschifffahrt bilden die Grundlage, um neuartige Assistenzfunktionen zu realisieren. Umgesetzt werden die Assistenzfunktionen durch eine neuartige, gemeinsame Verarbeitung und neuartige Einrichtungen.

DANKSAGUNG

Ein herzlicher Dank geht an die Schiffsführer und Schiffsbesatzungen für die Unterstützung unserer Arbeiten bei der praktischen Erprobung: Der Besatzung der MS Bingen, der Besatzung der MS Naab, der Besatzung des Schulschiffs „Prinzess Maxima", Herrn Rolf Bach von Koppelverband „El Nino" sowie Herrn Albrecht Scheubner und seiner Frau Karin von der MS Jenny.

LITERATUR

[1] DESTATIS2018
Verkehr aktuell 07/2018, DESTATIS, Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 1.1

WATERTRUCK –
LEICHTBAU-BINNENSCHIFF FÜR CONTAINERTRANSPORT MIT SCHIFFSEIGENEM HANDLINGSYSTEM ZUR BE- UND ENTLADUNG OHNE HAFENINFRASTRUKTUR

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX404A-E

DR. PETER KAUFMANN	SMK Ingenieure GmbH & Co. KG (Chemnitz)
STEFAN KRAUSE	SMK Ingenieure GmbH & Co. KG (Chemnitz)
HOLGER HEIDENREICH	SET Schiffbau- u. Entwicklungsgesellschaft Tangermünde mbH (Genthin)
DIRK PANNIER	KRAFOTEC GmbH (Wittenberg)
MATHIAS PFAFF	IFF Engineering & Consulting GmbH (Leipzig)
TOBIAS KUTZLER	Fraunhofer IFF (Magdeburg)
DR. THOMAS HIPKE	Fraunhofer IWU (Chemnitz)

EINLEITUNG

Der Containerumschlag nimmt in den zunehmend globalisierten Wirtschafts- und Handelsströmen eine immer stärkere Bedeutung ein. Die Verteilung der in den Seehäfen auflaufenden Güter erfolgt größtenteils über die Verkehrsträger LKW und Bahn und lediglich zu einem geringen Anteil über den Verkehrsträger Binnenschiff.

Um eine bessere Verteilung der Güterströme und eine Entlastung des Straßennetztes zu erreichen, wurde durch die Europäische Union mit dem White Book die Zielstellung der Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf Schiene und Schiff in Höhe von 50 % ausgegeben [1].

Auch die Bundesregierung sieht infolge des steigenden Güterverkehrsaufkommens die bessere Einbindung der Binnenschifffahrt in die Transportkette zur Entlastung des Straßenverkehrs als dringende Notwendigkeit an [2]. Die Effizienz der intermodalen Verkehrseinbindung der Binnenschifffahrt als Teil der Transportkette soll durch die Erhöhung ihres Anteils am Modal Split erreicht werden.

Ein zentrales Hemmis für die bessere Einbindung von Binnenschiffen in den Containertransport besteht in der Notwendigkeit aufwendiger Hafeninfrastruktur für den Containerumschlag am entsprechenden Umschlagstandort. Die für den Containerumschlag notwendige Infrastruktur, wie z. B. Containerbrücken, Binnenschifffahrtskräne oder Mobilkräne, ist in der Regel äußerst kostenintensiv und meistens an flussnahen Gewerbestandorten nicht vorhanden. Sind entsprechende Infrastrukturen vorhanden, wie in See- und Binnenhäfen, dann sind diese oftmals stark ausgelastet oder für den Containerumschlag auf Binnenschiffe nur begrenzt profitabel im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern.

Ein Ansatz zur Erhöhung des Anteils des Verkehrsträgers Binnenschiff am Modal Split ist die Entwicklung von innovativen Binnenschiffen mit bordeigenem Handlingssystem, welche den individuellen Containerumschlag an binnenflussnahen Gewerbestandorten sowie bestehenden Häfen ermöglichen. Abb.1 zeigt den Anteil der Binnenschifffahrt am Modal Split der Containerverkehre in Deutschland 2010 [3].

Abb. 1: Deutsche Seehäfen – Modal Split Containerverkehre, Containerumschlag Binnenhafen [3]

AUFGABENSTELLUNGEN UND ZIELE DES PROJEKTES

Das Ziel des WATERTRUCK-Projektes bestand in der Entwicklung eines innovativen Leichtbau-Binnenschiffes für den Containertransport mit einem schiffseigenem Handlingsystem zur Be- und Entladung ohne Hafenumschlagtechnik für die Nutzung vorhandener Gewerbestandorte an Binnengewässern für den Containerumschlag mit minimalen Infrastruktur-Aufwendungen und damit die Schaffung zusätzlicher Kapazitäten für die Binnenschifffahrt bei gleichzeitiger Entlastung der Straßentransporte und Erneuerung der Binnenschiffsflotte.

Die mit dem Verbundprojekt zu bearbeitenden FuE-Zielstellungen ergaben sich aus den Bedingungen des Container-Binnenschifftransportes wie dem geringen Schiffstiefgang, begrenzten Durchfahrtshöhen und wirtschaftlichen Mindestladungen sowie durch just-in-time Forderungen des Containerumschlags.

Für die Realisierung der angestrebten Projektzielstellungen war die grundlegende Entwicklung und Untersuchung innovativer superleichter Strukturen für ein flach gehendes Containerbinnenschiff mit Nutzung des Schiffsraumes für die Containerladung sowie eines leichten, bordeigenen Handlingssystems und des für dessen Betrieb notwendigen Schiffsstabilisierungssystems zur Gewährleistung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit bei Aufnahme erheblicher zusätzlicher Funktionen und daraus resultierender Lasten erforderlich.

PROJEKTERGEBNISSE

Mit dem Projekt wurde eine Anforderungsanalyse an die Binnen-Container-Schifffahrt in europäischen und außereuropäischen Einsatzgebieten durchgeführt und im Ergebnis daraus die Grundsatzparameter und -anforderungen an die WATERTRUCK-Schiffsgestaltung abgeleitet.

Für die Evaluierung des geeigneten Schiffstyps für das WATERTRUCK-System wurde für den Einsatz im Bereich der Bundesrepublik Deutschland die Güterverkehrsdichte auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen in Kombination mit den sich aus der Klassifizierung der Binnenwasserstraßen des Bundes ableitenden Einsatzmöglichkeiten für bestimmte Schiffstypen verglichen (s. Abb. 2). Daraus lässt sich ableiten, dass der Großteil der deutschen Binnenwasserstraßen sich mit dem Schiffstyp Johann Welker befahren lässt.

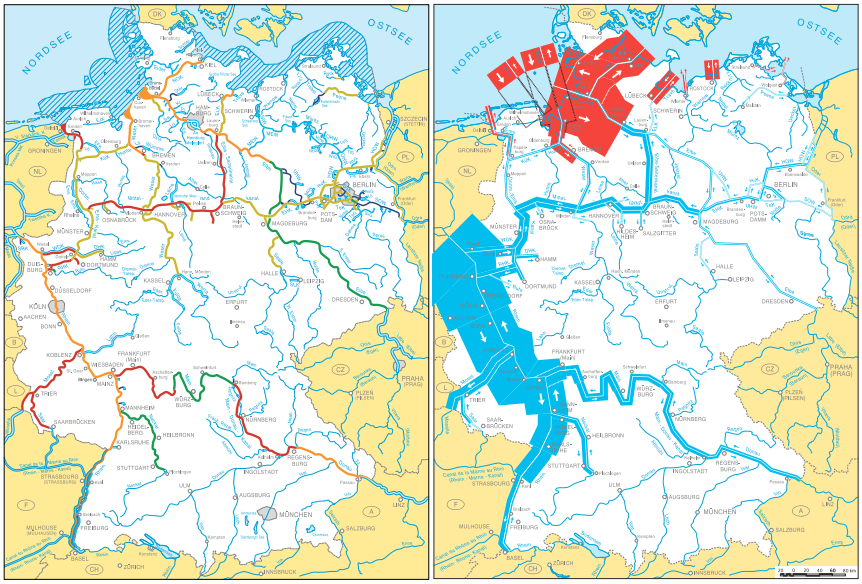


Abb. 2: Bestimmung der Einsatzgebiete des WATERTRUCK-Schiffes anhand der Klassifizierung der Binnenwasserstraßen des Bundes (links) [4] sowie der Güterverkehrsdichte der See- und Binnenschifffahrt auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen [5]

Eine Analyse der europäischen Wasserstraßen ergab, dass auch im europäischen Einsatzbereich der Schiffstyp Johann Welker zur flächendeckenden Nutzung des europäischen Wassernetzes als auch zur Erschließung von Bereichen mit Wachstumspotentialen am geeignetsten ist. Darüber hinaus wurden weitere umfassende Betrachtungen hinsichtlich potentieller globaler Einsatzgebiete (z. B. Brasilien, Indien, Russland) durchgeführt.

Weitere Grundsatzparameter bzw. - anforderungen an die Schiffsgestaltung sind die in Abb. 3 dargestellten Parameter Fahrwasserbreite, Fahrrinnentiefe sowie Brückendurchfahrtshöhen, welche die Schiffsgestaltung hinsichtlich Schiffsgröße, Krananordnung, Motorisierung und Tiefgang unmittelbar beeinflussen. Als entscheidender restriktiver Para-

meter wurde eine minimale Brückendurchfahrtshöhe von 5,25 m ermittelt, woraus sich eine 2-lagige Containerstapelung für den zu entwickelnden Schiffstyp ableiten lässt. In Einsatzbereichen ohne diesen restriktiven Parameter sollte die Containerstapelung aufgrund ökonomischer Betrachtungen jedoch auf 3 übereinander gestapelte Containerlagen dimensioniert werden.

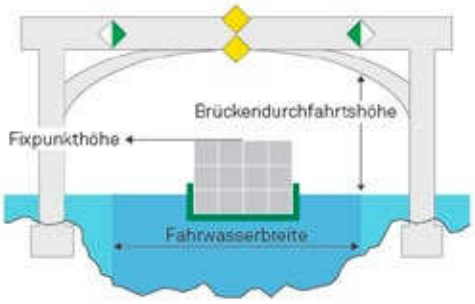


Abb. 3: Die WATERTRUCK-Schiffsgestaltung bestimmende Parameter [6]

Aufbauend auf die funktionalen Anforderungen an das WATERTRUCK-Schiff sowie die Ergebnisse der Analyse potentieller Einsatzgebiete wurde ein Container-Binnenschiff (Schiffstyp Johann Welker) mit einer Länge von 85 m, einer Breite vom 9,5 m, einem maximalen Tiefgang von ca. 2,5 m und einem Eigengewicht von ca. 440 t entwickelt. Dieses besitzt einen 61,3 m langen und 7,7 m breiten Laderaum und damit eine Container-Ladekapazität von 90 TEU bzw. 45 FEU (s. Abb. 4).

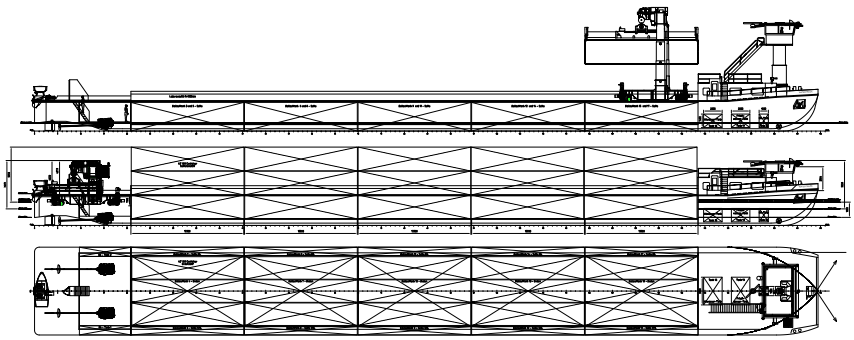


Abb. 4: Entwickeltes WATERTRUCK-Schiffskonzept (mit Bekranung) – Schiffstyp Johann Welker (Klasse IV)

Für die mit dem Projekt angestrebte Gewichtsreduzierung der Schiffskonstruktion wurden verschiedene Leichtbaumaßnahmen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Effektivität untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde eine Leichtbau-Hybridkonstruktion des Schiffsrumpfes unter Verwendung innovativer Sandwichmaterialien (Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches) entwickelt (s. Abb. 5). Diese finden Anwendung in der Schiffsinnenhülle, d. h. im Laderaumboden und Laderaumseitenbereichen, und ermöglichen durch ihre deutlich höheren Biegesteifigkeiten die Reduzierung versteifender Komponenten wie Stringer

wodurch sich signifikante Reduzierungen von Material und Fertigungsaufwand generieren lassen. Insgesamt konnte eine Gewichtsreduzierung von ca. 20% gegenüber einer Stahlkonstruktionsbauweise realisiert und damit die Grundlage für die Aufnahme der aus dem bordeigenen Handlingssystem resultierenden Lasten geschaffen werden.

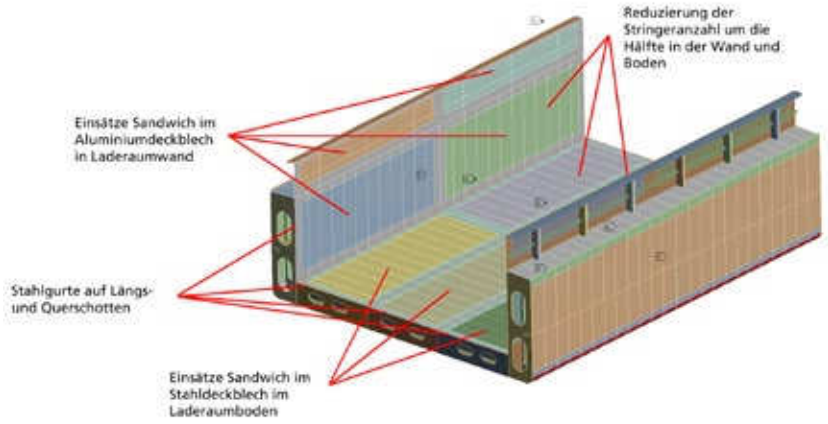


Abb. 5: Leichtbaumaßnahmen zur Gewichtsreduzierung des WATERTRUCK-Schiffsrumpfs

Die Entwicklung des bordeigenen Handlingssystems erfolgte aufbauend auf den sich aus dem WATERTRUCK-Gesamtsystem ergebenden funktionalen Anforderungen. Dazu gehörten das Handling unterschiedlicher Containerformate (20''-, 40''-Container), die Gewährleistung der beidseitigen Be- und Entladung, die Beibehaltung der Ladekapazität sowie die Gewährleistung des Durchfahrens minimaler Brückendurchfahrtshöhen und der Überbrückung von Höhendifferenzen zwischen Schiffsladeebene und Gewerbestandort.

Basierend darauf wurden die folgenden Konzeptvarianten für das Handlingssystem des WATERTRUCK-Schiffs erarbeitet:

› Portaldrehkran mit schiffsexterner landseitiger Stabilisierung
› Säulendrehkran mit horizontalem Ausleger und schiffsinterner Stabilisierung
› teleskopierbarer Portalkran mit schiffsinterner Stabilisierung
› Portaldrehkran mit schiffsinterner Stabilisierung
› selbstaufstellender Portalkran mit schiffsinterner Stabilisierung

Im Ergebnis der Evaluierung anhand ausgewählter Bewertungskriterien wurde die Konzeptvariante teleskopierbarer Portalkran für die weitere Projektbearbeitung ausgewählt und entsprechend der angestrebten Projektzielkriterien gezielt weiterentwickelt.

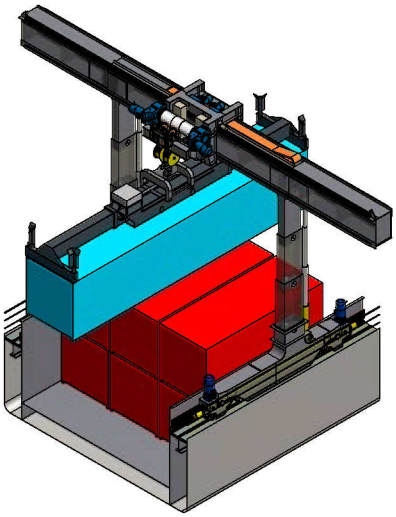


Abb. 6: Entwickelter verfahr- und teleskopierbarer Portalkran mit seitlich klappbaren Brückenträger, Winkelkatze und Containerspreader als Lastaufnahmemittel

Der mit dem Projekt entwickelte Portalkran (s. Abb. 6) ist längs des Laderaums verfahrbar und ermöglicht durch seine Positionierung im Schiffsheck des WATERTRUCK-Schiffs während des Fahrbetriebs die Beibehaltung der Ladekapazität vergleichbarer konventioneller Binnenschiffe ohne schiffseigenes Handlingssystem. Für die Einhaltung der angestrebten minimalen Brückendurchfahrtshöhen sowie die Überbrückung von Höhendifferenzen zwischen Ladeebene und Gewerbestandort wurde der Portalkran teleskopierbar gestaltet. Die Teleskopierbarkeit wird durch speziell entwickelte Portalstützen mit integriertem Verriegelungsmechanismus realisiert. Der beidseitige Containerumschlag wird über einen innovativen klapp- und verriegelbar gestalteten Brückenträger ermöglicht. Für die Gewährleistung eines möglichst mannlosen Containerumschlags wurde ein Universalspreader entwickelt, welcher den Umschlag unterschiedlicher Containergrößen ermöglicht. Die Einleitung der aus dem Kranbetrieb resultierenden statischen und dynamischen Lasten erfolgt über speziell entwickelte Lasteinleitungsgruppen (s. Abb. 7).

Für die Absicherung des positionsgenauen Containerumschlags in wirtschaftlichen Zeitintervallen wurden aufbauend auf der entwickelten geleichterten Schiffskonstruktion und der für den bordeigenen Containerumschlag erarbeiteten Portalkranlösung verschiedene schiffsexterne und schiffsinterne Stabilisierungssysteme hinsichtlich ihrer Eignung für das WATERTRUCK-System untersucht. Im Ergebnis wurde ein schiffsinternes Stabilisierungssystem entwickelt. Dieses besteht aus in die Schiffsdoppelhülle integrierten Schiffsballasttanks, einem Pumpsystem sowie der dazugehörigen Mess-, Steuer- und Regelungstechnologie. Durch die Stabilisierung infolge der Ballastierung mit variablen Ballastgewichten (Ballastwasser) konnte die Projektzielstellung eines selbst be- und entladenden Container-Binnenschiffes erfolgreich erreicht werden (s. Abb. 8).

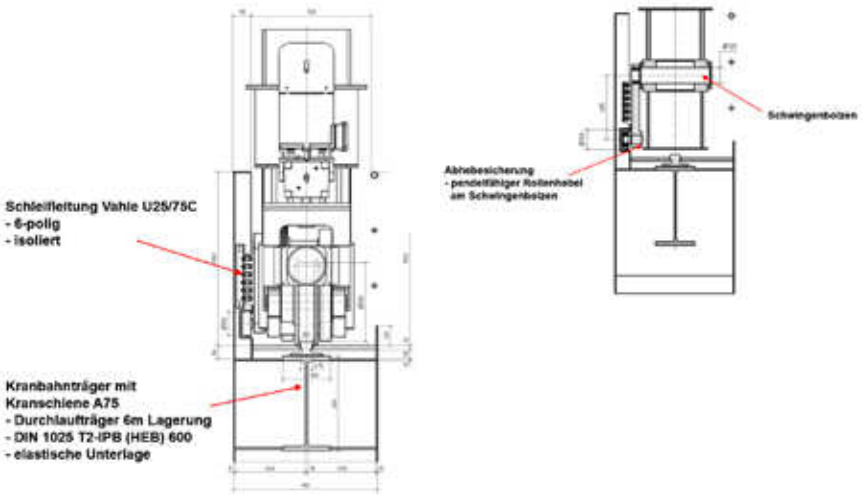


Abb. 7: Entwickelte Lasteinleitungsgruppen zur Anbindung des verfahr- und teleskopierbaren Portalkrans an die WATERTRUCK-Schiffsstruktur

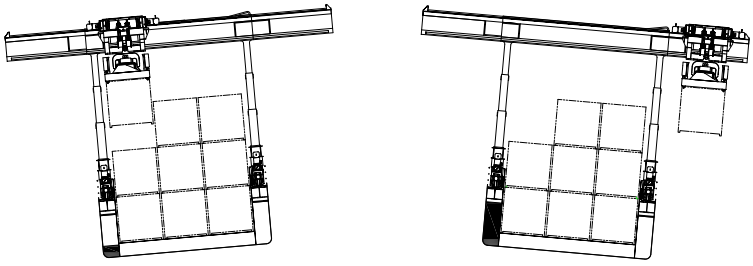


Abb. 8: Funktionsprinzip des entwickelten schiffsinternen Stabilisierungssystems

Für die Validierung der Umsetzbarkeit des WATERTRUCK-Systems wurden speziell ausgewählte Demonstratoren entwickelt und untersucht (s. Abb. 9).

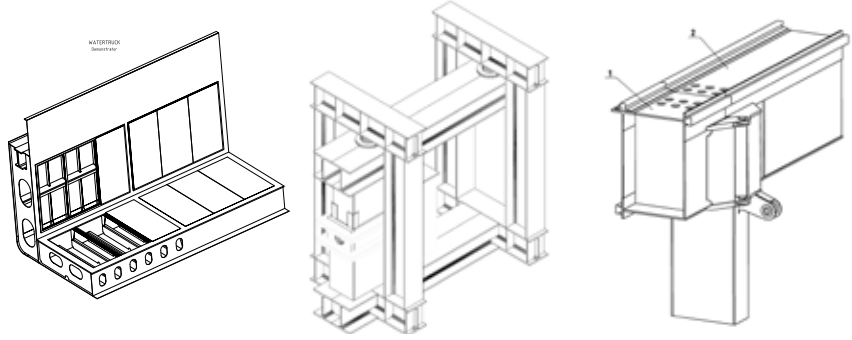


Abb. 9: Demonstratorkonzepte zur Validierung der Umsetzbarkeit des entwickelten WATERTRUCK-Schiffs (links: Schiffssektion, Mitte: Portalstütze inkl. Versuchsstand, rechts: Brückenträgersegment)

Die fertigungstechnische Umsetzbarkeit sowie die Realisierbarkeit der funktionalen Anforderungen konnten im Zuge der Demonstratorfertigung und -untersuchung erfolgreich nachgewiesen werden (s. Abb. 10).

Abb.10: Demonstratorbau zum Nachweis der technischen Realisierbarkeit der entwickelten Konzeptlösungen (links: Schiffssektion, rechts: Brückenträger)

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des WATERTRUCK-Projektes konnte ein innovatives Leichtbau-Container-Binnenschiff mit einem schiffseigenen Portalkran für den bordeigenen Containerumschlag für die Belieferung von flussnahen Gewerbestandorten entwickelt werden (s. Abb. 11).

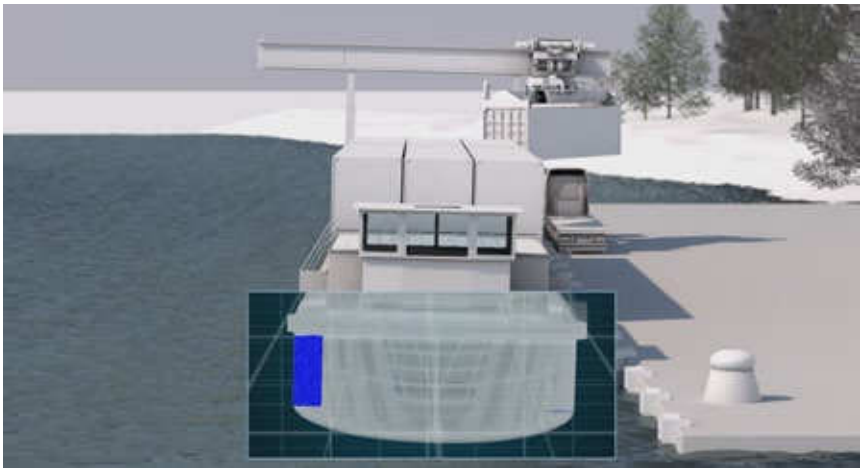


Abb.11: Mit dem Projekt konzipiertes selbst be- und entladendes Leichtbau-Binnen-Containerschiff

Durch die gezielte Anwendung von Leichtbaukonzepten und den Einsatz neuartiger Sandwichverbundwerkstoffe (Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches) wurde eine innovative Schiffskonstruktion entwickelt, die gegenüber einer konventionellen Schiffskonstruktion (Stahlbauweise) eine Gewichtseinsparung von ca. 20% aufweist. Damit wurde die Aufnahme der durch das bordeigene Handlingssystem bedingten zusätzlichen Lasten ohne eine Erhöhung des Schiffstiefgangs ermöglicht.

Für die Ermöglichung des bordeigenen Containerumschlags wurde ein längs des Schiffes verfahr- und teleskopierbarer Portalkran entwickelt. Schwerpunkte der Entwicklung lagen dabei auf der Anbindung des Handlingssystems an die Schiffsstruktur sowie der Übertragung der durch dessen Betrieb bedingten statischen und dynamischen Lasten in den Schiffsrumpf. Der entwickelte Portalkran ermöglicht den beidseitigen Containerumschlag unter Berücksichtigung der sich aus dem Schiffseinsatzgebiet ergebenden Rahmenbedingungen, wie z. B. Brückendurchfahrtshöhen, Schleusenbreiten, kritische Pegelstände. Gleichzeitig konnte die ursprüngliche Ladekapazität beibehalten werden.

Für die Gewährleistung des positionsgenauen Containerumschlags in wirtschaftlichen Zeitintervallen mittels des bordeigenen Portalkrans wurde ein schiffsinternes Stabilisierungssystem entwickelt. Dieses ermöglicht die variable Ballastierung durch in die Schiffsdoppelhülle integrierte Ballastwassertanks, eines entsprechenden Pumpsystems sowie der dafür erforderlichen smarten Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Dadurch konnte zum einen die Aufnahme zusätzlicher Lasten infolge fixer Trimm- bzw. Ballastierungsgewichte vermieden sowie zum anderen die Anforderungen an die am Gewerbestandort für den Containerumschlag notwendige Infrastruktur reduziert werden.

Die Umsetzbarkeit der entwickelten funktionalen und konstruktiven Konzeptlösungen konnte anhand numerischer Berechnungen und Simulationen sowie der mit dem Projekt realisierten und untersuchten Demonstratoren erfolgreich nachgewiesen werden.

Die mit dem Projekt erreichten Projektergebnisse lassen sich auch auf andere Binnenschiffstypen übertragen.

Im Rahmen der Verwertung der Projektergebnisse wird die Umsetzung in einem geeigneten Pilotschiff sowie die Weiterentwicklung zu einem smarten autonom fahrenden selbst be- und entladenden Containerbinnenschiff durch das Projektkonsortium angestrebt.

DANKSAGUNG

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

LITERATUR

[1] European strategies White paper 2011

[2] Maritime Technologien der nächsten Generation – Das Forschungsprogramm für Schiffbau, Schifffahrt und Meerestechnik 2011-2015, BMWi, 2011

[3] Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger; Los 2 (Seeverkehrsprognose), Forschungsbericht FE-Nr. 96.980-2011

[4] www.hafen-andernach.de

[5] BUNDESWASSERSTRASSEN – Klassifizierung der Binnenwasserstraßen des Bundes, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

[6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Januar 2014, Karte W172b

[7] viadonau.org

SINAFA –
SICHERE NAVIGATION IN DER SEESCHIFFFAHRT

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX411A-D

DIRK KOWALEWSKI	navXperience GmbH (Berlin)
STEFANO CAIZZONE	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
MANUEL CUNTZ	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
WAHID ELMARISSI	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
ANDRIY KONOVALTSEV	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
EMILIO PÉREZ MARCOS	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
KAZEEM YINUSA	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
MICHAEL MEURER	DLR, Institut für Kommunikation und Navigation
SEBASTIAN UHAREK	Technische Universität (Berlin)
ANDRÉS CURA HOCHBAUM	Technische Universität (Berlin)
ULRICH MANGOLD	Raytheon Anschütz GmbH

MOTIVATION

Für die Bundesrepublik Deutschland spielt die Hochseeschifffahrt in zweierlei Hinsicht eine große Rolle. Zum einen ist der sichere Transport von Gütern für die Wirtschaft von großer Bedeutung. Die Bundesrepublik Deutschland hat im Jahre 2013 für fast 1.500 Milliarden US $ Waren ausgeführt[1]. Der Großteil dieser Waren wird mit Containerschiffen auf dem Seeweg transportiert. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Kapazität des Containerumschlags der 8 wichtigsten Welthäfen (Shanghai, Singapur, Hongkong, Besan, Dubai, Rotterdam, Hamburg, Los Angeles)[2] zwischen 2011 und 2015. Diese Zahlen sind nicht saisonbereinigt, zeigen aber ein deutliches Wachstum. Die vertikale Skala ist in Prozent dargestellt, wobei März 2011 mit 100% als Ausgangswert festgelegt worden ist.

Abb. 1: Wachstumszahlen Container in Prozent

[1] Quelle: Statistisches Bundesamt
[2] Quelle: HSH Nordbank

Zum anderen ist die Seeschifffahrt mit Passagieren ebenfalls von großer Bedeutung. Kreuzfahrten erfreuen sich immer stärkerer Beliebtheit mit Wachstumsraten zwischen 10 und 20 % pro Jahr. 2010 lag der Umsatz der beiden deutschen Reeder Aida und Hapag Lloyd zusammen bei ca. 2 Milliarden € mit 1,2 Millionen Passagieren[3]. Das Unglück der Costa Concordia im Januar 2012 hat hier die Reedereien sensibilisiert, höhere Sicherheitsstandards einzuführen. Die Abwehr durch Jamming und Spoofing potentiell herbeigeführter Gefahren ist für Passagierschiffe besonders wichtig. Die genaue Kenntnis der Beschleunigungswerte an jeder Stelle des Schiffes kann zur Steigerung des Komforts für die Passagiere genutzt werden.

Die Motivation für das Projekt war es, die Navigation auf Hochseeschiffen sicherer zu machen. Hierfür sollen neue Signale und Frequenzen von allen Navigationssatellitensystemen genutzt werden. Dies ermöglicht es, die GNSS-Navigation vor Störern und Täuschern zu schützen, beziehungsweise das Vorhandensein dieser Signale zu erkennen. Mit Hilfe eines neuen GNSS-Systems mit 3 Antennen sollen die Bewegungen und Beschleunigen des Schiffes exakt gemessen werden. Alle Komponenten werden in eine moderne IT-Infrastruktur eingebunden und zusammen mit bordautonomen Navigationsgeräten gekoppelt.

ZIELE

Ziel war die Entwicklung von verschiedenen Komponenten, welche im Zusammenspiel einen Innovationssprung für die Erhöhung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schiffstechnik und des Schiffsbetriebs darstellen. Diese Komponenten sind:

- Entwicklung eines genauen, stör- und täuschungssicheren GNSS-(Global Navigation Satellite System) Sensors für die sichere Navigation in der Schifffahrt. Dabei soll eine Mehrantennen-/Array-Signalverarbeitung zur räumlichen Störer- und Täuscherdetektion verwendet werden.

- Entwicklung eines GNSS-Systems mit 3 Antennenpositionen und offenem Betriebssystem. Es wurde das OGRP Format zum Datentransport weiterentwickelt und systemoffen für alle Schiffssensoren konzipiert.

- Integration von Mess- und Auswertedaten von autonomen Systemen an Bord von ausrüstungspflichtigen Schiffen mit den GNSS-Komponenten zum Zweck der Unterdrückung der schädlichen Auswirkungen von Störern und Täuschern; Schwerpunkte hierbei sind die wissenschaftliche Erforschung und Erprobung der Vorsteuerung der Regelschleifen des GNSS-Sensors mit bordautonom ermittelten Ortungsdaten zur Minimierung von deren Arbeitsbereichen durch leistungsfähige Multihypothesen-Optimalfilterverfahren zur robusten und fehlertoleranten hybriden Sensordatenfusion.

- Erfassung, Berechnung und Überwachung der Schiffsbewegung mit Hilfe von hochgenauen GNSS-Sensoren in Echtzeit, um u.a. der Nachweisführung von Arbeitssicherheit, Wohlbefinden der Personen an Bord sowie der Sicherheit der Ladung und

[3] Quelle: Deutsches Handelsblatt vom 15.01.2012

des Schiffs zu dienen. Der Vergleich der mittels GNSS bestimmten Bewegungsparameter mit bordautonomen Daten ermöglicht eine indirekte Detektion von Störungen.

Die Erreichung dieser Ziele ist durch eine enge Zusammenarbeit der Projektpartner entstanden. Sie ergänzten sich in idealer Weise, da sie die erforderliche Expertise in unterschiedlichen Disziplinen einbrachten. Eine Kooperation zur Erprobung der entwickelten Messtechnik an Bord des Containerschiffes „Basle Express" fand im Rahmen des Projektes statt.

Weitere Unterstützung erhielten wir durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie indem wir unser 3 Antennen GNSS auf dem Vermessungsschiff Deneb installieren dürfen. Darüber hinaus hatten wir die Möglichkeit, unser System mit dem vorhandenen Positionsbestimmungssystem (GNSS+Trägheitsmesssystem/Inertialnavigationssystem) zu vergleichen.

JAMMING UND SPOOFING

Ziel des GALANT-Nautic Systems des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) innerhalb des Sinafa Aufbaus ist es, zu beweisen, dass GNSS-Störer bordseitig effektiv detektiert werden können. Zur Erreichung dieses Ziels wurde der Einsatz von Gruppenantennen zusammen mit geeigneten Signalverarbeitungsmethoden ausgewählt, da er eine effektive und höchst zuverlässige Identifikation von Interferenz- und Täuschersignalen ermöglicht.

Daher wurde für GALANT Nautic eine so genannte facettierte Gruppenantenne entwickelt. Diese Gruppenantenne wurde mit dem schon im DLR vorhandenen Mehrantennen-GNSS-Empfänger GALANT und mit einem Datenaufzeichnungsgerät, im folgenden Snapshot-Recorder genannt, verwendet. Abbildung 2 skizziert den Messaufbau mit beiden Subsystemen. Sowohl der Snapshot-Recorder als auch der GALANT Empfänger werden von derselben Gruppenantenne gespeist.

Der Snapshot-Recorder kann ZF Daten auf einem RAID speichern, um die Charakterisierung von Störungen im Postprocessing zu ermöglichen.

Der DLR-Array-GNSS-Empfänger liefert dazu wertvolle Informationen für die Postkorrelationsanalyse der Störungen und zeigt, wie ein präziser Empfänger auf die Störungen reagieren würde.

Mit einem Satellitenkommunikationsterminal ist ein Fernzugriff auf beide Subsysteme möglich. So können während der Messfahrten die Funktionalität der Systeme im laufenden Betrieb kontrolliert und gegebenenfalls konfiguriert werden. Durch ein gemeinsames Interface mit den Projektpartnern, welches auf dem Open GPS Receiver Protokoll (Abkürzung OGRP) basiert, können Warnungen bei detektierten Störungen direkt an angeschlossene Systeme transportiert werden. Weitere Details sind in /1/ zu finden.

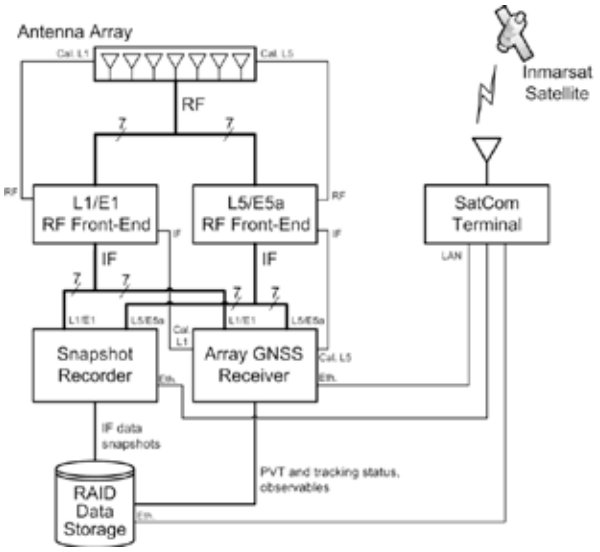


Abb. 2 Blockschaltbild der DLR Messaufbau

Das System wurde erfolgreich an Bord des Hapag Lloyds Schiffes „Basle Express" installiert und hat von April 2017 bis Februar 2018 wertvolle Daten gesammelt. Die Auswertung der gespeicherten Daten hat gezeigt, wie Störungen häufig im Hafenbereich in der ganzen Welt auftreten.

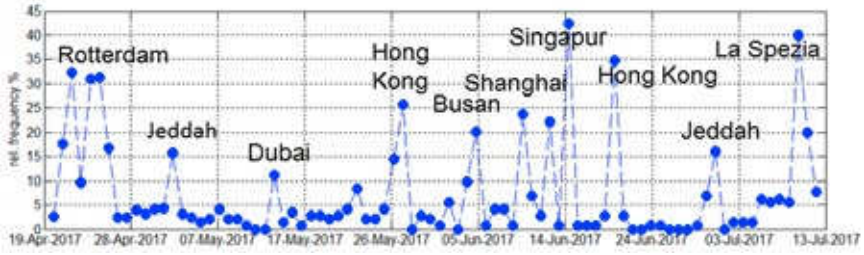


Abb. 3 Anzahl der detektierten Störer in der Zeitraum April-Juli 2017, mit Hinweise auf Position

Abbildung 3 stellt zum Beispiel dar, wie die Anzahl der detektierten Störer stark ansteigt, wenn das Schiff im Hafen liegt. Dieses Beispiel spiegelt die Erfahrungen der gesamten Messfahrt wieder. Auf offener See wurden selten, in Küstennähe und in großen Häfen hingegen häufig Störungen detektiert. Gerade in diesen dicht befahrenen Gebieten ist jedoch eine fehlerfreie Navigation besonders wichtig.

Außerdem wurden die Wirkungen von starken Störungen auf GNSS- Empfänger (reduzierte Präzision in der Positionslösung bis zum totalen Ausfall) beobachtet.

Exemplarische Messwerte für einen Störevent am 12. September sind in Abbildung 4 gezeigt: es handelt sich um einen schmalbändigen Störer mit einer Bandbreite von wenigen kHz auf der GNSS L1 Trägerfrequenz. Für mehrere Minuten war keine PVT-Lösung möglich. Der gleichzeitige Verlust des Kalibriersignals, die erheblich erhöhte Empfangsleistung und erhöhte Eigenwerte bestätigen ein signifikantes Störevent. Eine ausführlichere Analyse ist in /2/ durchgeführt.

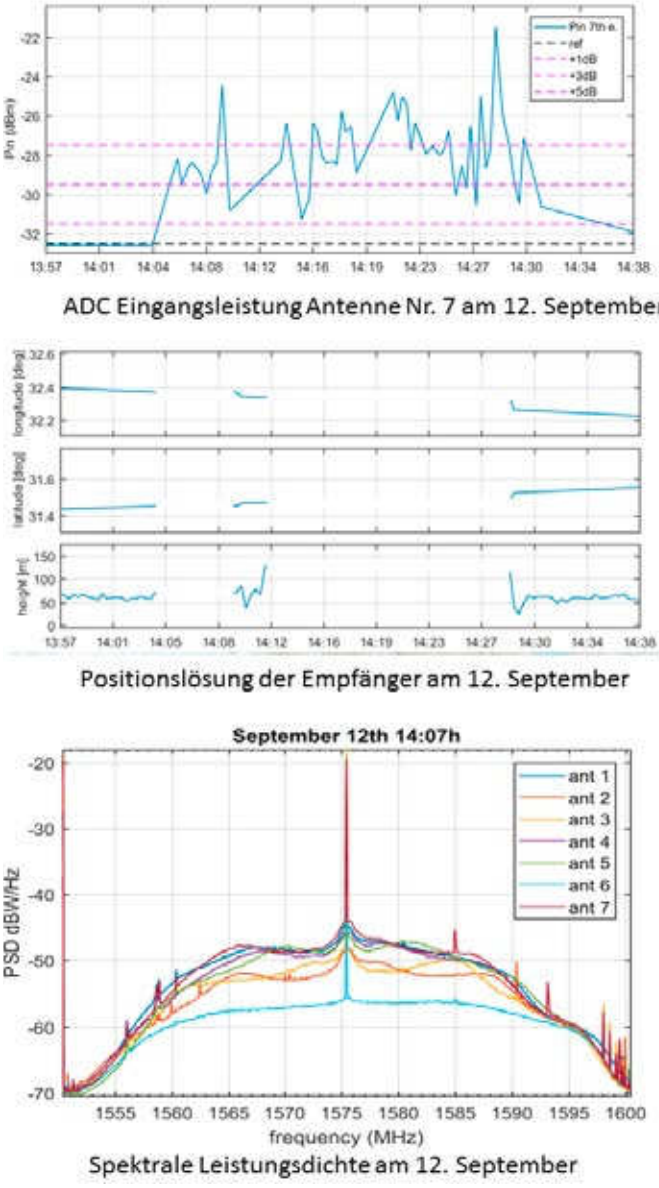


Abb. 4 Gemessene Werte (ADC Eingangsleistung, Positionslösung und spektrale Leistungsdichte) für das Störevent am 12. September 2017

Die ausgewerteten Messdaten zeigen klar den Bedarf und die Notwendigkeit von Detektions- und Unterdrückungsverfahren für GNSS-Störungen in zukünftigen Navigationssystemen an Bord von Schiffen.

ENTWICKLUNG 3 ANTENNEN GNSS EMPFÄNGER

Die Aufgabe von navXperience war es, ein präzises System zu entwickeln, das in der Lage ist die geozentrischen Koordinaten einer Antenne und die geozentrischen Komponenten der Baselinevektoren zu zwei weiteren Antennen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Als Hersteller von genauen GNSS Antennen und Empfängern haben wir bewusst voll und ganz auf GNSS Technologie gesetzt. Eine große Herausforderung war die zeitliche Synchronisation von 3 GNSS Empfängern. Dafür haben wir ein neues Motherboard entwickelt, auf dem wir 3 von unseren OSR (open source receiver) über eine hochgenaue Uhr synchronisiert haben. Mit dieser erheblichen Genauigkeitssteigerung war es uns möglich, unseren Projektpartnern ein neues Messsystem zu Verfügung zu stellen, das die Veränderungen der Antennenpositionen mit hoher Genauigkeit (mm) bestimmt. Über ein von uns entwickeltes JSON basiertes Protokoll wurde die 3D Position der Masterantenne (m-genau), die zeitliche Veränderung der 3D Position der Masterantenne pro Zeiteinheit (mm-genau die 3D Vektoren (mm-genau) der beiden anderen Antennen ausgegeben. Die weitere Verarbeitung der Koordinaten war Aufgabe der TU Berlin und wird im nächsten Abschnitt erläutert.

ENTWICKLUNG EINER SOFTWARE ZUR ECHTZEITMESSUNG DER SCHIFFSBEWEGUNGEN

Das Ziel des Teilprojektes SatMotion der TU Berlin ist die Bestimmung der drei Translationen des Schiffes und der drei Eulerwinkel (ϕ, θ, ψ) zur Beschreibung der Starrkörperbewegung des Schiffes im Raum aus den geozentrischen Koordinaten ($x_{geo}^{(i)}, y_{geo}^{(i)}, z_{geo}^{(i)}$ für i=1.3) dreierbeliebig, jedoch nicht auf einer Geraden angeordneten GNSS-Antennen.

Diese Koordinaten werden mit einer Transformationsmatrix, welche den bekannten Breiten- und Längengrad der Masterantenne enthält, in ein lokales Referenzsystem (X,Y,Z) mit dem Ursprung O'' umgerechnet werden, Abbildung 5.

Zur Transformation zwischen dem lokalen Referenzsystem und dem schiffsfesten System (x,y,z) wird die Transformationsmatrix T verwendet, welche die gesuchten Eulerwinkel enthält. Mit den bekannten schiffsfesten Koordinaten der betrachteten Antennen ($x_A^{(i)}, y_A^{(i)}, z_A^{(i)}$ für i=1…3) ergibt sich ein nichtlineares Gleichungssystem in den neun unbekannten Elementen der Matrix T:

$$T^t \; \Pi^t \begin{pmatrix} x_{geo}^{(j)} - x_{geo}^{(i)} \\ y_{geo}^{(j)} - y_{geo}^{(i)} \\ z_{geo}^{(j)} - z_{geo}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A^{(j)} - x_A^{(i)} \\ y_A^{(j)} - y_A^{(i)} \\ z_A^{(j)} - z_A^{(i)} \end{pmatrix}$$

für die drei i,j-Paare (1,2), (2,3), (3,1)

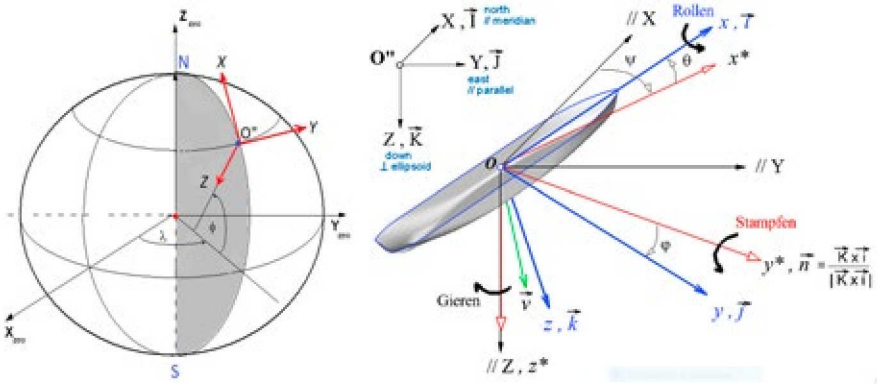


Abbildung 5: Geozentrisches, lokales und schiffsfestes Koordinatensystem

Eine effiziente iterative Lösung dieses Systems hat sich gegenüber einer analytischen Lösung als schneller herausgestellt. Sie ermöglicht die Bestimmung der gesuchten Bewegungsparameter in weniger als fünf Iterationsschritten und eignet sich somit sehr gut für eine Echtzeitmessung an Bord.

Mit der Lösung des Systems stehen die Position und Eulerwinkel des Schiffes zur Verfügung, nicht jedoch die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an ausgesuchten Punkten des Schiffes. Diese Größen werden durch numerische Differentiation gewonnen. Eine geeignete Filterung glättet das durch diese Differentiation entstandene Rauschen.

Zur komfortablen Nutzung der Messsoftware wurde ein Verwaltungsprogramm mit graphischer Oberfläche entwickelt, welches die Möglichkeit bietet, das 3-Antennen System zu konfigurieren, Messungen durchzuführen und auszuwerten, prozessierte Daten in Echtzeit grafisch darzustellen und zu speichern, siehe Abbildung 6, sowie alte Messdaten in Post-Processing-Modus zu analysieren. Das Programm wurde in Python geschrieben und ist aufgrund des eingesetzten QT Frameworks auf jedem Betriebssystem lauffähig. Eine zentrale Aufgabe des Verwaltungsprogramms ist das sog. Parsen des OSRP-Streams, welcher über TCP/IP bereitgestellt wird. Das Programm ist in der Lage, Daten mit einer Datenrate von bis zu 500 Hz zu verarbeiten. Die tatsächlich zu bearbeitende Datenrate lag lediglich bei 10 Hz.

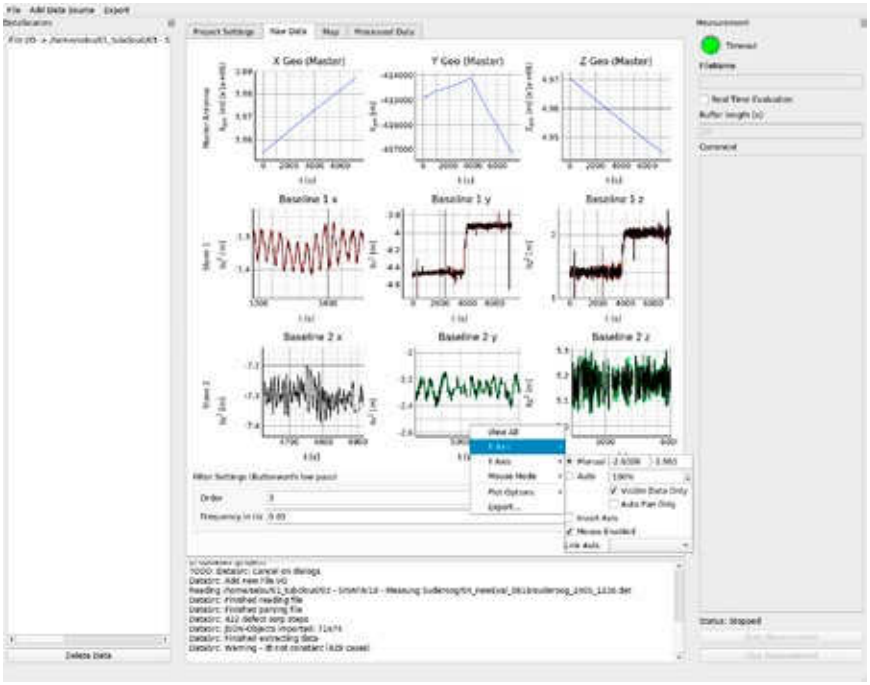


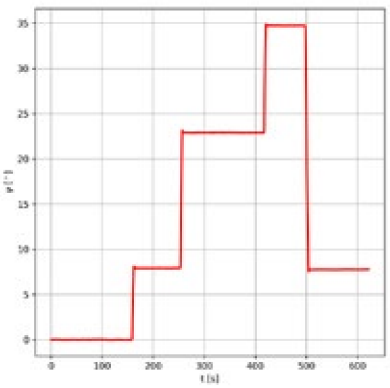
Abb. 6: Echtzeitdarstellung der Rohdaten in der Verwaltungssoftware

TROCKENTESTS ZUR BEURTEILUNG DER MESSUNGENAUIGKEIT

Zur Beurteilung der Genauigkeit des Messsystems wurde ein mobiler Prüfstand entwickelt. Die Anforderungen an den Prüfstand waren eine hohe Steifigkeit und ein geringes Gewicht. Es wurde eine Rahmenkonstruktion mit geschweißten Kastenprofilen verwendet, an welcher die GNSS-Antennen an ausziehbaren Armen installiert werden. Dies ermöglicht eine Variation des Antennenabstandes zur Untersuchung dessen Einflusses.

Es wurden mehrere Messkampagnen mit dem Prüfstand an verschiedenen Orten durchgeführt. Mechanische Anschläge erlaubten präzise definierte Drehungen um die Hochachse und Querachse. Die Versuche wurden sowohl statisch als auch dynamisch für verschiedene Bewegungsamplituden und -perioden, für die Antennenabstände 2.50 m, 3.26 m und 4.00 m durchgeführt.

Exemplarisch soll im Folgenden die Auswertung eines statischen Drehversuches mit dem Antennenabstand 3.25 m dargestellt werden. Abbildung 7 zeigt die gemessene Zeitreihe der Rotation um die Hochachse (ψ). Die Abweichungen von den Sollwerten befinden sich in der Tabelle.



Gemessen	Soll	Abweichung
7.9°	8°	0.1°
22.9°	23°	0.1°
34.7°	34.8°	0.1°
7.8°	8°	0.2°

Abb. 7: Ergebnis des statischen Drehversuches

ERPROBUNG DES MESSSYSTEMS AN BORD DER MV SÜDEROOG

Zur Erprobung des entwickelten Systems unter realen Bedingungen wurden zwei Messfahrten auf dem Containerschiff MV Süderoog durchgeführt, welches von der Reederei Briese Schifffahrt zur Verfügung gestellt wurde. Die drei GNSS-Antennen wurden auf dem Kompassdeck installiert. Parallel wurden Messungen mit einem herkömmlichen Inertialsystem (IMU) an verschiedenen Positionen des Schiffes durgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die GNSS-Echtzeitmessung der Schiffsbewegung gut mit der IMU-Messung übereinstimmt, Abbildung 8. Dargestellt sind der Rollwinkel (φ), der Stampfwinkel (Θ), der Kurswinkel (ψ) und die Vertikalbeschleunigung (*w*) an der Stelle, wo die IMU installiert wurde. Bei der IMU-Messung ist im Gegensatz zu der Messung mit dem GNSS-System (blaue Kurve) ein Wegdriften des Kurswinkels zu erkennen (graue Kurve). Zum Vergleich mit der GNSS-Messung wurde dies händisch korrigiert (orangene Kurve). Trotz der relativ kleinen Rtllamplitude von weniger als 1° ist eine gute Übereinstimmung beider Messungen zu erkennen. Dies gilt ebenfalls für den Stampfwinkel und die Vertikalbeschleunigung.

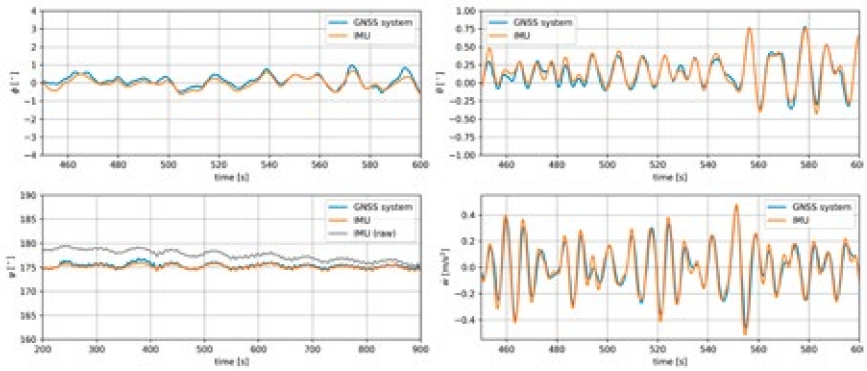


Abb. 8: Exemplarisches Ergebnis der Messung an Bord der MV Süderoog

MULTIHYPOTHESEN-OPTIMALFILTER ZUR ROBUSTEN UND FEHLERTOLERANTEN HYBRIDEN SENSORDATENFUSION

Dieses Teilvorhaben beschäftigt sich mit der Integration von Mess- und Auswertedaten von autonomen Systemen an Bord von ausrüstungspflichtigen Schiffen mit GNSS-Ortungsdaten zum Zweck der Unterdrückung schädlicher Auswirkungen von Störern und Täuschern. Konkrete Arbeitsgebiete sind die wissenschaftliche Erforschung und Erprobung der Vorsteuerung des GNSS-Sensors mit bordautonom ermittelten Ortungsdaten zur Minimierung von dessen Arbeitsbereich sowie von leistungsfähigen Multihypothesen-Optimalfilterverfahren zur robusten und fehlertoleranten hybriden Sensordatenfusion. Schwerpunkte innerhalb des zweiten Teils sind die Detektion von GNSS-Täuschungen im Beobachter des Bahnreglers sowie durch die Überwachung der Kalibrationen von Sensorfehlern in inertialen und Koppelortungssystemen.

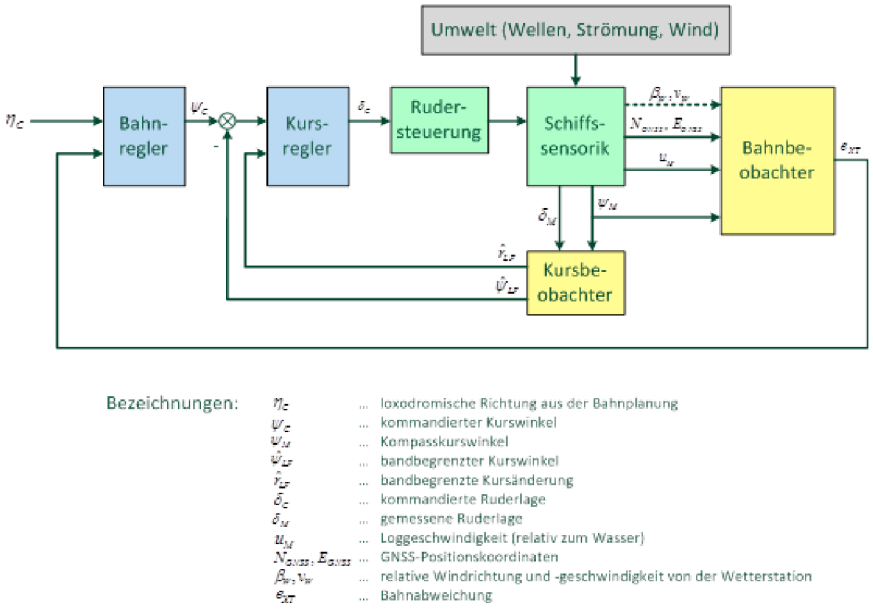
Typische Nachführschleifen in einem GNSS-Sensor sind die PLL (engl. Phased Locked Loop) zur Verfolgung der GNSS-Trägersignale sowie die DLL (engl. Delay Locked Loop) zum Nachführen der GNSS-Kodesignale. Der Nutzen der Vorsteuerung sollte qualitativ bewertet und schließlich in Form von Genauigkeitssteigerungen und Bandbreitenreduzierungen quantifiziert werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag bei der PLL, die üblicherweise bei einer Bandbreite von etwa 30 Hz ein Phasenrauschen von weniger als 10° erzeugt. Die Stützung der PLL mit der bordautonom ermittelten Geschwindigkeit ermöglicht eine Bandbreitenreduzierung auf bis zu 5 Hz. Je nach Güte der Stützung und dem anliegenden Signal-zu-Rauschverhältnis kann das Phasenrauschen auf 5° halbiert werden. Eingangsparameter für die Analyse waren die Genauigkeit der Satellitenuhr, die Güte der Empfängeruhr, Parameter der Doppler-Stützung wie Genauigkeit und Datenalter sowie das anliegende Signal-zu-Rauschverhältnis.

Die Überwachung der Kalibrationen von Sensorfehlern in inertialen und Koppelortungssystemen wurde nach eingehenden analytischen Betrachtungen zunächst anhand von Simulationen im Rahmen der Multihypothesen-Optimalfilter untersucht. Legt man hochgenaue Drehraten- und Beschleunigungssensoren zugrunde, dann kann eine GNSS-Positionstäuschung von weniger als einem Kilometer bereits nach einer halben Stunde detektiert werden. Besitzen die bordautonomen Inertialsensoren eine geringere Güte, wie beispielsweise in einem Kurs-/Lagereferenzsystem bzw. Schiffskreiselkompass, dann entspricht die Reduzierung der Güte der Inertialsensoren in einem linearen Zusammenhang der Erhöhung des Betrags der kleinsten detektierbaren GNSS-Positionstäuschung. Die Detektionszeitkonstanten werden größer und hängen stärker vom GNSS-Positionstäuschungsprofil und dem Manöververlauf des Schiffs ab.

Eine GNSS-Positionstäuschung kann auch in einem Schiffsautopiloten detektiert werden. Die Funktionalitäten des Autopiloten werden anhand von Abbildung 9 erläutert. Der Kursbeobachter hat die Aufgabe, die umweltbedingten Störsignale im Kompasskurswinkel ψ_M von der Missionskinematik zu trennen. Dazu wird häufig das sogenannte Nomoto-Modell (/3/) mit den Parametern Schiffszeitkonstante T und Ruderverstärkung K sowie den Zuständen Kurswinkel und Kursänderung um einen Ruderwinkelbias δ_o sowie einen Band-

pass zustandserweitert. Der schmalbandige Kurswinkel ψ_{LF} aus dem Kursbeobachter steuert den Kursregler, der konventionell als PID-Regler ausgelegt wird. Bei grenzstabilen Schiffen kommen auch fortschrittlichere Ansätze wie modellbasierte Regler zur Anwendung.

Der Bahnbeobachter stützt sich im Wesentlichen auf das kinematische Modell der ebenen Koppelortung, erweitert um die beiden Wasserströmungskomponenten in nördlicher und östlicher Richtung, die jeweils als Gauß-Markov-Prozesse erster Ordnung modelliert sind (/4/). Die vom Bahnbeobachter ermittelte Bahnabweichung in Querrichtung e_{XT} regt den Bahnregler an, der gerne ein PI-Regler ist. Bei der Reglerauslegung ist hauptsächlich zu beachten, dass die Bandbreite des Ruderantriebs größer ist als diejenige des geschlossenen Kursregelkreises. Die Bandbreite der Kursregelung muss größer sein als die der Bahnregelung. Die kleinste zu beachtende Kreisfrequenz ist schließlich die inverse Schiffszeitkonstante $1/T$.



Bezeichnungen:

η_c	...	loxodromische Richtung aus der Bahnplanung
ψ_c	...	kommandierter Kurswinkel
ψ_M	...	Kompasskurswinkel
$\hat{\psi}_{LF}$	...	bandbegrenzter Kurswinkel
$\hat{r}_{LF}$	...	bandbegrenzte Kursänderung
δ_c	...	kommandierte Ruderlage
δ_M	...	gemessene Ruderlage
u_M	...	Loggeschwindigkeit (relativ zum Wasser)
N_{GNSS}, E_{GNSS}	...	GNSS-Positionskoordinaten
β_w, v_w	...	relative Windrichtung und -geschwindigkeit von der Wetterstation
e_{XT}	...	Bahnabweichung

Abb. 9: Kaskadierte Kurs- und Bahnregelung

Die abschließenden Hardware-In-The-Loop-Labordemonstrationen befassten sich mit der Täuschungsdetektion im geschlossenen Regelkreis der Bahnregelung (siehe Abbildung 9). Abbildung 10 zeigt die Reaktion des Bahnreglers von Raytheon Anschütz auf eine nach hundert Sekunden nach Versuchsbeginn einsetzende rampenförmige Positionstäuschung mit einer Steigung von 0,5 m/s in nördlicher Richtung. Nach etwa 500 Sekunden wird das Wegdriften der getäuschten Position eingestellt. In der Zwischenzeit haben Bahnbeobachter und Bahnregler reagiert, d. h. eine Wasserströmung (häufig auch Drift genannt) von 0,5m/s in nördlicher Richtung geschätzt und entgegen der Richtung des Positions-

täuschungsangriffs Ruder gelegt, so dass sich die tatsächliche Schiffsbahn 0,0025° (etwa 300 m) südlich von der Sollbahn befindet. Der Kursverlauf entspricht der Ausweichbewegung nach Süden. Der Schiffsführer hingegen glaubt, dass sich sein Schiff nach wie vor auf der Sollbahn befindet, denn das Verhalten des Autopiloten ist eigentlich nicht auffällig.

Die Veränderung bzw. Erneuerung des transversalen Bahnfehlers (engl. Cross Track Error) aus Abbildung 10 ist mit dem in /5/ beschriebenen Detektionsverfahren, dem Likelihood-Ratio-Test, analysiert worden. In Abbildung 11 erkennt dieser Test während der Phasen des Anfahrens und Abbremsens der Täuschungsrampe sprunghafte Änderungen des transversalen Bahnfehlers. Eine Signalisierung der Detektionen an den Schiffsführer im Rahmen des Brückenalarmmanagements zur Neubewertung der Schiffssituation, insbesondere der Strömungsverhältnisse, ist ohne weiteres möglich.

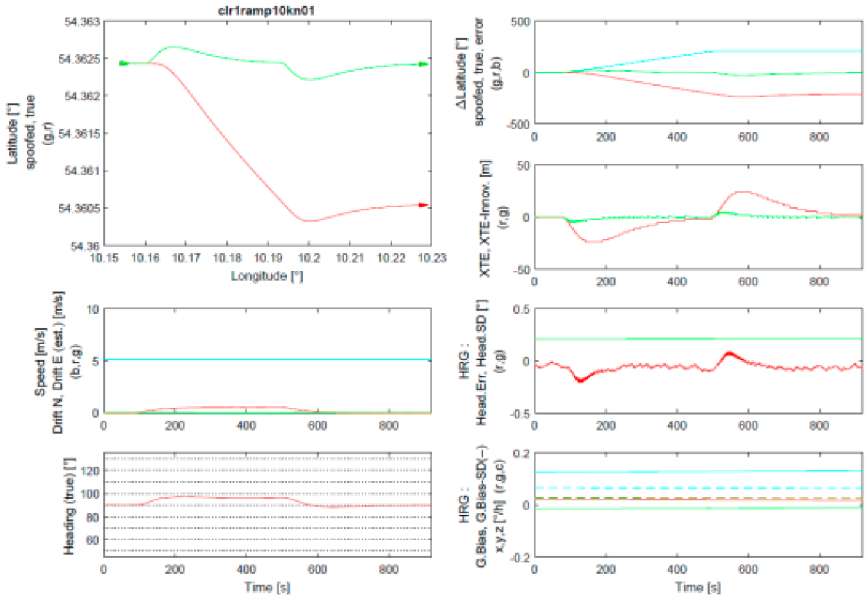


Abb. 10: Bahnregelung bei rampenförmiger Positionstäuschung

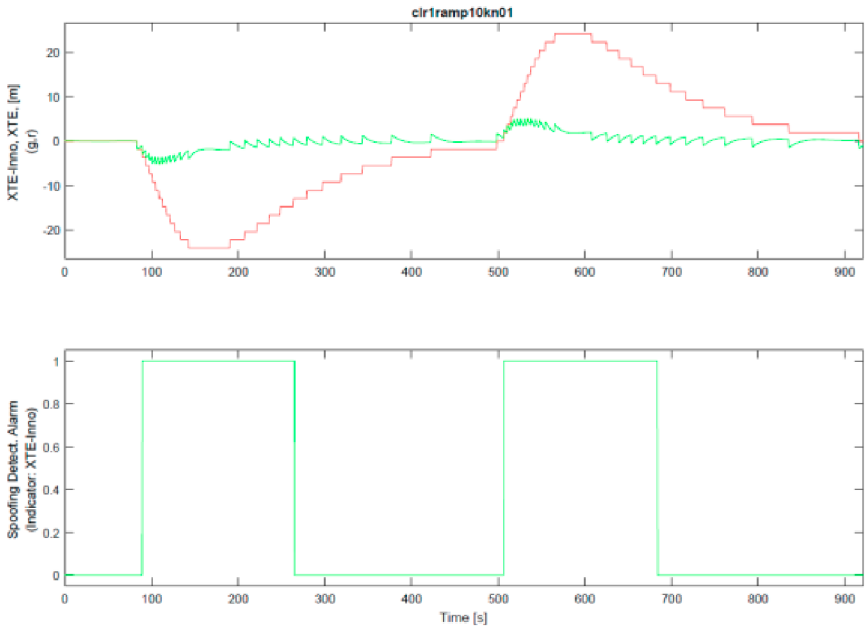


Abb. 11: Täuschungsdetektion bei der Bahnregelung

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt SiNafa hat in vielen Hinsichten wichtige Ergebnisse für die Erhöhung der Sicherheit der Navigation in maritimen Bereich generiert:

Zuerst, wurde ein System zur Stör- und Täuscherdetektion im maritimem Bereich aufgebaut und an Bord des Hapag Lloyds Schiffes „Basle Express" installiert. Die Auswertung der gespeicherten Daten hat gezeigt, wie Störungen häufig im Hafenbereich in der ganzen Welt auftreten. Anhand der Messdaten, hat sich den Bedarf und die Notwendigkeit von Detektions- und Unterdrückungsverfahren für GNSS-Störungen in zukünftigen Navigationssystemen an Bord von Schiffen klar gezeigt.

Anhand von Analysen und Demonstrationen zur hybriden Sensordatenfusion konnte nachgewiesen werden, dass mit den heutigen an Bord von Hochseeschiffen installierten Systemen zur Ortung und Navigation schädliche Effekte von getäuschten GNSS-Positionen ohne signifikante Systemkorrumpierung entdeckt und dem Schiffsführer zur Überprüfung und ggf. Neubewertung der Situation seines Schiffs signalisiert werden können.

Im Teilprojekt SatMotion wurde eine Software zur Bestimmung der Schiffsbewegung in sechs Freiheitsgraden mit einem Drei-Antennen GNSS-System entwickelt. Zur Beurteilung der Genauigkeit des Messsystems wurden Tests im Trockenen mit einem speziell hierfür gebauten mobilen Prüfstand durchgeführt. Darüber hinaus wurde die entwickelte Software während zweier Messfahrten erfolgreich erprobt und die Echtzeitfähigkeit nachgewiesen.

Ein Vergleich mit einem konventionellen Messsystem (IMU) zeigte sehr vielversprechende Ergebnisse. Das Drei-Antennen GNSS-System ist kostengünstiger als ein gleichwertiges IMU-System und eignet sich für Langzeitmessungen an Bord, da die Messwerte der Winkel nicht wegdriften.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Reederei Hapag Lloyd für die Zurverfügungstellung des Containerschiffes Basle Express, der Reederei Briese Schifffahrt für die Bereitstellung des Schiffes MV Süderoog sowie dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie für die Messungen auf der DENEB. Weiterhin möchten sich die Autoren bei der Flugplatzgesellschaft Schönhagen mbH für Ermöglichung der Messungen auf Ihrem Gelände und bei der Hamburgischen Schiffbau Versuchsanstalt (HSVA) für die Leihgabe einer IMU für Referenzmessung bedanken. Weiterer Dank gebührt dem Projektträger Jülich für die Projektunterstützung und dem Bundesministerium für Wirtschaft für die Bereitstellung der Fördermittel.

LITERATUR/VERÖFFENTLICHUNGEN/PATENTE

/1/ A. Konovaltsev, S. Caizzone, K. Yinusa, M. Sgammini, E. Perez Marcos, M. Appel, M. Cuntz, W. Elmarissi, M. Meurer, "Interference Detection and Characterization with an Array based GNSS Receiver using Conformal Antennas in Maritime Environments", ION GNSS+ 2017, Portland (USA), Sept. 2017

/2/ E. Pérez Marcos, S. Caizzone, A. Konovaltsev, M. Cuntz, W. Elmarissi, K. Yinusa, M. Meurer, "Interference Awareness and Characterization for GNSS Maritime Applications", ION PLANS 2018, Monterey (USA), Apr. 2018

/3/ Fossen, T. I., Marine Control Systems–Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics, 2002, ISBN 82-92356-00-2.

/4/ Gelb, A., Kasper, Jr., J. F., Nash, Jr., R. A., Price, C. F., and Sutherland, Jr., A. A.: Applied Optimal Estimation. The M.I.T. Press, Boston, Massachusetts, eighth printing, 1984. ISBN 0 262 70008-5.

/5/ Basseville, M.: Online Detection of Jumps in Mean. In: Detection of Aprupt Changes in Signals and Dynamical Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences, No. 77, Editors: M. Basseville, A. Benveniste, Springer-Verlag, 1985. ISBN 540/387-16043-4.

SHIPLIGHT –
NACHHALTIGER SCHIFFSLEICHTBAU DURCH EFFIZIENTES UND FLEXIBEL AUTOMATISIERTES 3D-LASER-LICHTBOGEN-HYBRIDSCHWEISSEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX389A-H, J-K

C. EMMELMANN	IAPT
O. STEINMEIER	Fraunhofer-Einrichtung für
G. CERWENKA	Additive Produktionstechnologien
M. MÖLLER	IAPT
F. BOEKHOFF, M. DRÖSSER	Meyer Werft
B. URBAN	Fr. Lürssen Werft
W. FIEDLER, F. SCHULZE	Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
O. MEIER, J. LINDNER	LASER on demand

1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Das Laserschweißen ist bereits seit mehr als 10 Jahren äußerst erfolgreich im Schiffbau etabliert. In dieser Technologie hat sich insbesondere die MEYER WERFT als Vorreiter erwiesen und nicht zuletzt mit ihrer Hilfe den Bau von Kreuzfahrtschiffen optimiert. Zumeist in einer Prozesskombination mit dem Metall-Schutzgas (MSG)- bzw. genauer dem Metall-Aktivgas (MAG)-Schweißverfahren verhilft der Laserstrahl zu einer vergrößerten Einschweißtiefe sowie einer deutlich höheren Schweißgeschwindigkeit. Je nach Blechstärke werden dabei Laserleistungen von 6 kW bis 20 kW verwendet. Damit ist der Prozess laserdominiert, der MAG-Lichtbogen liefert einen geringeren Energieanteil und dient hauptsächlich der Zufuhr von Zusatzmaterial. Allerdings beschränkt sich der Einsatz des Laser-MAG-Hybridschweißverfahrens bisher auf die Vorfertigung von Schiffspaneelen, weil sich der Prozess mit hoher Laserleistung nur bei Nullspaltbedingungen am Werkstück anwenden lässt. Diese Bedingungen werden in der Paneelstraße mittels hydraulischer Vorrichtung unter hoher Spannkraft erzeugt.

Der entscheidende Vorteil durch den Hybridprozess besteht darin, dass sich infolge reduzierter streckenbezogener Wärmeeinbringung nur geringe Bauteilverformungen zeigen und so annähernd ideal ebene Plattenfelder erzeugt werden können. Für diese Paneele sind in der Regel keine nachgeschalteten Richttätigkeiten erforderlich. In der weiteren Schiffbauabfolge treten jedoch zwischen den Fügepartnern aufgrund ihrer Dimensionen zwangsläufig größere Spalte auf, die eine Nutzung des laserdominierten Hybridprozesses unmöglich machen, zumal für die dreidimensionale Bearbeitung keine gleichermaßen wirksame hydraulische Spanntechnik zur Verfügung steht. Ohne diese Spannmittel bleibt nur die Inanspruchnahme der konventionellen MAG-Schweißtechnologie, die zudem

überwiegend von Hand angewendet wird, sodass im Anschluss an die Vorfertigung bei hohem Wärmeeintrag thermisch bedingte Bauteilverzüge entstehen, die dann aufwändig gerichtet werden müssen.

Das zentrale Ziel im ShipLight-Forschungsvorhaben war es, einen neuen Schweißprozess zu entwickeln, der in der schiffbaulichen Applikation die Kluft der Prozesseigenschaften zwischen dem konventionellen MAG-Schweißen und dem Hochleistungslaser-MAG-Hybridschweißen schließt. In Relation zum MAG-Prozess wurde eine Geschwindigkeitssteigerung in Verbindung mit einer Reduktion der Streckenenergie angestrebt, verglichen mit dem Laser-MAG-Hybridverfahren der Paneelstraße ist dagegen eine wesentlich größere Spaltüberbrückbarkeit sowie eine verbesserte Zugänglichkeit am Bauteil vonnöten.

Der im Projekt verfolgte Lösungsansatz nutzt einen Laserstrahl mit limitierter Leistung zur Stabilisierung des Lichtbogenschweißprozesses und zur Verbesserung von dessen Performance. Im Hinblick auf eine Anwendbarkeit über die gesamte schiffbauliche Produktionskette wird eine flexible Automatisierung angestrebt, sodass eine integrierte Prozess- und Systementwicklung zu erfolgen hatte.

Ein bezogen auf die Prozesskette durchgängig verzugsarmer Schweißprozess bildet die Voraussetzung, um dünnere Bleche im Schiffbau zu verwenden. Hiermit kann das Schiffsgewicht wesentlich verringert und damit die Energieeffizienz nachhaltig gesteigert werden. Die Blechstärke wird oftmals nicht aus Festigkeitsgründen, sondern aus Gründen der Beulsteifigkeit gewählt. Das bedeutet, es sind überwiegend Fertigungsrestriktionen, die den Leichtbau verhindern. Wenn diese Restriktionen durch eine neue Fertigungsmethode wie den ShipLight-Prozess eliminiert werden, besteht die Möglichkeit, Material zu sparen und ressourceneffizienter zu produzieren.

2 ZUSAMMENSETZUNG UND STRUKTUR DES VERBUNDVORHABENS

Der Forschungsverbund des ShipLight-Projektes umfasste insgesamt 15 Partner. Als Endanwender waren die MEYER WERFT aus Papenburg und die Fr. Lürssen Werft aus Bremen-Vegesack im Projekt vertreten. Des Weiteren standen dem Vorhaben mit dem Fraunhofer IAPT* aus Hamburg (Prozessentwicklung, Simulation, Handschweißsystem) und dem Fraunhofer ILT aus Aachen (Prozessüberwachung und -steuerung) zwei Forschungseinrichtungen zur Verfügung. Die Bearbeitungssysteme wurden von folgenden Industriepartnern entwickelt: Carl CLOOS Schweißtechnik aus Haiger (Lichtbogentechnik, Drahtförderstrecke, Bearbeitungskopf für das automatisierte System), LASERLINE aus Mülheim-Kärlich (Diodenlaser), IPG Laser aus Burbach (Faserlaser), PRECITEC aus Gaggenau (Bearbeitungsoptiken), LASER on demand aus Burgwedel (Sicherheitssysteme) und SET aus Burgwedel (Handgerätesteuerung). Die Klassifizierungsgesellschaft DNV GL aus Hamburg war für die Prozess- und Systembewertung verantwortlich. Zusätzlich wurde das Projekt von Trumpf aus Ditzingen (Blechkonstruktion) und simufact engineering aus Hamburg (Simulationssoftware) in Form einer assoziierten Partnerschaft unterstützt. BALance aus Bremen hat als Unterauftragnehmer eine

Datenbank erstellt. Die Projektleitungsfunktion nahmen MEYER WERFT und Fraunhofer IAPT gemeinschaftlich wahr.

Die im Projekt zu bearbeitenden Themengebiete wurden in drei Schwerpunktfelder aufgeteilt: Prozessentwicklung, Fertigungssystementwicklung und Produktentwicklung. Zur Prozessentwicklung gehörten „Grundlagen- und Systemversuche", zur Fertigungssystementwicklung die „manuellen, teilautomatisierten und vollautomatisierten Schweißsysteme" und zur Produktentwicklung die „Konstruktion und Simulation".

*Die neue gegründete Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT hat innerhalb der Laufzeit die Teilprojekte von LZN Laser Zentrum Nord und Technischer Universität Hamburg übernommen.

3 INTEGRIERTE SHIPLIGHT-PROZESS- UND SYSTEMENTWICKLUNG

3.1 SHIPLIGHT-PROZESSENTWICKLUNG

Eine aus Gründen der Lasersicherheit auf maximal 2 kW Laserleistung begrenzte Strahlquelle unterstützt einen energieoptimierten MAG-Lichtbogen – das ist der ShipLight-Prozess. Diese Laserunterstützung erfolgte sowohl mit Hilfe eines Diodenlasers (von LASERLINE) als auch eines Faserlasers (von IPG), die genutzten Wellenlängen der Laserstrahlung lagen im Bereich zwischen 1020 nm und 1070 nm, die Spotgröße betrug 1,2 mm im Durchmesser auf der Blechoberfläche.

Für die Prozessentwicklung wurde das Hauptaugenmerk auf Blechstärken von 3 mm bis 10 mm gelegt, da auf der einen Seite typische Blechstärken und auf der anderen Seite die zukunftsweisend dünneren Blechstärken untersucht werden sollten. Zusätzlich wurden stichprobenartig auch Bleche bis 12 mm Dicke betrachtet. Die eingestellten Spaltbreiten änderten sich in 1-mm-Schritten vom technischen Nullspalt bis zu einem Spaltmaß von 5 mm. Diese Vorgaben galten sowohl für I- als auch für T-Stöße. Das Versuchsmaterial bestand aus den schiffbautypischen Güten A36 bzw. S355. Die Kantenvorbereitung der Probenbleche erfolgte auf den beteiligten Werften (MEYER WERFT und Fr. Lürssen Werft) durch den in den Fertigungsablauf eingebundenen üblichen Plasmazuschnitt ohne zusätzliche Nacharbeit. Die Prozesszone der Bleche musste allerdings vom oberflächenschützenden Primer befreit werden, um den ShipLight-Prozess sicher anwenden zu können. Die Probengeometrie betrug 1000 mm in der Länge und insgesamt 500 mm in der Breite. Bei T-Stößen maß der aufgesetzte Steg 250 mm in der Höhe.

Als entscheidendes Beurteilungskriterium für die Einsatzfähigkeit und die Qualität des ShipLight-Prozesses wurden die eingebrachte Streckenenergie bei mindestens gleicher Nahtgüte sowie der Bauteilverzug herangezogen. Eine Reduzierung der Streckenenergie (aufgewendete Energiemenge bezogen auf eine geschweißte Längeneinheit ohne Berücksichtigung eines Wirkungsgrades) wirkt sich prinzipiell positiv durch einen geringeren Verzug der geschweißten Konstruktion aus. Die durch die Laserunterstützung höhere Schweißgeschwindigkeit senkt potentiell die Streckenenergie, dabei muss aber die zusätzlich

eingebrachte Laserleistung überkompensiert werden. Die Versuche wurden jeweils mit 1 kW und mit 2 kW Laserleistung absolviert, um individuell bezogen auf Blechstärke und Spaltbedingungen die streckenenergetisch günstigste Variante zu detektieren.

In der Prozessanwendung auf I-Stöße konnten für Blechstärken von 3 mm bis 10 mm die Spaltmaße bis zu 1 mm einlagig, ohne eine schiffbautypische v-förmige Kantenvorbereitung und ohne Badstütze überbrückt werden. Für die geringe Blechstärke von 3 mm bedeutete dieses Spaltmaß gleichzeitig die Obergrenze der Spaltüberbrückbarkeit des ShipLight-Prozesses. Alle größeren Blechstärken ließen sich bis zu einem Spaltmaß von 3 mm einlagig mit einem Vollanschluss fügen. Ab 2 mm Spalt wurde jedoch eine keramische Schweißbadstütze eingesetzt, äquivalent zur Arbeitsweise auf der Werft. Grundsätzlich limitiert eine zunehmende Spaltbreite schrittweise die erzielbare maximale Schweißgeschwindigkeit im Hinblick auf ein normkonformes Nahtbild, sodass die Streckenenergie bei größeren Spalten höher ausfällt. Die Abbildung 1 und die nachfolgende Abbildung 2 veranschaulichen exemplarisch die erzielten Resultate für die Blechstärken 5 mm und 7 mm.

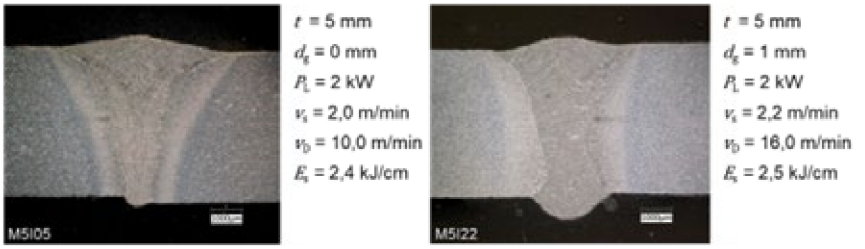


Abb. 1: ShipLight-Prozess am I-Stoß für 5 mm Blechstärke mit a) technischem Nullspalt und b) einem Spaltmaß von 1 mm (Quelle: Fraunhofer IAPT)

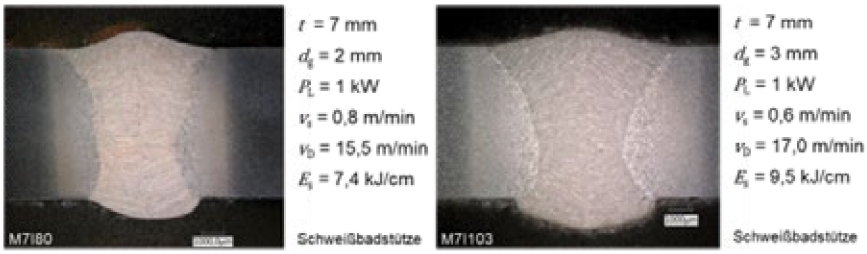


Abb. 2: ShipLight-Prozess am I-Stoß für 7 mm Blechstärke mit einem Spaltmaß von a) 2 mm und b) 3 mm (Quelle: Fraunhofer IAPT)

An T-Stößen wurden mit dem ShipLight-Prozess für die Blechstärken von 3 mm bis 10 mm einseitige Kehlnähte erzeugt. Ziel war es, möglichst eine Einschweißtiefe zu erreichen, die mindestens 50 % der Stegbreite ausmacht, da dann mit einer Gegenlage theoretisch ein beidseitig geschweißter Vollanschluss realisierbar ist. Auf die Gegenlage wurde in den Versuchen jedoch verzichtet, um die Wurzel besser beurteilen zu können. Die Laserunterstützung verhilft zu einer gesteigerten Einschweißtiefe gegenüber dem reinen MAG-

Prozess. Im Falle von 3 mm Blechstärke konnte sogar (unabhängig von den Spaltbedingungen) ein einseitiger Vollanschluss erzielt werden. Erst ab einer Blechstärke von mehr als 7 mm verringerte sich die Einschweißtiefe bei gleichbleibender Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit so weit, dass die Anbindungslänge nur noch 40% der Blechstärke beträgt.

Im genannten Blechstärkenspektrum von 3 mm bis 10 mm ließen sich Bedingungen zwischen technischem Nullspalt und 3 mm Spaltmaß prozesssicher und regelkonform bearbeiten. Auch Spaltbreiten von 4 mm und 5 mm waren ab einer Blechstärke von 5 mm überbrückbar, allerdings mit der Einschränkung des möglichen Auftretens kleiner Bindefehler im Wurzelbereich. Zu beachten ist außerdem, dass alle diese Spalte mit dem ShipLight-Prozess dank der Laserunterstützung in nur einer Lage gefüllt wurden, während auf den Werften im konventionellen MAG-Verfahren spätestens bei 5 mm Spaltbreite zweilagig geschweißt wird.

Anhand ausgewählter Beispiele zeigen die Abbildung 3 und die folgende Abbildung 4 eindrucksvoll das Potential des ShipLight-Prozesses insbesondere für die geringen Blechstärken 3 mm und 5 mm.

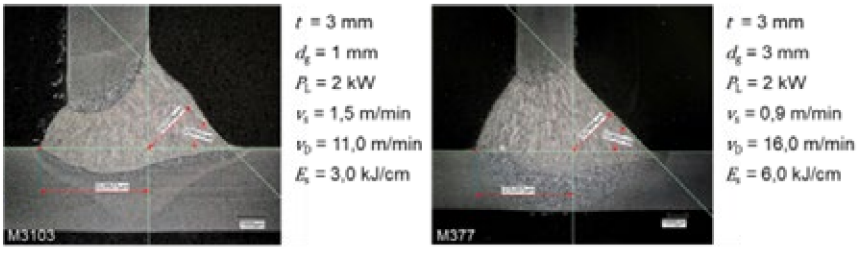


Abbildung 3: ShipLight-Prozess am T-Stoß für 3 mm Blechstärke mit einem Spaltmaß von a) 1 mm und b) 3 mm (Quelle: Fraunhofer IAPT)

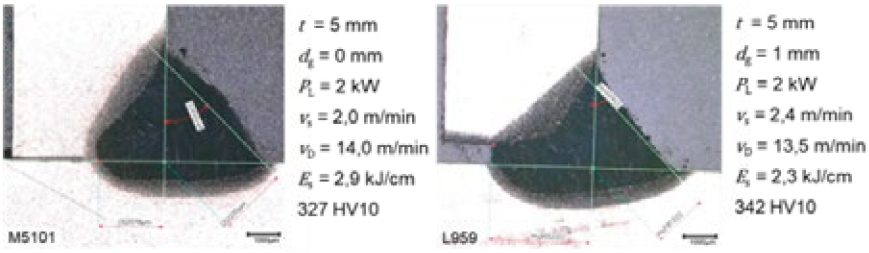
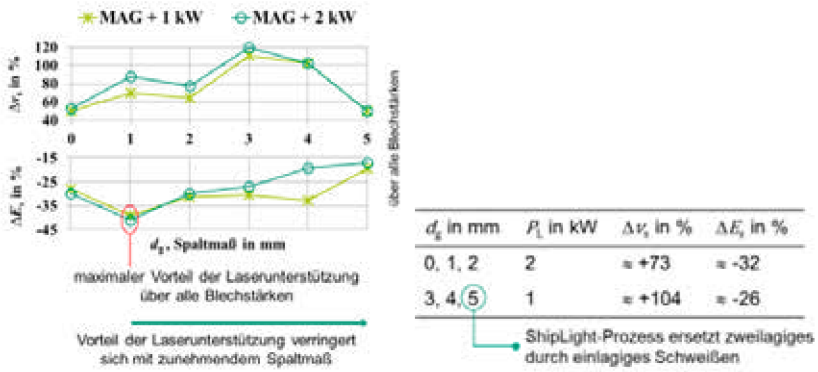


Abbildung 4: ShipLight-Prozess am T-Stoß für 5 mm Blechstärke mit a) technischem Nullspalt und b) einem Spaltmaß von 1 mm (Quelle: Fraunhofer IAPT)

Allgemein gilt für I- und T-Stöße, dass der Vorteil durch die Laserunterstützung im ShipLight-Prozess mit steigendem Spaltmaß abnimmt. Bei geringem Spalt dagegen ist die maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeit durch die zu verzeichnende Aufhärtung in der resultierenden Schweißnaht begrenzt (max. 350 HV). Mit dem im Projekt entwickelten ShipLight-Prozess ist es gelungen, die Schweißgeschwindigkeit und die Einschweißtiefe

gegenüber dem MAG-Prozess signifikant zu steigern und damit die Streckenenergie zu senken, was sich positiv auf den thermisch verursachten Verzug der Fügepartner auswirkt. In Relation zum Hochleistungslaser-Hybridschweißverfahren wurde die Prozesstoleranz um ein Vielfaches verbessert, und zugleich ließen sich im Maximum sogar ähnlich hohe Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 2,4 m/min erreichen. Spaltmaße größer 0,5 mm markieren in der Hochleistungslaseranwendung bereits die Obergrenze, was beim ShipLight-Prozess nicht der Fall ist. Das Spaltlimit beträgt für den neuen Prozess 3 mm bei I-Stößen und bis zu 5 mm bei T-Stößen, wenn kleine Wurzelbindefehler z. B. durch das Anbringen einer Gegenlage ausgeschlossen werden können. Die Abbildung 5 fasst die erreichten Ergebnisse für T-Stöße im Vergleich zum bislang auf den Werften eingesetzten konventionellen MAG-Schweißprozess zusammen.



d_s in mm	P_L in kW	Δv_s in %	ΔE_s in %
0, 1, 2	2	≈ +73	≈ -32
3, 4, 5	1	≈ +104	≈ -26

ShipLight-Prozess ersetzt zweilagiges durch einlagiges Schweißen

Abbildung 5: Vorteile des ShipLight-Prozesses gegenüber dem konventionellen MAG-Prozess am T-Stoß (Quelle: Fraunhofer IAPT)

3.2 BEARBEITUNGSKOPF FÜR DEN SHIPLIGHT-PROZESS

Zur Anwendung des ShipLight-Prozesses waren zwingend neue Bearbeitungssysteme erforderlich, die iterativ prozessentwicklungsbegleitend entstanden sind. Die im Projekt entwickelten ShipLight-Bearbeitungssysteme adressieren die vollständige 3D-Bearbeitungskette im Schiffbau und teilen sich in ein vollautomatisiertes, ein teilautomatisiertes und ein handgeführtes Schweißgerät auf. Fertigungsstruktur- und prozessrelevante Randbedingungen nahmen direkt Einfluss auf die Gestaltung der neuen Bearbeitungssysteme.

Für den voll- und teilautomatisierten ShipLight-Bearbeitungskopf wurde von CLOOS ein sehr schlankes und flexibel einsetzbares Design umgesetzt, das im Wesentlichen lediglich die für die Funktionalität des ShipLight-Prozesses nötige Störkontur aufweist und dadurch handhabungsgerätgeführt vergleichsweise einfach in einer Schiffsstruktur bewegt werden kann. Weiterhin lässt sich der Bearbeitungskopf variabel sowohl an einem Roboter als auch auf einem Traktor installieren. Der Kopf weist eine zylindrische Störkontur von gerade einmal 180 mm im Durchmesser und 420 mm in der Höhe auf. Als Hauptmerkmal des Kopfes ist die Positionierung der Roboterhandachse zwischen dem MAG-Brenner und der Laseroptik für eine maximale Zugänglichkeit am Bauteil und einen minimalen Bauraum zu nennen.

Zusätzlich ist am innenliegenden Tragkörper ein pneumatisch ansteuerbarer Verstellmechanismus zum Wechseln der Anordnung für I- und T-Stöße angebracht. Zugleich erfolgt die variable Positionierung der lateralen Beleuchtungsoptik für das koaxiale Prozessüberwachungs- und Steuerungssystem (PMCS) des Fraunhofer ILT zur geschlossen geregelten Fugenfolge. Die Abbildung 6 zeigt den finalen Aufbau in der I-Stoß- und T-Stoß-Anordnung.

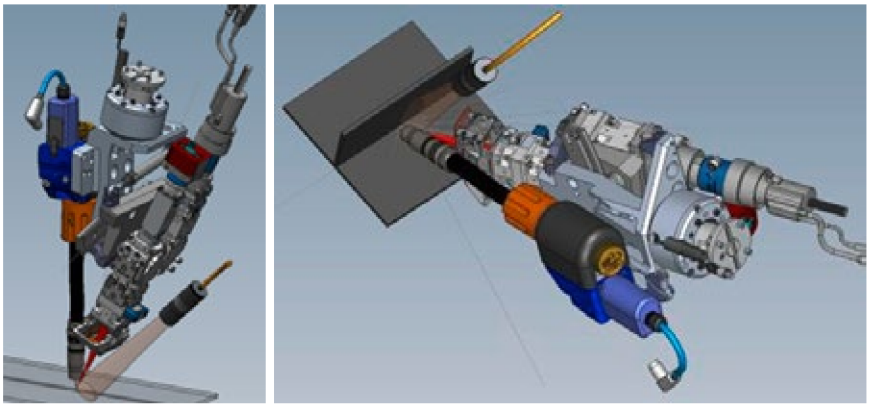


Abbildung 6: Für den voll- und teilautomatisierten ShipLight-Prozess entwickelter ShipLight-Schweißkopf mit reduzierter Störkontur a) in I-Stoßanordnung und b) in T-Stoßanordnung (Quelle: CLOOS)

Bei reduzierter Laserleistung nimmt die Spalttoleranz zu, da hauptsächlich der Lichtbogenprozess zur Spaltüberbrückung beiträgt, während die schmale Nahtwurzel des Laserprozesses an Wirkung verliert, um trotz des Spaltes eine beidseitige Anbindung zu gewährleisten. Durch die Möglichkeit, die Einstellung des Lasers und weitere Parameter wie z. B. die Schweißgeschwindigkeit oder die zugeführte Drahtmenge regelkreisbasiert zu beeinflussen, ist eine Adaption des ShipLight-Prozesses an die geometrischen Bauteilbedingungen bezüglich der Spaltbreite realisierbar („adaptiertes laserunterstütztes Hybridschweißen").

3.3 PROZESSÜBERWACHUNGS- UND STEUERUNGSSYSTEM (PMCS)

Im Projekt wurde vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT ein System zur Fugenfolgeregelung und adaptiven Prozessführung entwickelt. Das Prozessüberwachungs- und Steuerungssystem (PMCS) wurde in Anlehnung an die Richtlinien zur industriellen Bildverarbeitung [3] konzeptioniert und umgesetzt. Der Ansatz der texturbasierten Segmentierung [4] wurde konsequent weiterverfolgt. Das System umfasst eine koaxial zum Strahlengang des Bearbeitungslasers integrierte Kamera sowie eine lateral angeordnete Fremdbeleuchtung (Abbildung 7a).

Abbildung 7: a) ShipLight Bearbeitungskopf mit integrierter Fugenfolgesensorik; b) Prozessaufnahme einer Kehlnahtanordnung mit eingeblendetem Bereich Region of Interest (ROI) und berechnetem Texturbild (Quelle: Fraunhofer ILT)

Während des Schweißprozesses synchronisiert sich die Fremdbeleuchtung mit der Frequenz und dem zeitlichen Stromverlauf der MAG-Schweißquelle. Diese Herangehensweise ermöglicht es dem Steuerungssystem, eine gleichbleibende Bildqualität der Bearbeitungszone und aktuellen Spaltsituation selbst bei schwankenden Schweißprozessbedingungen zu erfassen (Abbildung 7b). Das System ist in einem performanten Industrie-PC integriert und beinhaltet ein Field Programmable Gate Array (FPGA) sowie eine echtzeitfähige speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) für den geschlossenen Regelkreis mit der Robotersteuerung und zur Kommunikation mit peripheren Geräten.

Das Bildverarbeitungssystem führt im Rahmen der Bildanalyse die texturbasierte Fugenlagedetektion und Spaltbreitenmessung aus. Für eine robuste Regelung wird ein Kalman-Filter eingesetzt, um Sprünge in der Stellgröße zu glätten sowie Schleppfehler oder ein Über-

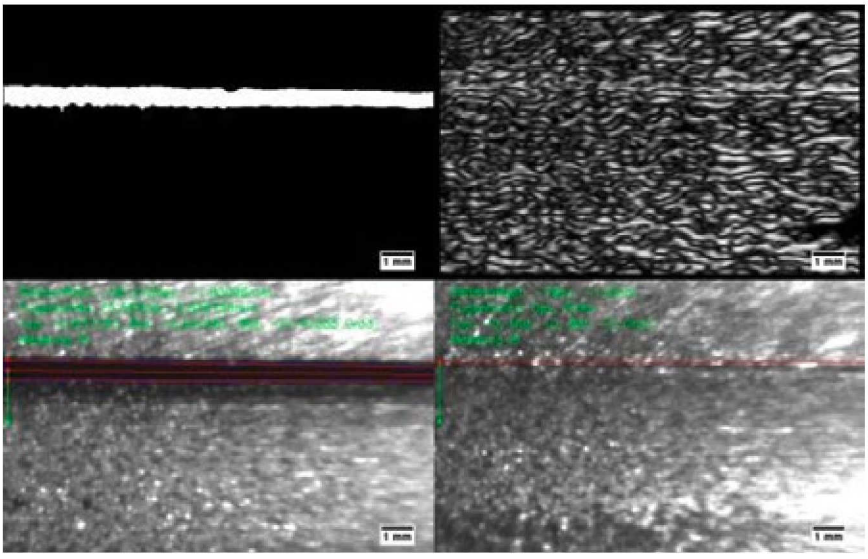


Abb. 8: a) Konturerkennung im Spalt zugeordneter Texturen und lineare Regression; b) Fugenfolge mit maximalem Texturgradient bei Nullspaltsituation (Quelle: Fraunhofer ILT)

schwingen des Regelkreises zu vermeiden. Selbst bei einer Nullspaltbedingung ist der entwickelte PMCS-Sensor in der Lage, die Fügepartner zu unterscheiden und eine Prozessregelung durchzuführen. Der Vorgang der Erkennung der Fuge in beiden Fällen, ein sichtbar vorhandener Spalt und ein technischer Nullspalt, ist in der Abbildung 8 schematisch verdeutlicht. Mit der stetig steigenden Leistungsfähigkeit von FPGAs sowie der PC-Hardware, wie z. B. Grafikkarten mit einer Vielzahl parallel arbeitender Grafikprozessorkerne, ist die für die Fugenfolgeregelung erforderliche Echtzeitimplementierung der rechenintensiven Bildverarbeitungsalgorithmen wirtschaftlich umsetzbar und ein geschlossener Regelkreis realisiert.

3.4 HANDSCHWEISSGERÄT FÜR DEN SHIPLIGHT-PROZESS

Um den neuen laserunterstützten MAG-Schweißprozess in der gesamten schiffbaulichen Fertigungskette einsetzen zu können, sind vollautomatisierte bzw. robotergestützte Bearbeitungssysteme nicht ausreichend. Die Anforderungen in der Blockfertigung und der dann anschließenden Bordmontage hinsichtlich der Zugänglichkeit am Bauteil verlangen eine Systemlösung, die ein besonders hohes Maß an Mobilität und Einsatzflexibilität bereithält.

Demzufolge bestand das Projektziel, für den ShipLight-Prozess ein leichtes und kompaktes Schweißsystem zu entwickeln, das von Hand geführt wird. Die geometrische Anordnung von Laserstrahl und Lichtbogen entspricht dem Bearbeitungskopf für die vollautomatisierte Prozessapplikation. Zur Anpassung an die Fügesituation lässt sich das Handgerät ebenso von einer I-Stoß- in eine T-Stoßvariante verwandeln und umgekehrt. Das Gerät muss mit einer relativ hohen Schweißgeschwindigkeit betrieben werden, um die Vorteile des ShipLight-Prozesses nutzen zu können. Daher benötigt der Schweißer erstens eine Führungshilfe in Form von Rädern oder Rollen, die sich auf dem zu schweißenden Blech abstützen, und zweitens einen motorischen Antrieb, der eine gleichmäßige Bewegung gewährleistet.

Im Zuge der Entwicklung wurden zahlreiche Prototypen aufgebaut und getestet. Das Fraunhofer IAPT verwendete hier die Methoden der additiven Fertigung, sodass Komponenten in sehr kurzer Zeit aus Pulverwerkstoff hergestellt und zum Einsatz gebracht werden konnten. Mit den Funktionsmustern wurden dann Fahr- und Schweißversuche durchgeführt, in denen sich explizit die unterschiedlichen Fahrwerkskonzepte vergleichen und beurteilen ließen.

Die Entscheidung fiel schließlich auf ein kettenangetriebenes Mini-Fahrzeug, das sich durch gute Traktion und Fahrstabilität sowie ein besonders niedriges Fahrwerk auszeichnet. Der Schlitten zur Aufnahme von Laserbearbeitungsoptik und Schweißbrenner ist manuell höhenverstellbar, um den laserunterstützten Hybridschweißprozess am Werkstück auszurichten. Darüber hinaus kann der Schweißbrenner dem Gerät entnommen werden, z. B. um eine Bauteilecke im reinen MAG-Prozess, also ohne Laserunterstützung, auszuschweißen. Das bedeutet, dass dem Werftschweißer sein gewohntes Werkzeug weiterhin zur Verfügung steht. Nach der Operation an schwer zugänglicher Stelle wird der MAG-Brenner dann wieder am Handschweißgerät montiert und per Schnellverschluss arretiert. Die Abbildung 9 zeigt die im Projekt ShipLight durchlaufenen Evolutionsstufen des Handschweißgerätes.

Abb. 9: Evolutionsstufen des ShipLight-Handschweißgerätes für verschiedene Fügeanordnungen (Quelle: Fraunhofer IAPT)

Für den mobilen Lasereinsatz im Werftumfeld ist außerdem die Frage der Lasersicherheit von besonderer Relevanz. Diesem Aspekt wurde durch die Begrenzung der Laserleistung auf 2 kW und die Implementierung eines speziellen Sicherheitskonzeptes im Projekt Rechnung getragen.

3.5 SICHERHEITSKONZEPT FÜR DEN HANDGEFÜHRTEN SHIPLIGHT-PROZESS

Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften des Lasers, verschiedenste Materialien schnell und effizient zu bearbeiten, hat diese Technologie eine immer größere Bedeutung bei industriellen Fertigungsprozessen erlangt. Da der Laser jedoch ein potentiell gefährliches Werkzeug darstellt und bei Kontakt mit reflektierender Laserstrahlung die Gefahr einer Augen- sowie Hautschädigung besteht, müssen der Arbeitsbereich abgeschirmt und Personen, die sich in diesem Bereich aufhalten, mit Schutzbrillen ausgestattet werden. Gerade bei Großbauteilen ist es zum Teil jedoch schwierig und kostspielig, einen kompletten Bereich mit Laserschutzwänden auszustatten. Des Weiteren kommen immer häufiger handgeführte Lasersysteme zum Einsatz, die bei der Verwendung eine räumliche Nähe des Bedieners zur Prozesszone, in der gefährliche Strahlung austritt, verlangen. So besteht immer eine Verletzungsgefahr, hervorgerufen durch menschliche Fehler. Auch Verletzungen durch Unfälle oder Missbrauch können hierbei sehr schwerwiegend sein. In diesem Teilprojekt war daher das Hauptziel eine Erarbeitung eines intelligenten Sicherheitskonzeptes für die mobile Lasermaterialbearbeitung, um Gesundheitsrisiken zu minimieren.

Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung wurde zu Beginn des Projektes anhand der technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Laserstrahlung) der maximale Expositionsgrenzwert bestimmt. Dieser Wert ist das maximale Ausmaß der Laserstrahlung, dem das Auge oder die Haut ausgesetzt werden darf, ohne dass akute Gesundheitsschädigungen auftreten. Für die Haut liegt der Expositionsgrenzwert für die im ShipLight-Prozess gewählte Wellenlängen 1070 nm bei 1000 mW/cm² und für das Auge bei 5 mW/cm².

Zur Ermittlung, welche Bestrahlungswerte beim ShipLight-Prozess auftreten, wurden Testschweißungen an im T-Stoß zueinander ausgerichteten Blechen durchgeführt. Die Spaltmaße der auszuführenden Kehlnähte wurden dabei variiert, sodass auch eventuell auftretende Strahlung auf der Rückseite der zu schweißenden Naht gemessen werden konnte. Hierbei

stellte sich heraus, dass sogar bei einer vergleichsweise geringen Laserleistung von 1 kW die Strahlungswerte den maximalen Grenzwert auf der Prozessseite um ein Vielfaches überschritten (ohne Abschirmung bzw. Einhausung der Prozesszone). Rückseitig gemessen lagen die Bestrahlungswerte bis zu einem Spaltmaß von 3 mm unterhalb des Grenzwertes (Abbildung 10a).

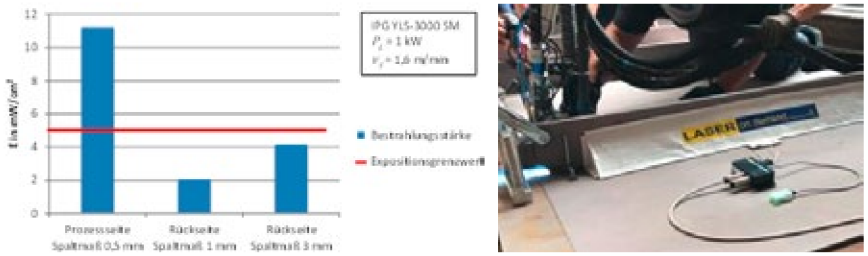


Abbildung 10: a) maximal gemessene Bestrahlungsstärke (Vergleich Prozessseite und Rückseite bei variierenden Spaltmaßen); b) aktive Rückseitenabschirmung (Quelle: LASER on demand)

Im Fall des handgeführten Systems ist der Mitarbeiter in einem kurzen Abstand zum Schweißprozess der Strahlung dauerhaft ausgesetzt. Aus diesem Grund wurde das Ship-Light-Handschweißgerät als eigensicheres System ausgelegt. Die Umsetzung erfolgte in einer 3-Stufen-Methode.

Zuerst wurde der Bereich der Prozesszone mechanisch eingehaust und die Laserstrahlung gekapselt, sodass eine inhärent sichere Konstruktion sichergestellt werden konnte. Zudem wurde eine Absaugung angebracht, die schädliche Schweißrauche direkt an der Entstehungsstelle entfernt.

Im zweiten Schritt wurden technische sowie ergänzende Schutzmaßnahmen durchgeführt, um eine Fehlbedienung des Systems auszuschließen. So wurden beispielsweise sichere Näherungsschalter eingesetzt, mit denen eine Aufsetzkontrolle des Handsystems sichergestellt wird. D.h. der Laserstrahl kann nur freigegeben werden, wenn zuvor eine korrekte Positionierung des Systems erfolgt. Wichtig war bei der Auswahl der Bauteile der Performance Level (PL) gemäß DIN EN ISO 13849-1, der das Maß für die Zuverlässigkeit einer Sicherheitsfunktion angibt. Für das Handsystem ergab sich der Performance Level d, der die zweithöchste Sicherheitsstufe darstellt. Damit auch die Rückseite des Schweißbereiches bei größeren Spaltmaßen abgesichert wird, wurden aktive Rückseitenabschirmungen entwickelt (Abbildung 10b). Die Rückseitenabschirmung beinhaltet eine Sensorfolie, die bei Beschädigung durch den Laserstrahl dafür sorgt, dass der Laser abgeschaltet wird und keine Strahlung in die Umgebung abgegeben wird. Bei Beschussversuchen der Folie wurde eine Abschaltzeit des Lasers von unter 80 ms erzielt.

Im letzten Schritt der 3-Stufen-Methode wurde der Schweißhelm des Mitarbeiters um ein laserstrahlabschirmendes Schutzglas für die Wellenlängen 1060 nm und 1070 nm erweitert. Zusätzlich wurde der Mitarbeiter über mögliche bestehende Restrisiken unterwiesen, die bei der Bearbeitung mit einem Laser auftreten können.

Während der abschließenden Validierungsphase des Handschweißgerätes konnte mittels weiterer Strahlungsmessungen sichergestellt werden, dass ab 1 m Entfernung zum ShipLight-Prozess kein Laserschutz notwendig ist, da der maximal zulässige Bestrahlungswert nicht überschritten wurde. Somit ist nur der Mitarbeiter, der das Gerät bedient, dazu verpflichtet, eine Laserschutzbrille zu tragen, und die umliegenden Mitarbeiter werden in ihrer normalen Arbeit nicht beeinträchtigt. Alle Arbeiten und Konzepte wurden hierbei fortlaufend mit der Berufsgenossenschaft abgestimmt, sodass Schritt für Schritt ein eigensichereres und intelligentes Handsystem für einen mobilen laserunterstützten Schweißprozess entwickelt worden ist. Für die zukünftige Anwendung im Werftumfeld ist das Durchlaufen eines Freigabeprozesses mit der Berufsgenossenschaft unter Festlegung der Einsatzbedingungen geplant.

3.6 KONSTRUKTION UND SIMULATION

Neben der ShipLight-Schweißprozessentwicklung wurden begleitend außerdem Lösungen und Maßnahmen für eine verzugsarme Konstruktion von gewichtsoptimierten Schiffbaustrukturelementen entwickelt und abgeleitet. Im Ergebnis steht eine Simulationssoftware zur Verfügung, die zur Unterstützung der Verzugsoptimierung in der Konstruktion dient und bei der Prozessentwicklung zur Flexibilisierung und beschleunigten Adaption der verzugsarmen Fertigung an neuen Bauteilen führt. Das Ziel der Simulation ist eine Reduzierung der schweißbedingten Verzüge. Die Software basiert auf der analytischen Verzugsprädiktion. Eine effiziente Kopplung aus numerischen und analytischen Ansätzen in einem hybriden Modell gewährleistet für die Verwendung in der Fertigungsplanung eine robuste und einfache Bedienung der Software. Hierzu wurden bekannte Berechnungsansätze für konventionelle Schweißverfahren, basierend auf den Modellen von Okerbloom und Vinukurov, an die spezifischen Eigenschaften des ShipLight-Schweißprozesses angepasst. Die analytische Formulierung erlaubt eine sehr schnelle Vorhersage der Verzugssituation in der numerischen Schweißsimulation. Bestehende Modelle für Quer- und Längsverzüge wurden mit zusätzlichen thermographischen Analysen bewertet. Die Bewertung der Nahtgeometrie erfolgte durch Mikroschliffe. Zusätzlich berücksichtigt das Modell die intensitätsbezogene Streckenenergie, bestehend aus der Laserleistung, der Vorschubgeschwindigkeit und der Fokuslage, der Plattendicke sowie der thermischen Wirkung des Schweißprozesses, bestimmt anhand der $T_{800\,°C}$-Feldgröße. Die thermische Verifizierung des Energieeintrages erfolgte anhand thermografischer Messungen. Die mechanische Verifizierung des Verzuges wurde mit einer Koordinatenmessmaschine sowie videometrischen Aufnahmen nach dem Digital-Image-Correlation (DIC)-Prinzip durchgeführt. Die hybride Simulation ist geeignet, präventiv, gezielt und konturnah für 2,5D-Strukturen bei Einsatz des ShipLight-Prozesses Schweißverzüge anzugeben.

Zusätzlich zur Unterstützung der Verzugsoptimierung in der Konstruktion und in der Fertigung durch das entwickelte Software-Hilfsmittel wurden wiederkehrende, repräsentative Strukturen und Schweißaufgaben auf der Werft identifiziert und der thermische

Verzug dieser Einzelsegmente analysiert. Bei den ausgewählten Strukturelementen wurde als wesentliche Verzugssituation das Beulen identifiziert. Bei diesem Verzug handelt es sich vornehmlich um eine elastische Verformung, die durch Überlagerung von unterschiedlichen Grundformen entsteht. Die Neigung einer Platte, entsprechendes Beulen auszuprägen, resultiert zum einen aus der Plattengröße, der Lokalisierung und der eingebrachten Energiemenge im Schweißprozess sowie der genutzten Spanntechnik und -position. Die Einflussgrößen und deren Intensität wurden sowohl experimentell als auch in der Simulation an den repräsentativen Strukturen untersucht. In der Konstruktion wurden zusammen mit der MEYER WERFT Strukturelemente und Verbindungsvarianten beleuchtet. An die Arbeitsvorbereitung wurden Empfehlungen für die optimale Spannmittelposition sowie die für die jeweilige Schweißaufgabe geeignete Schweißstrategie ausgegeben. Die kumulierten Wärmewirkungen wurden in Simulationsmodellen mit verschiedenen Schweißreihenfolgen mit Hilfe der Softwarelösung simufact.welding® für eine abstrahierte Demonstratorstruktur abgeleitet. Zusätzlich erfolgten validierende statische und dynamische Verzugsmessungen. Abschließend entstand für eine vereinfachte Interpretation der Ergebnisse ein Modell der Steifigkeit, wie es in der Abbildung 11 dargestellt ist.

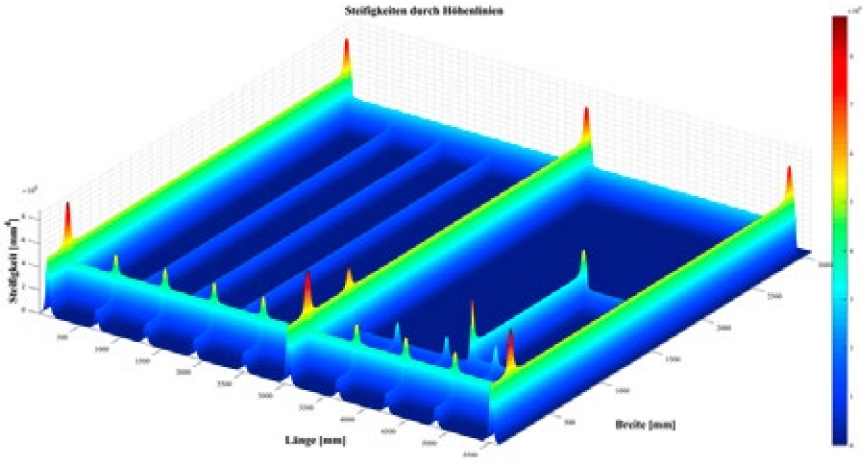


Abbildung 11: Analyse der Steifigkeit am Gesamtdemonstrator (Quelle: Fraunhofer IAPT)

4 VALIDIERUNG DER PROZESS- UND SYSTEMENTWICKLUNG…

4.1 … AUF DER MEYER WERFT

Im Mittelpunkt der Validierung auf der MEYER WERFT standen die mechanisierten und automatisierten Systemvarianten. Die entwickelten ShipLight-Schweißprozesse sind sowohl an einer Roboterstation als auch als mobile Variante an einem speziellen Schweißtraktor anwendbar. Für eine maximale Reproduzierbarkeit und eine höhere Flexibilität bezüglich vielseitiger Einstellmöglichkeiten sind die hier dargestellten Validierungsergebnisse vollständig am Robotersystem entstanden.

Der Kern der Validierung war die Anwendung der entwickelten ShipLight-Schweißprozesse und -systeme an einem für den Schiffbau auf der MEYER WERFT repräsentativen Bauteil. Dies zeigt zum einen, ob die Systemtechnik beispielsweise die benötigte Funktionalität und Zugänglichkeit der Schweißstellen bereitstellt und zum anderen, wie tolerant der Schweißprozess in realen Situationen reagiert. Schlussendlich war das Ziel der Validierung die konkrete Bewertung der Potentiale des entwickelten ShipLight-Schweißprozesses in Bezug auf den, aus dem Wärmeeintrag resultierenden, Bauteilverzug.

Neben der weiteren Entwicklung der automatisierten Schweißprozesse hatte die MEYER WERFT im Projekt ShipLight für diese Untersuchung den untenstehenden Bauteildemonstrator definiert, der ein relevantes schiffbauliches Strukturelement darstellt (Abbildung 12). Innerhalb des Demonstrators wurden Elemente mit konventionellen Plattenstärken mit einem „dünneren" Decksblech kombiniert. Durch diese Kombination sollten die Potentiale des entwickelten Schweißprozesses zusätzlich verdeutlicht werden.

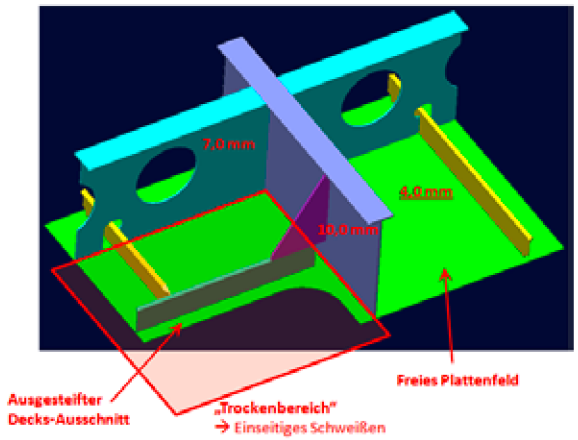


Abb. 12: MEYER WERFT Bauteildemonstrator (Quelle: MEYER WERFT)

Die Fertigung der Struktur erfolgte parallel in zwei Varianten:

- Variante 1 stellte die Referenz dar. Bei der Fertigung kam das heute im Schiffbau weit verbreitete MAG-Schweißen zum Einsatz. Die verwendeten Prozessparameter entsprechen der IST-Situation im manuellen Bereich der Vorfertigung auf der MEYER WERFT.
- Variante 2 wurde mit der entwickelten Systemtechnik und dem neuen ShipLight-Prozess abgearbeitet. Der Fokus lag hierbei auf einer höchstmöglichen Reduktion der eingebrachten Wärmemenge.

Grundlage für beide Demonstrator-Varianten war ein vorgefertigtes Paneel (Abbildung 13a). Die zugehörigen Decksbalken wurden entsprechend der MEYER WERFT-Fertigungsstrategie mit dem Laser-MAG-Hybridschweißverfahren abgearbeitet. Die Abbildung 13b) zeigt eines der beiden gehefteten Bauteile mit allen zugehörigen Komponenten. Für das

Schweißen am stationären Roboter im MEYER WERFT-Schweißlabor (Abbildung 13c) mussten die Demonstratoren mehrere Male umpositioniert werden–entsprechend richtete sich die Abfolge der Schweißungen im Wesentlichen nach der Zugänglichkeit. Dies galt gleichermaßen für beide Schweißvarianten.

Abbildung 13: Fertigungsschritte der Bauteildemonstratoren (Quelle: MEYER WERFT)

Als Zwischenfazit ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die entwickelte Systemtechnik (Automatiksystem) die Abarbeitung nahezu aller Bereiche des Bauteils ermöglicht. Im Vergleich zu heute gängigen Laser-MAG-Hybridschweißköpfen ist die Zugänglichkeit, aufgrund der minimierten Baugröße, deutlich verbessert. Zudem zeigt sich, dass der im Projekt ShipLight entwickelte laserunterstützte MAG-Schweißprozess auch in Zwangspositionen und in realistischen Fertigungssituationen anwendbar ist.

Der Fokus der Entwicklung lag allerdings auf der Reduktion der Wärmeeinbringung und einer daraus potentiell reduzierten Verformung des Bauteils. Der in der Abbildung 14 dargestellte Vergleich der Wärmeeinbringung zeigt eindrucksvoll, dass bei der gewählten Kehlnahtschweißung der Wärmeeintrag in das Bauteil um über 50% reduziert werden konnte. Die Bilder wurden jeweils direkt im Anschluss an die Schweißung mit einer zertifizierten Wärmebildkamera aufgenommen.

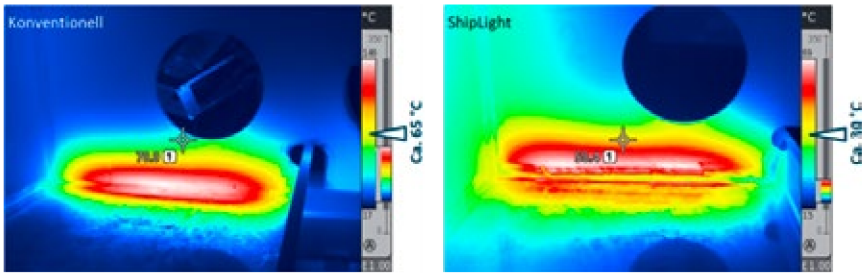


Abb. 14: Beispielhafter Vergleich der Wärmeeinbringung: konventioneller MAG-Prozess und neuer laserunterstützter MAG-Prozess (ShipLight-Prozess) (Quelle: MEYER WERFT)

Nach Auswertung aller Schweißungen ergaben sich die folgenden aufsummierten Streckenenergien für die Abarbeitung der beiden Bauteile:

› konventioneller MAG-Prozess: 6.719,7 kJ
› ShipLight-Prozess: 3.558,1 kJ

Dies spiegelt die Reduzierung der eingebrachten Wärme um ca. 50 % wider.

Mit Unterstützung des Fachbereichs Vermessung der MEYER WERFT wurden die geometrischen Gegebenheiten der beiden Demonstratoren jeweils vor und nach dem Verschweißen erfasst. Zum Einsatz kam hierbei ein Leica HDS7000 Laserscanner. Die Auswertung der Aufnahmen zeigt, dass die Ausgangssituation beider Demonstratoren eine sehr hohe Ähnlichkeit aufweist. Das Laser-MAG-Hybridschweißen der Decksbalken und das Heften der weiteren Bauteile haben jeweils keine relevanten Verformungen nach sich gezogen.

Im Vergleich zum konventionell geschweißten Demonstrator weist die mit dem ShipLight-Prozess geschweißte Variante deutlich reduzierte Verformungen auf. Im linken, eingespannten Plattenfeld ist Beulung vollständig ausgeblieben. Im rechten, freien Plattenfeld und im Randbereich ist die Beulung deutlich verringert. Diese Effekte zeigen eindrucksvoll, dass der reduzierte Wärmeeinfluss die gewünschte Reduktion der Verzüge bewirkt.

Für die MEYER WERFT stellt dieses Ergebnis ein großes Potential dar. Zum einen kann der neue Schweißprozess wesentlich dazu beitragen, dass zukünftig dünnere Materialien in Kreuzfahrtschiffen zum Einsatz kommen können – hiermit ist eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs möglich. Zum anderen könnte bei den heute üblichen Materialstärken eine deutliche Reduktion der fertigungsbedingten Verformungen erreicht werden. Dies stellt ein gesteigertes Qualitätsniveau dar.

Zu prüfen ist für die MEYER WERFT nun im Nachgang an das Projekt, ob die positiven Ergebnisse der vergleichbar kleinen Demonstratoren auch auf große schiffbauliche Strukturen übertragbar sind. Zudem muss die entwickelte Systemtechnik für den Einsatz in der Fertigung noch deutlich weiter entwickelt werden und es ist zu prüfen, ob ein breiter Einsatz hier technisch und wirtschaftlich sinnvoll möglich ist.

4.2 … AUF DER FR. LÜRSSEN WERFT

Die Validierung des Handschweißgerätes fand auf der Fr. Lürssen Werft statt. Im Februar 2018 wurde auf der Werft eine Vielzahl von Testschweißungen an Probeblechen durchgeführt. Die Erkenntnisse dieser Versuche flossen in die Weiterentwicklung und Optimierung des Gerätes ein. Im Juli/August 2018 erfolgte dann die abschließende Erprobung. Hierzu hatte die Fr. Lürssen Werft einen Demonstrator konstruiert, der alle wesentlichen Konstruktionselemente enthält und eine relevante Größe besitzt (Abbildung 15a). Der Demonstrator besteht aus 73 Teilen, die Maße des Demonstrators betragen ca. 5 m x 2,3 m x 2 m und die Länge der Schweißnähte umfasst in Summe gut 200 m. Die Fertigung erfolgte in 3 Schritten: Fügen der Paneele, Vorfertigung der einzelnen Baugruppen und Montage der Baugruppen (Abbildung 15b).

Abb. 15: a) CAD-Ansicht des Demonstrators (Quelle: Fr. Lürssen Werft); b) Schweißen des Demonstrators mit dem hybriden Handschweißsystem (Quelle: Fraunhofer IAPT)

Von den mehr als 200 m Schweißnahtlänge konnten über 80 % mit dem hybriden Handschweißgerät gefügt werden. Dabei wurde eine Laserleistung von 1 kW bzw. 2 kW eingesetzt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug dank der Laserunterstützung und des Antriebs 1 m/min. Im Zusammenspiel mit dem MAG-Prozess wurde im Minimum eine Streckenenergie von 5 kJ/cm erreicht. Beim konventionellen Handschweißen gerader Strecken sind (ohne das angetriebene Gerät) Vorschubgeschwindigkeiten von 0,4 m/min bis 0,5 m/min realisierbar, die eingebrachte Streckenenergie liegt dann im Bereich zwischen 5 kJ/cm und 6 kJ/cm, jeweils für den Fall, dass keine größeren Spalte überbrückt werden müssen. Im Vergleich der Prozesse konnte also die reine Schweißzeit in den Versuchen mit dem Handschweißgerät mehr als halbiert werden, eine generelle Reduktion der Streckenenergie war damit allerdings nicht verbunden. Der Grund besteht darin, dass die Vorschubgeschwindigkeit mit dem Gerät nicht durch den laserunterstützten Prozess, sondern vielmehr durch dessen Antriebstechnik limitiert wird.

Die Versuche haben das Potential des hybriden ShipLight-Schweißprozesses aufgezeigt. Dieses liegt aus Sicht der Fr. Lürssen Werft vornehmlich im Bereich der Vorfertigung, da hier überwiegend gerade Kehlnähte geschweißt werden, sodass im Prinzip über 95% der Nähte erzeugbar sind, lediglich Nahtanfang und -ende müssen aus Gründen der Zugänglichkeit manuell nachgearbeitet werden. In der Montage der Baugruppen ist dagegen der Einsatz des hybriden Handschweißgerätes stärker eingeschränkt, da es viele verschachtelte Bereiche gibt, die nur unzureichend mit dem hybriden Handschweißgerät erreicht werden können.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die neuartige ShipLight-Technologie verringert das Gefälle zwischen hochautomatisierter 2D-Paneelfertigung und konventioneller Bearbeitung von 3D-Sektionen im Schiffbau. Im vorliegenden Bericht wurde ein Überblick über den neuen Prozess sowie dessen Einordnung in das bestehende Werftumfeld gegeben. Weiterhin wurde eine neu entwickelte koaxiale Fugenfolgesensorik vorgestellt, die perspektivisch ein adaptives Schweißen ermöglicht.

Als wesentliches Ergebnis konnte gezeigt werden, dass mit dem ShipLight-Prozess, verglichen mit dem konventionellen MAG-Verfahren, sowohl an I- als auch an T-Stößen erheblich höhere Schweißgeschwindigkeiten bei einer gleichzeitig gesteigerten Einschweißtiefe realisierbar sind. Trotz des unterstützenden Lasers, der diesbezüglich bisher als wenig tolerant galt, lassen sich dabei Spalte bis zu 3 mm problemlos überbrücken, sogar mit Potential für die Bearbeitung noch größerer Spaltmaße. Durch die aktive, echtzeitfähige, automatisierte Fugenfolgeregelung sowie die Inline-Qualitätssicherung wird eine hohe Prozesssicherheit erreicht.

Es besteht die Chance, dass die neue ShipLight-Technologie die verzugsbedingte Nacharbeit gefügter Schiffsstrukturen durch eine deutliche Reduktion der eingebrachten Wärmemenge aufgrund einer verringerten Streckenenergie erheblich senkt. Auf diese Weise unterstützt der verzugsarme Prozess die Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen mit den angestrebten geringen Blechdicken von 3 mm oder 4 mm. Dies kann zukünftig einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in der Schifffahrt leisten. Die ShipLight-Technologie berücksichtigt die individuellen Anforderungen des Schiffbaus durch die neuen flexibel automatisierten Fertigungssysteme, insbesondere auch mit einer noch zu optimierenden, aber bereits funktionsfähigen und auch sicherheitskonformen mobilen Lösung.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt ShipLight wurde mit freundlicher Unterstützung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) nach einem Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die hervorragende Zusammenarbeit. Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung unserer Kollegen und aller Projektpartner, deren Fachwissen die Forschungsaktivitäten überhaupt ermöglicht hat.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Cerwenka, G.; Steinmeier, O.; Petronis, E.; Keßler, T.; Fischer, A.; Fiedler, W.; Schulze, F.; Emmelmann, C.: Development of a flexible low laser power hybrid (LLPH) technology for shipbuilding including additive manufactured semi-automated hand-held unit, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], Fürth, Germany, Procedia CIRP 74 (2018) 770–774.

[2] Cerwenka, G.; Wollnack, J.; Krähling, T.; Jayaprakash, R.; Emmelmann, C.: 3D/6D calibration and real-time focus shift compensation for automated 30 kW laser remote scanner, Journal of Laser Applications.

[3] VDI/VDE/VDMA 2632 Blatt 2:2015-10, Industrielle Bildverarbeitung - Leitfaden für die Erstellung eines Lastenhefts und eines Pflichtenhefts.

[4] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2015. Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung und Regelung der Bearbeitungsbahn bei einem Laser-Fügeprozess. 25.06.2015. DE102013022085A1.

LASAAS –
"LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON STAHL UND ALUMINIUM FÜR DIE ANWENDUNG IM SCHIFFBAU"

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX386A-F

DR.-ING STEFAN KAIERLE	Laser Zentrum Hannover e. V.
DIPL.-ING. RABI LAHDO	Laser Zentrum Hannover e. V.
DR.-ING. RAINER WAGENER	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF(Darmstadt)
DIPL.-ING. BENJAMIN MÖLLER	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF(Darmstadt)
DR.-ING. OLIVER MEIER	LASER on demand GmbH (Burgdorf)
DR.-ING. FLORIAN ALBERT	Scansonic MI GmbH (Berlin)
DR.-ING. MARKUS KOGEL-HOLLACHER	Precitec GmbH & Co. KG (Gaggenau)

MOTIVATION

Die Einführung der Richtlinie für den Energy Efficiency Design Index (EEDI) im Jahr 2012, durch welche der spezifische CO_2-Fußabdruck für Frachtschiffe bewertet wird, erfordert bei der Schiffentwicklung ein gesteigertes Umweltbewusstsein [1]. Durch die Umsetzung von Leichtbaukonstruktionen wird unter Verwendung von Leichtbauwerkstoffen (z. B. Aluminiumlegierungen) eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und eine Erhöhung des Transportgewichts erreicht. Im Yachtbau werden hybride Werkstoffverbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierungen wirkungsort- und funktionsgerecht mit dem Ziel der Erhöhung Schiffsstabilität und Fahrtgeschwindigkeit eingesetzt [2]. Zu diesem Zweck kommen im Yachtbau für die Aufbauten Aluminiumlegierungen und für den Schiffsrumpf Stahl zum Einsatz, deren Verbindung durch den Einsatz einer explosionsgeschweißten hybriden Werkstoffkombination aus Stahl und einer Aluminiumlegierung erfolgt [4]. Die Herstellung derartiger Adapter ist zeit- und kostenintensiv [3]. Zwar weisen diese Adapter Vorteile hinsichtlich ihrer Verformbarkeit auf, können jedoch im Schiffbau aufgrund der geringen übertragbaren Kräfte lediglich durch eine Überdimensionierung und für symmetrische Belastungsfälle eingesetzt werden. In Abb. 1 ist der Aufbau eines explosionsgeschweißten Adapters [4] und der Einsatzbereich in einer Schiffskonstruktion [5] dargestellt.

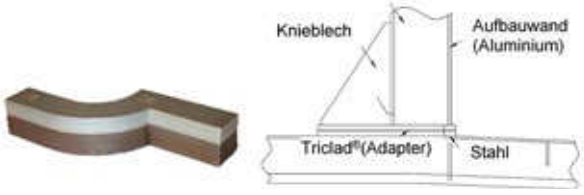


Abb. 1: Explosionsgeschweißter Adapter [4] (links) und typische Anwendung von Stahl-Aluminium-Verbindungen im Schiffbau [5] (rechts)

In der Automobilindustrie hat sich das Laserstrahlschweißen, bedingt durch seine gute Automatisierbarkeit, hohe Schweißgeschwindigkeit und exzellente Fügequalität bereits als eines der Standardverfahren etabliert. Ergebnisse aktueller Forschungsprojekte zum Laserstrahlfügen von Stahl und Aluminiumlegierungen für Blechdicken < 3 mm zeigen das hohe Potential des Verfahrens auch für den maritimen Bereich [6, 7]. Die Erzeugung von Mischverbindungen im Bereich größerer Blechdicken wurde mittels Laserstrahlschweißen bisher nicht untersucht. Die Anwendung des Laserstrahlschweißens auf hybride Dickblechverbindungen stellt damit einen ersten Schritt zur Etablierung des Laserstrahlschweißens in diesem Bereich dar, insbesondere aufgrund der steigenden Verfügbarkeit von Hochleistungslaserstrahlquellen. Ziel dieses Projektes ist es daher, einen verlässlichen Laserstrahlschweißprozess zum Fügen von Dickblechen aus Stahl und Aluminiumlegierungen mit einer Einschweißtiefenregelung zu entwickeln.

STAND DER TECHNIK

Dem hohen Potential von laserstrahlgeschweißten Stahl-Aluminium-Mischverbindungen stehen hohe werkstoff- und prozesstechnische Herausforderungen entgegen. Diese basieren auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Stahl und Aluminium [8, 9]. Dabei führen insbesondere die unterschiedlichen Schmelztemperaturen, Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeausdehnungen zu thermisch induzierten Spannungen und Verzug im Bauteil [3]. Zudem kommt es generell beim Schmelzschweißen, bedingt durch eine begrenzte Löslichkeit der Elemente, zur Bildung von harten, spröden intermetallischen Phasen entlang der Schweißnaht [10, 11, 12]. Dadurch wird die Festigkeit der Fügeverbindung sowie deren anschließende Umformbarkeit negativ beeinflusst, was auf eine Materialversprödung durch derartige Phasen zurückzuführen ist. Mögliche Verbindungen der Struktur FexAly sind die aluminiumreichen Verbindungen wie $FeAl_3$ oder Fe_2Al_5, die sich bevorzugt in der Diffusionszone ausbilden [10]. Die Bildung intermetallischer Phasen ist physikalisch nicht zu vermeiden, jedoch können sie durch die Anordnung des Fügepaars bei einer Überlappschweißverbindung minimiert werden. Hierbei liegt das Stahlblech auf dem Aluminiumblech und es wird durch das Stahlblech in das Aluminiumblech eingeschweißt [13, 14]. Dies führt im Mischschweißgut zur Bildung eines verformungsfähigen α-Mischkristalls mit geringem Aluminiumanteil. Da beim Laserstrahlschweißen kein Zusatzwerkstoff eingesetzt wird, wird die Schweißnahtqualität lediglich über das Mischungsverhältnis von Stahl und Aluminium bestimmt. Dabei kann das Mischungsverhältnis über die Steuerung der Einschweißtiefe eingestellt werden, siehe Abb. 2 [15].

Anhand der Abbildung ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Schweißnahtqualität im Querschliff zu erkennen. Dabei führt eine abnehmende Vorschubgeschwindigkeit zu einer ansteigenden Einschweißtiefe und damit einhergehend zu einer Zunahme des aufgeschmolzenen Aluminiumanteils im Schweißgut. Infolgedessen nimmt die Sprödigkeit des Gefüges zu, was die Rissbildung und ein frühzeitiges Versagen der Verbindung begünstigt. Die Mischverbindungen im Dünnblechbereich erreichen bei Verwendung optimaler Einschweißtiefe in das Blech der Aluminiumlegierung unterhalb von 500 µm eine streckenspezifische max. Scherzugkraft von etwa 156 N/mm [14], 172 N/mm [13] und

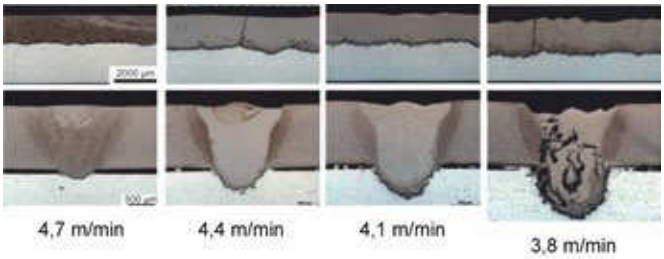


Abb. 2: Zunahme des Anteils von spröden intermetallischen Phasen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen bei abnehmender Vorschubgeschwindigkeit (oben: Längsschliffe, unten: Quer-schliffe) [15]

182 N/mm [16]. Da die Einschweißtiefe unter der Bedingung einer gleichbleibenden Anbindungsbreite den Haupteinfluss auf die Schweißnahtqualität ausübt, muss die Einschweißtiefe bei variierenden Bedingungen, wie z. B. Blechdickensprüngen, konstant gehalten werden. Eine effiziente Möglichkeit eine gleichbleibende Einschweißtiefe zu erreichen, kann über Echtzeitregelungssysteme auf Basis der Analyse spektraler Prozessemissionen und der Kurz-Kohärenzinterferometrie erfolgen [15, 17, 18]. Beide Systeme wurden bisher zum Laserstrahlschweißen der Mischverbindung für den Dünnblechbereich untersucht.

ZIELSTELLUNGEN

Aus dem Ziel des Verbundprojekts, Laserstrahlschweißungen dickwandiger Stahl- an Aluminiumbleche mit Hilfe einer Einschweißtiefenreglung vor dem Hintergrund der Anwendung im maritimen Umfeld umzusetzen, leiten sich die Teilziele der Verbundpartner ab. Das Laser Zentrum Hannover e. V. ist federführend für die Prozessentwicklung und -umsetzung verantwortlich. In diesem Zusammenhang werden erste qualifizierende Maßnahmen und Festigkeitsbewertungen durchgeführt. Die Scansonic MI GmbH untersucht im Projekt systemtechnische Grundlagen für fokusshiftfreie Bearbeitungsoptiken bei hohen Laserleistungen, welche zusätzlich Optionen zur schnellen Strahloszillation sowie zur Einschweißtiefenmessung bieten. Im Rahmen des Projekts wird eine Bearbeitungsoptik in modifizierbarer Konfiguration für beide Einschweißtiefenmesssysteme bereitgestellt. Neben der spektralen Prozessemissionen wird durch die Precitec GmbH & Co. KG die Einschweißtiefenkontrolle auf Basis der Kurz-Kohärenzinterferometrie erprobt und in den Schweißprozess integriert. Das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF bewertet die neuartigen Schweißverbindungen grundlegend anhand einfacher Überlappverbindungen sowie praxisrelevanter Adapterproben unter zyklischer Belastung und in korrosiver Umgebung. Die Übertragbarkeit der Laborschweißungen auf Laserstrahlschweißungen unter anwendungsnahen Bedingungen wird schließlich durch die LASER on demand GmbH ermöglicht. Dadurch führen die Ziele des Verbundprojektes LaSAAS ausgehend von der grundlegenden Prozessentwicklung bis hin zu einer anwendungsbezogenen Komponente für den Einsatz im Schiffbau zu einem innovativ, breiten Themenspektrum. Auf dieser Weise soll den Endanwendern (Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG und MEYER WERFT GmbH & Co. KG) das hohe Einsatzpotenzial der laserstrahlgeschweißten Adapter für die Anwendung im Schiffbau aufgezeigt werden.

VERSUCHSAUFBAU UND SYSTEMTECHNIK

Die Schweißprozessentwicklung wurde unter Verwendung des Scheibenlasers TruDisk 16002 (TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH) mit einer maximalen Laserstrahlleistung von 16 kW und des Laserbearbeitungskopfes BO-SF (Scansonic MI GmbH) durchgeführt. Die Strahlformung im Bearbeitungskopf erfolgt über mehrere vollreflektierende Spiegel und einen komplex mehrlagig beschichteten teildurchlässigen Spiegel. Durch die Verwendung einer Fokussierbrennweite von 250 mm, einer Kollimationsbrennweite von 120 mm und eines Faserdurchmessers von 0,6 mm ergibt sich ein Spotdurchmesser von 1,25 mm. Zur Erhöhung der Anbindungsbreite besteht die Möglichkeit über einen Scanner den Laserstrahl quer zur Vorschubrichtung zu pendeln. Mit Hilfe des im Verbundprojekt entwickelten Laserbearbeitungskopfes kann die Einschweißtiefenregelung sowohl auf Basis der spektralen Prozessemissionen als auch auf Basis der Kurz-Kohärenzinterferometrie untersucht werden. In beiden Systemen kann der Messfleck quer und längs sowie in vertikaler Richtung zum Laserstrahl exakt mit Hilfe von präzisen Linearachsen manuell positioniert werden. In Abb. 3 werden der Versuchsaufbau mit Spanntechnik und Bearbeitungskopf (links) sowie schematische Darstellungen des Bearbeitungskopfes mit optischen Komponenten (mittig und rechts) gezeigt.

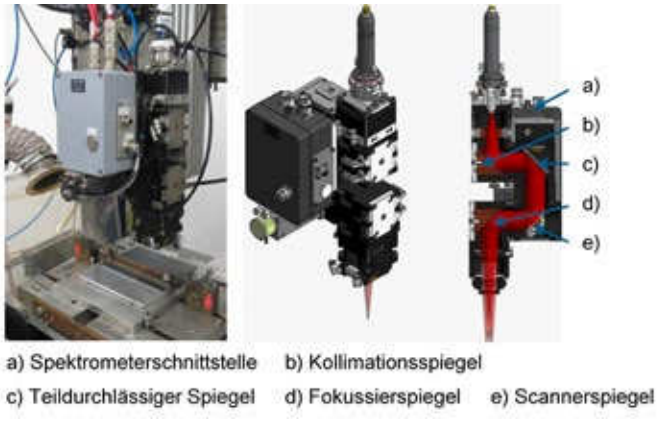


Abb. 3: Versuchsaufbau mit Spanntechnik und Bearbeitungskopf (links) sowie schematische Darstellungen des Bearbeitungskopfes mit optischen Komponenten (mittig und rechts)

VERSUCHSPROGRAMM, VERSUCHSMATERIAL UND AUSWERTEMETHODEN

Die grundlegende Schweißprozessentwicklung wurde zu Beginn ohne den Einsatz einer Einschweißtiefenregelung anhand von überlappgeschweißten Mischverbindungen aus dem Stahl S355 (t = 5 mm) und der Aluminiumlegierung EN AW-6082 (t = 8 mm) durchgeführt. Um den Einfluss der Prozessparameter auf die Schweißnahtqualität zu ermitteln, wurden die Mischverbindungen u.a. Sichtprüfungen, metallografischen Analysen sowie Festigkeitsprüfungen unter quasistatischer und zyklischer Belastung unterzogen. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse bzw. mit den optimalen Schweißparametern wurden anschließend Adapterstücke geschweißt und hinsichtlich ihrer Festigkeit zerstörend geprüft. Nachdem der Schweißprozess im Labormaßstab erfolgreich umgesetzt wurde, wurden die

Adapter unter industrienahen Bedingungen durch den Verbundpartner LASER on demand GmbH gefügt. Parallel dazu wurde der Funktionsnachweis beider Einschweißtiefenregelungssystemen durchgeführt, indem Störgrößen (bspw. variierende Vorschubgeschwindigkeiten und Blechdickensprünge) bewusst eingebracht wurden.

GRUNDLEGENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON MISCHVERBINDUNGEN AUS STAHL UND ALUMINIUM

Im Zuge der grundlegenden Schweißprozessentwicklung wurden Schweißverbindungen ohne den Einsatz einer Einschweißtiefenregelung unter variierender Vorschubgeschwindigkeit, Pendelfrequenz und -amplitude bei konstanter Laserstrahlleistung von 7,5 kW erzeugt. Zweck dieser Untersuchungen ist der Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses beim Schweißen von Stahl und Aluminium im Dickblechbereich im Überlappstoß. In Abb. 4 sind Sichtaufnahmen und Querschliffe von erzeugten Mischverbindungen unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit exemplarisch bei einer Pendelamplitude von 0,5 mm und einer Pendelfrequenz von 100 Hz dargestellt.

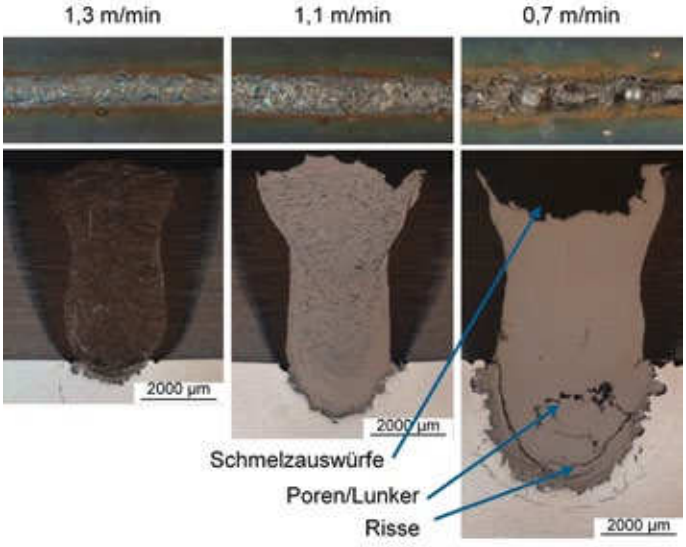


Abb. 4: Aufnahmen von Schweißnahtoberseiten und Querschliffen laserstrahlgeschweißter Mischverbindungen aus dem maritimen Bereich unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Die Oberflächenbeschaffenheit der Schweißnähte wird mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit bei konstanter Laserstrahlleistung inhomogener. Zugleich steigt die Anzahl an Schmelzauswürfen und Spritzern mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit deutlich an, was auf eine Verminderung der Schweißprozessstabilität schließen lässt. Die Oberflächenunregelmäßigkeiten sind auf die mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit zunehmende Einschweißtiefe zurückzuführen, da die vergleichsweise geringere Siedetemperatur und Viskosität des Aluminiums im Vergleich zum Stahl die Keyholestablität beim Tiefschweißen beeinträchtigt. Bis zu einer Einschweißtiefe von etwa 1,5 mm weisen die Mischverbindungen im Vergleich zu höheren Einschweißtiefen keine großen Schmelz-

auswürfe und eine signifikant geringere Anzahl an Schweißnahtunregelmäßigkeiten, wie bspw. Poren, Lunker und Risse, auf.

Um den Einfluss der Einschweißtiefe auf die Verbindungsfestigkeit der erzeugten Mischverbindungen hinsichtlich der max. Scherzugkraft zu untersuchen, wurden die Proben unter statischer Belastung im Zugversuch zerstörend geprüft. In Abb. 5 sind die max. Scherzugkraft der Proben mit einer Breite von 25 mm und die Einschweißtiefe über der Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen.

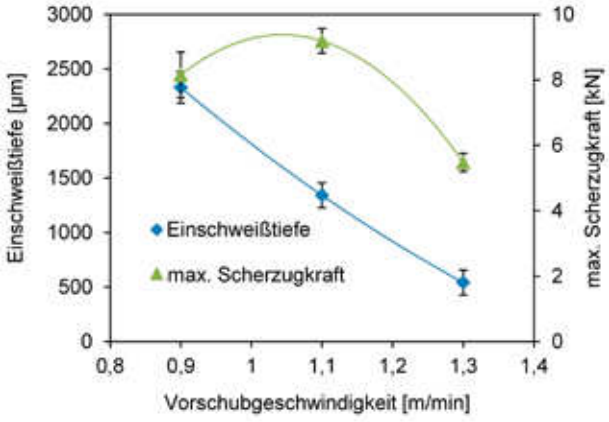


Abb. 5: Max. Scherzugkraft und Einschweißtiefe in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit

Die max. Scherzugkraft nimmt zunächst mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit bzw. zunehmender Einschweißtiefe bis zum Erreichen der höchsten max. Scherzugkraft von etwa 9 kN zu. Die höchste max. Scherzugkraft entspricht einer streckenspezifischen Kraft von etwa 360 N/mm. Hierbei erzeugt die Einschweißung in die Aluminiumlegierung unter Belastung nicht nur einen Stoffschluss sondern auch einen Formschluss, indem ein Verankerungsmechanismus als Widerstand entgegen der Belastung wirkt. Eine weitere Steigerung der Einschweißtiefe infolge einer abnehmenden Vorschubgeschwindigkeit führt aufgrund zunehmender Schweißnahtunregelmäßigkeiten und Gefügeversprödung (Überstruktur mit erhöhtem Aluminiumanteil) zur Reduzierung der max. Scherzugkraft. Die höchste max. Scherzugkraft wird bei einer Einschweißtiefe von etwa 1,3 mm erreicht. Diese Resultate decken sich mit den Ergebnissen aus den metallografischen Analysen.

FESTIGKEITEN DER LASERSTRAHLGESCHWEISSTEN ADAPTER

Die Adapter wurden unter Verwendung der oben genannten Parameter mit jeweils drei Schweißnähten pro Seite gemäß der in Abb. 6 dargestellten Geometrie hergestellt und im Zugversuch geprüft, siehe Abb. 6.

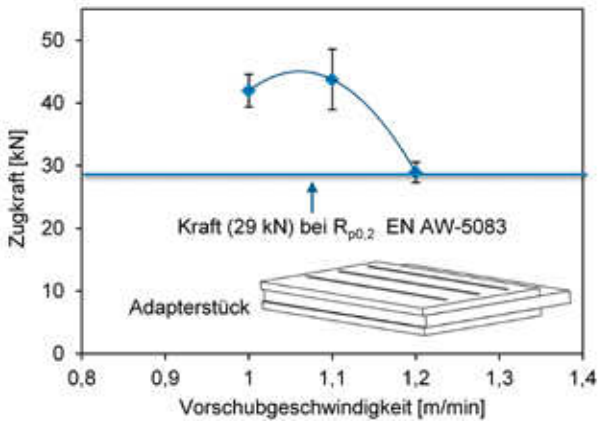


Abb. 6.: Zugkraft der Adapter in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit

Die Zugkraft ist abhängig von der verwendeten Vorschubgeschwindigkeit bzw. der resultierenden Einschweißtiefe und Anbindungsbreite. Dabei nimmt die aus drei 25 mm breiten Proben gemittelte Zugkraft mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit bis zum Erreichen der höchsten Zugkraft von etwa 44 kN zu. Danach führt eine weitere Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer geringeren Zugkraft. Die höchste Zugkraft wurde bei einer Einschweißtiefe von ca. 1,3 mm ermittelt, was sich mit den Ergebnissen aus dem Scherzugversuch deckt. Im Vergleich dazu weist das Grundmaterial der Aluminiumlegierung EN AW-5083 mit einer Dehngrenze von 145 MPa eine dazugehörige Kraft von 29 kN auf. Diese Dehngrenze wird für die Proben mit höchster Zugkraft um etwa 52 % überschritten. Der erzeugte Adapter soll in der späteren Ausführung an Aufbauten aus einer Aluminiumlegierung EN AW-5083 gefügt werden.

SCHWINGFESTIGKEITSBEWERTUNG GRUNDLEGENDER STAHL-ALUMINIUM SCHWEISSVERBINDUNGEN

Für die Schwingfestigkeitsbewertung der erzeugten Mischverbindungen wurden Versuchsreihen (VR) mit unterschiedlicher Schweißnahtgeometrie hinsichtlich der Einschweißtiefe und der Anbindungsbreite untersucht, siehe Definition in Abb. 7a. Daraus lässt sich das charakteristische, mittlere Breite-Tiefe-Verhältnis berechnen [19, 20], welches für gependelt geschweißte Überlappnähte mit 2,2 am größten ist.

Tabelle 1: Schweißprozessparameter der Versuchsreihen für Schwingfestigkeitsuntersuchungen und zugehörige gemessene, gemittelte Nahtgeometrien

Versuchs-reihe	Naht-anzahl	Vorschubge-schwindigkeit	Anbindungs-breite	Einschweiß-tiefe	Breite-Tiefe-Verhältnis	Laserstrahl-pendelung
(VR)		[m/min]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1A	1	1,2	1,4	2,2	0,6	nein
1B	1	1,0	1,6	3,2	0,5	nein
1C	1	1,2	1,6	1,4	1,1	nein
1D	1	1,1	2,5	1,1	2,2	ja
6C	6	1,2	1,6	2,2	0,7	nein

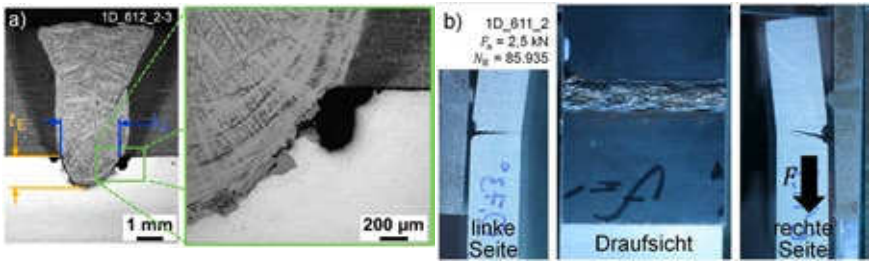


Abb. 7: Nahtquerschliff der gependelt geschweißten Überlappnaht (VR 1D) mit Geometriekenngrößen (a) und Versagensverhalten im Schwingfestigkeitsversuch (b)

Kraftgeregelte Schwingfestigkeitsversuche an Überlapp- und Adapterproben wurden unter axialer Zugschwellbelastung (Lastverhältnis von R_F = 0) bei konstanten Lastamplituden auf einer servohydraulisch betriebenen Prüfmaschine mit einer Frequenz von 30 Hz bis zum Probenbruch durchgeführt, siehe Abb. 7b. Bei der hier gegebenen erhöhten Schweißqualität stellt sich das Versagen durch Ausknöpfen der Verbindung ausgehend von den versagenskritischen Kerben im Bereich der Diffusionszone durch Fortschreiten des Risses ins Aluminiumblech ein. Abb. 7a zeigt beispielhaft eine versagenskritische Kerbe im unbelasteten Zustand mit vorliegendem Einbrand und Rissen in der Diffusionszone. Diese Versuchsreihe (VR 1D, gependelt geschweißt) erzielte die höchste Schwingfestigkeit der Überlappnähte, Abb. 7, was auf das gesteigerte Verhältnis aus Anbindungsbreite und Einschweißtiefe zurückzuführen ist. In Abb. 8 dargestellte kraftbezogene Wöhlerlinien wurden aus den Ergebnissen nach der Maximum-Likelihood-Methode [21] ausgewertet. Sie werden durch die Kraftamplitude F_a bei Versagensschwingspielzahlen von $N = 2 \cdot 10^6$ bzw. am Abknickpunkt N_k und die Streuspanne T_F charakterisiert. Die Neigung nach dem Abknickpunkt wird entsprechend den Empfehlungen für Schweißverbindungen zu $k^* = 22$ gesetzt [22, 23]. Der lineare Anstieg der Kraftamplitude mit dem Breite-Tiefe-Verhältnis für Überlappnähte [20] konnte durch die Ergebnisse für gependelt geschweißte Überlappproben nicht bestätigt werden. Die Kraftamplitude bei 2 Mio. Schwingspielen läuft mit 1,08 kN vielmehr gegen eine Sättigung des Breite-Tiefe-Verhältnisses von bspw. 2,2. Eine Schwingfestigkeitssteigerung auf eine Kraftamplitude von $F_a(N = 2 \cdot 10^6)$ = 1,28 kN wird für Adapterproben erzielt. Die Ergebnisse dieser kraftbezogenen Betrachtung basieren auf

einer untersuchten Probenbreite von 25 mm, die der Schweißnahtlänge entspricht, wodurch das Potential dieser Schweißverbindung für längere Nähte deutlich wird.

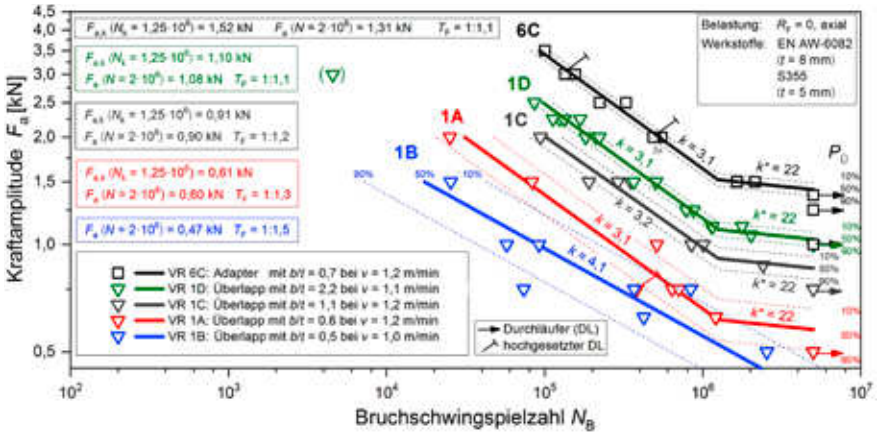


Abb. 8: Schwingfestigkeitsergebnisse für Überlappnähte und Adapter der Variante 1

Die Gegenüberstellung im Lastsystem eignet sich gut zum Vergleich der Schwingfestigkeitsergebnisse, ist allerdings ungeeignet, um eine Übertragbarkeit auf andere Schweißverbindungen sicherzustellen und somit eine Auslegung durchzuführen. Das bedeutet auch, dass die Ergebnisse nicht ohne Zusatzuntersuchungen auf andere Nahtlängen oder Nahtgeometrien übertragen werden können. Zur Einordnung der untersuchten Laserstrahlschweißnähte wird daher eine lokale Bewertung mit dem Kerbspannungskonzept unter Anwendung der für Aluminiumschweißverbindungen ermittelten FAT-Klassen durchgeführt. Für Mischverbindungsschweißnähte beinhalten die Regelwerke derzeit noch keine Bemessungsgrundlage.

Der Bewertung liegt eine Finite-Elemente (FE) Modellierung der spezifischen Geometrie zugrunde, in der eine einfache Werkstofftrennung zwischen Stahl (E = 210 GPa, ν = 0,30) und Aluminiumlegierung (E = 70 GPa, ν = 0,33) flächig entlang des ursprünglichen Blechkontaktes ohne detailgetreue Abbildung der Einschweißung erfolgt. Die probenspezifische Nahtbreite dient als Anbindungsbreite im Modell. Ihr Wert hat einen maßgeblichen Einfluss auf die lokale Beanspruchungssituation in der versagenskritischen Kerbe. Diese wird als Schlüssellochkerbe mit einem Radius von r = 0,05 mm modelliert. Linear-elastische Belastungssimulationen mit R_F = 0 führen auf Kerbspannungen im versagenskritischen Aluminiumwerkstoff.

Eine Bewertung der experimentellen Ergebnisse mit den berechneten, ertragbaren Kerbspannungen für Schweißverbindungen mit optimierten Prozessparametern (VR 1C, VR 1D und VR 6C) zeigt eine sehr geringe Streuung. Ein Vergleich der ertragbaren Kerbspannungen mit dem Bemessungskennwert FAT 160 für Aluminiumschweißverbindungen (Gestaltänderungsenergiehypothese) ergibt zudem eine gute Übereinstimmung, Abb. 9.

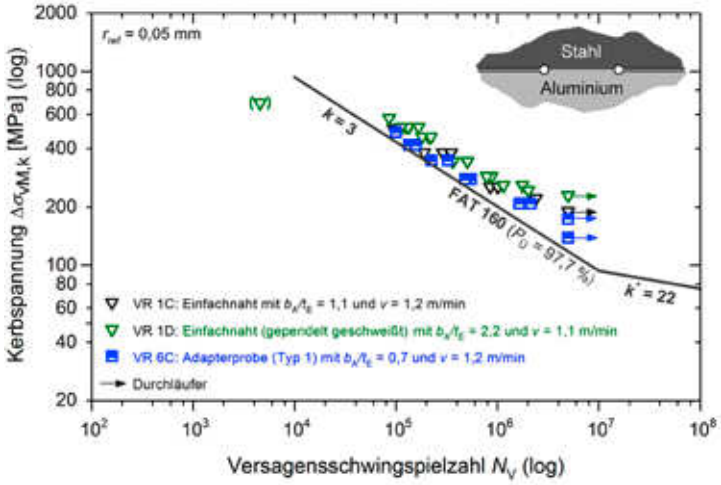


Abb. 9: Kerbspannungsbewertung für Versuchsreihen optimierter Schweißprozessparameter anhand der für Aluminiumschweißverbindungen gültigen FAT 160

LASERSTRAHLSCHWEISSEN DER MISCHVERBINDUNG MIT EINSCHWEISSTIEFENREGELUNG

Um den Tauglichkeitsnachweis beider Einschweißtiefenregelungssysteme zum Laserstrahlschweißen (ungependelter Laserstrahl) der Stahl-Aluminium-Mischverbindung erstmals im Dickblechbereich aufzuzeigen, wurden verschiedene abweichende Bedingungen, wie z.B. eine variierende Schweißgeschwindigkeit oder Blechdickensprünge, untersucht. Für die Einschweißtiefenregelung auf Basis der Kurz-Kohärenzinterferometrie wurde eine konstante Einschweißtiefe von etwa 1,0 mm eingestellt. In Abb. 10 sind jeweils zwei Querschliffe einer geregelten und einer ungeregelten Schweißverbindung unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt.

Sowohl bei einer zu geringen Schweißgeschwindigkeit von 1,0 m/min als auch bei einer zu hohen Schweißgeschwindigkeit von 1,6 m/min bleibt die gewünschte Einschweißtiefe durch den Einsatz der Regelung nahezu konstant. Ohne den Einsatz der Einschweißtiefenregelung ergibt sich einerseits eine zu geringe Einschweißtiefe, sodass die Proben teilweise bei der Probenentnahme versagen. Anderseits sind die Mischverbindungen bei reduzierter Vorschubgeschwindigkeit durch einen enormen nicht akzeptablen Anteil an Rissen und Schmelzauswürfen gekennzeichnet, was ebenfalls zu geringen übertragbaren Kräften führt. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch beim Einsatz der Einschweißtiefenregelung auf Basis der spektralen Prozessemissionen erzielt. In Abb. 11 ist jeweils ein Querschliff einer ungeregelten und einer geregelten Schweißnahtverbindung dargestellt. Die Mischverbindungen wurden mit einer zu geringen Schweißgeschwindigkeit von 0,8 m/min hergestellt, dabei wurde auf Basis der grundlegenden Schweißuntersuchungen für die Prozessregelung eine gewünschte Einschweißtiefe von 1,3 mm für einen gependelten Laserstrahl eingestellt.

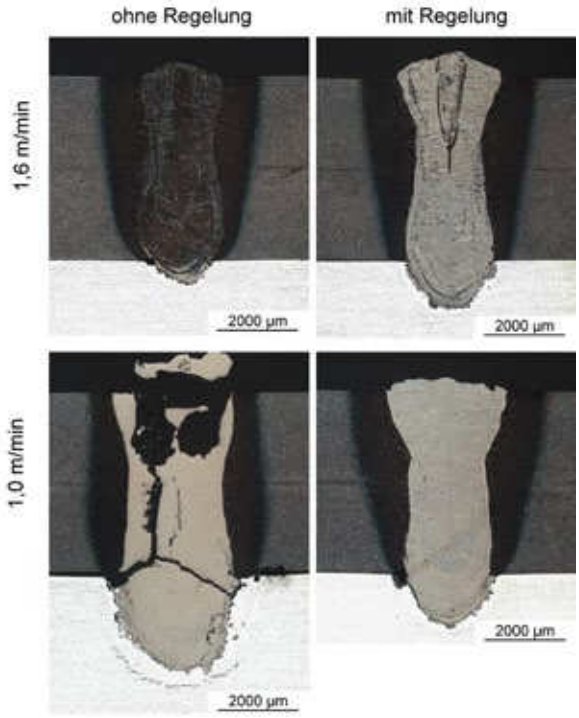


Abb. 10: Querschliffe von Mischverbindungen ohne Einschweißtiefenregelung (links) und mit Einschweißtiefenregelung auf Basis der Kurz-Kohärenzinterferometrie (rechts) bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten von 1,6 m/min (oben) und 1,0 m/min (unten)

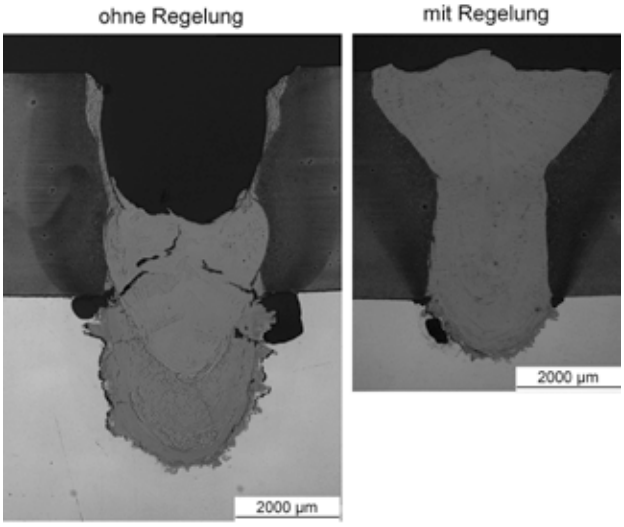


Abb. 11: Querschliffe von Mischverbindungen ohne Einschweißtiefenregelung (links) und mit Einschweißtiefenregelung auf Basis der spektralen Prozessemissionen (rechts) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,8 m/min

Durch die Einhaltung einer konstanten Einschweißtiefe werden vergleichsweise qualitativ hochwertige Mischverbindungen, ohne Schmelzauswürfe und mit einer geringen Anzahl an Schweißnahtunregelmäßigkeiten, erzeugt. Infolge der konstanten Einschweißtiefe bleibt die max. Scherzugkraft, trotz der variierenden Schweißgeschwindigkeit, für die geregelten Schweißnähte nahezu konstant.

Zur Verifizierung der Einschweißtiefenregelung wurde ein Stahlblech mit verschiedenen Blechdickensprüngen von 5,0, 6,0 und 7,0 mm bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 0,8 m/min geschweißt. In Abb. 12 ist jeweils das resultierende Einschweißtiefenprofil einer geregelten und einer ungeregelten Mischverbindung aufgeführt.

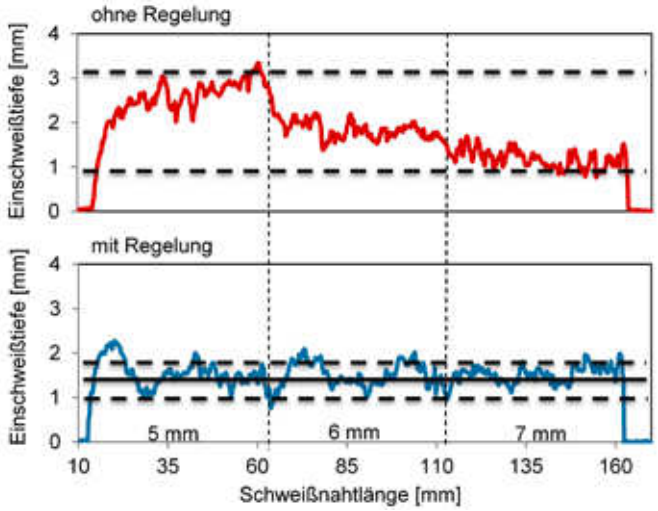


Abb. 12: Einschweißtiefenprofil von Blechdickensprüngen ohne Regelung (oben) und mit Regelung (unten) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,8 m/min

Das Einschweißtiefenprofil der ungeregelten Schweißverbindung ist durch eine minimale Einschweißtiefe von etwa 0,9 mm bei einer Blechdicke von 7,0 mm und eine maximale Einschweißtiefe von etwa 3,0 mm bei einer Blechdicke von 5,0 mm charakterisiert. Dagegen resultiert durch den Einsatz der Regelung eine relativ konstante gemittelte Einschweißtiefe von etwa 1,4 mm, die im Bereich von 1,1 mm bis 1,8 mm unabhängig von der Blechdicke fluktuiert.

ERZEUGUNG VON ADAPTERN IM ORIGINALMASSSTAB

Nach der Optimierung des Schweißprozesses wurden Adapter in der Vorfertigung des Verbundpartners LASER on demand GmbH weiterentwickelt und im Originalmaßstab gefertigt. Mit Hilfe metallografischer Analysen und zerstörungsfreier Prüfmethoden auf Basis der Detektion von Schallemissionen wurde die Bauweise des Adapters mit einer Breite von 110 mm auf 75 mm kompakter dimensioniert. In Abb. 13 ist ein derartiger

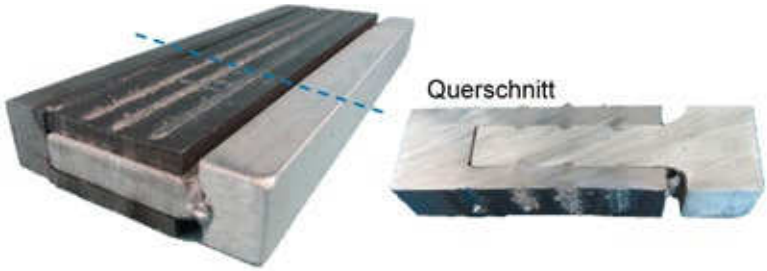


Abb. 13: Mittels Laserstrahlschweißen gefertigte Adapter im Originalmaßstab

Adapter in kompakter Bauweise zu sehen. Bisher wurden Adapter mit einer Länge von 500 mm geschweißt. Der abschließende Schritt besteht darin, 2000 mm lange Adapter zu erzeugen und den Schiffbauern zur Bewertung zu übergeben.

VERWERTUNG

Für die Endanwender (Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG und MEYER WERFT GmbH & Co. KG) wurde das hohe Einsatzpotenzial der laserstrahlgeschweißten Adapter für die Anwendung im Schiffbau anhand quasistatischer und zyklischer Festigkeitsuntersuchungen aufgezeigt. Die Verwendung der laserstrahlgeschweißten Adapter kann im Vergleich zu den explosionsgeschweißten Adaptern zu einer größeren Freiheit bei der Positionierung der Fügestelle führen, woraus sich Vorteile hinsichtlich einer geringeren Einschränkung bei gewichts- bzw. schwerpunktkritischen Schiffdesigns ergeben. Um die Kosten für die Adapterherstellung möglichst gering zu gestalten, wurden die Adapter auf Basis von laserstrahlgeschweißten Halbzeugen aus Aluminium- und Stahlblechen konzipiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können die Halbzeughersteller (LASER on demand GmbH, Hilbig GmbH, Druckguss Service Deutschland GmbH) ihr Produkt- und Technologieportfolio erweitern, wodurch sich Zugänge zu neuen Marktsegmenten ergeben. Die Grundlage für die Fertigung derAdapter stellt die erfolgreiche Entwicklung des Hochleistungsbearbeitungskopfes (Scansonic MI GmbH) mit integrierter Einschweißtiefenregelung auf Basis der spektralen Prozessemissionen (Laser Zentrum Hannover e. V.) und Kurz-Kohärenzinterferometrie (Precitec GmbH & Co. KG) dar. Im Zuge des Verbundprojektes konnte der Tauglichkeitsnachweis beider Einschweißtiefenregelungssysteme zum Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen im Dickblechbereich erstmals erbracht werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Umsetzbarkeit eines Laserstrahlschweißprozesses mit Einschweißtiefenregelungssystem für Stahl-Aluminium-Mischverbindungen konnte nicht nur im Labormaßstab, sondern auch im industrienahen Umfeld aufgezeigt werden. Um erstmals ein grundlegendes Prozessverständnis zum Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminiumlegierungen im Dickblechbereich zu gewinnen, wurde zu Beginn der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die Mischverbindung untersucht. Dabei spielt die Vorschubgeschwindigkeit bei konstanter Laserstrahlleistung eine entscheidende Rolle für die Schweißnahtqualität, da die

Vorschubgeschwindigkeit die Schweißnahtgeometrie hinsichtlich der Einschweißtiefe und der Anbindungsbreite beeinflusst. Prinzipiell gilt, dass eine abnehmende Vorschubgeschwindigkeit zu einer Vergrößerung des Nahtquerschnitts (Einschweißtiefe und Anbindungsbreite) führt. Bis zu einer Einschweißtiefe von etwa 1,5 mm können Mischverbindungen mit vergleichsweise hoher Qualität erzeugt werden. Dies zeigt sich anhand eines geringen Anteils an Schweißnahtunregelmäßigkeiten und einer hohen max. Scherzugkraft von etwa 9 kN. Eine signifikant geringere Schweißnahtqualität ergibt sich ab einer Eischweißtiefe von etwa 2,0 mm, die sich auch in Form von nicht akzeptablen Schmelzauswürfen und Schweißnahtunregelmäßigkeiten auswirkt. Unter Verwendung optimaler Einschweißtiefe von etwa 1,3 mm erreichen die Adapter die höchste Zugkraft von etwa 44 kN. Dies entspricht einer Überschreitung der Dehngrenze der Aluminiumlegierung EN AW-5083 um ca. 52 %. Die Schwingfestigkeit der Adapter liegt knapp 20% über der für gependelt geschweißte Überlappnähte. Eine lokale Schwingfestigkeitsbewertung kann geometrieunabhängig für optimierte Schweißprozessparameter durch die für Aluminiumschweißverbindungen eingeführte FAT 160 erfolgen. Da in der industriellen Fertigung von Adaptern nicht von gleichbleibenden Bedingungen, wie z.B. unterschiedliche Beschichtungen, Blechdickensprüngen etc., auszugehen ist, wurde die Kompensation derartiger Störgrößen durch den Einsatz der Einschweißtiefenregelungen geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einschweißtiefe und damit einhergehend auch die Schweißnahtqualität trotz variierender Bedingungen konstant bleibt.

DANKSAGUNG

Die Autoren des Beitrags danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Verbundvorhabens „LaSAAS“, der Forschungszentrum Jülich GmbH (PtJ) für die gute administrative Unterstützung und den Verbundpartnern für die gute Zusammenarbeit.

LITERATUR

[1] The International Council on Clean Transportation, 2011, The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, Public of The International Council on Clean Transportation.

[2] Noury, P., Hayman, B., McGeorge, D., Weitzenbock J., 2002, Lightweight Construction for Ad-vanced Shipbuilding – Recent Development, DNV internal report.

[3] Meco, S., Pardal, G., Ganguly, S., Williams, N., McPherson, N., 2015, Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminum joints for thick structural components, Optics and Lasers in Engineering 67, S. 22-30.

[4] Buijs, K., 2004, Triplate: The ultimate solution for welding aluminum to steel, HSB international.

[5] Abeking & Rasmussen Schiffs- und Yachtwerft Aktiengesellschaft, 2013, Rührreibgeschweißte Leichtbaustrukturen für Schiffsaufbauten, Abschlussbericht 2013.

[6] Schilf, M., Wischhusen, B., Thomy, C., Vollertsen, F., Metschkow, B., 2007, Ansätze zum Laserstrahlfügen für Aluminium-Stahl-Verbindungen im Schiffbau, DVS-Berichte (2007), 244, S. 286-290.

[7] Thomy, C., Wagner, F., Vollertsen, F., Wirth, A., Kreimeyer, M., 2007, Laser-MIG-Hybridfügen von Aluminium-Stahl Leichtbaustrukturen, Laser Technik Journal 4, S. 36-40.

[8] Klock, H., Schoer, H., 1977, Schweißen und Löten von Aluminiumwerkstoffen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf.

[9] Wang, P., Chen, X., Pan, Q. et al., 2016, Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87, 3081.

[10] Radscheit, C., 1997, Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl, Dissertation Universität Bremen, BIAS Verlag Bremen.

[11] Kreimeyer, M., Beckmann, M., Wagner, F., Vollertsen, F., 2004, Umformen lasergefügter Fe/Al- und Ti/Al-Tailored Hybrid Blanks. 11. SFU, Freiberg (2004), S. 343-353.

[12] Simon, S., 2007, Werkstoffgerechtes Konstruieren und Gestalten mit metallischen Werkstoffen, Habilitation Universität Cottbus.

[13] Kallage, P., 2013, Laserschweißen von Mischverbindungen aus Aluminium und verzinktem sowie unverzinktem Stahl, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

[14] Seffer, O., Springer, A., Kaierle, S., 2017, Investigations on remote laser beam welding of dissimilar joints of aluminum alloys and steel with varying sheet thicknesses for car body construction, Journal of Laser Applications 29, No. 2, 022414, S. 1-8.

[15] Kaierle, S., Pfeifer, R., Seffer, O., Schimek, M., Bös, J., Bolchoun, A., 2014, Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer

Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, Schlussbericht 2014, Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), FAT-Schriftenreihe 263.

[16] Schimek, M., Springer, A., Kaierle, S., Kracht, D., Westling, V., 2012, Lasewelded Dissimilar Steel-aluminum Seams for Automotive Lightweight Construction, Physics Procedia, Volume 39, S. 43-50.

[17] Kogel-Hollacher, M., Schönleber, M., Bautze, T., 2014, Inline coherent imaging of laser processing - a new sensor approach heading for industrial application, Proceedings of 8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, Fürth, Germany.

[18] Bautze, T., Kogel-Hollacher, M., 2014, Keyhole depth is just a distance, Laser Technik Journal 4/2014, S. 39-43.

[19] Lahdo, R., Springer, A., Pfeifer, R., Kaierle, S., Overmeyer, L.: Highpower laser welding of thick steel-aluminum dissimilar joints. Physics Procedia 83 (2016), S. 396-405.

[20] Möller, B.; Wagener, R.; Melz, T.; Lahdo, R.; Springer, A.; Kaierle, S.; Overmeyer, L.: Festigkeitsbetrachtung von dickwandigen Stahl-Aluminium-Laserstrahlschweißnähten. Tagungsband der 17. Tagung Schweißen in der maritimen Technik und im Ingenieurbau, 19./20. April 2017, Hamburg, S. 38-52.

[21] Spindel, J. E., Haibach, E.: The Method of Maximum Likelihood applied to the Statistical Analysis of Fatigue Data including Run-Outs. S. E. E. International Conference 3-6. April 1978, S. 7.1-7.23.

[22] Hobbacher A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Springer International Publishing, 2016.

[23] Sonsino, C.M.: „Dauerfestigkeit" – Eine Fiktion. Konstruktion 4 (2005), S. 87-92.

FlexDi –
FLEXIBLE DIREKTEINSPRITZENDE MOTOREN FÜR DIE SCHIFFFAHRT

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX387A-D

DR.-ING. MANUEL BOOG	MTU Friedrichshafen GmbH
DIPL.-ING. FREDERIC DUMSER	MTU Friederichshafen GmbH
DIPL.-ING. ENRICO BÄROW	Woodward L'Orange GmbH
DIPL.-ING. GEORG FINK	TUM, Lehrstuhl für Thermodynamik
MICHAEL JUD, M.SC.	TUM, Lehrstuhl für Thermodynamik
STEPHAN GLEIS, M.SC.	TUM, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK)
STEPHANIE FRANKL, M.SC.	TUM, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK)

KURZFASSUNG

Die Verwendung von Erdgas als Kraftstoff in Schiffen ist eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Um das Potenzial des geringeren CO_2-Ausstoßes von Erdgas im Vergleich zu Marinedestillaten auszunutzen, ist möglichst eine Vermeidung der Methanemissionen aus der Verbrennung anzustreben. Zunächst wird dazu anhand des Schiffsantriebssystems die Verwendung von Motoren nach dem Gas-Diesel bzw. High Pressure Dual Fuel Verfahren (HPDF) vorgestellt. Die Vorgehensweise zur Entwicklung des Motorkonzeptes mit den Schwerpunkten der Injektorentwicklung, der Grundlagenentwicklung unter Verwendung einer Rapid Compression Expansion Machine (RCEM) sowie darauf aufbauende Untersuchungen am Einzylindertransparentmotor (Optikmotor) und am thermodynamischen Einzylindermotor werden erläutert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Entwicklungswerkzeuge in der Lage sind, die auftretenden Phänomene experimentell aufzuzeigen. Die begleitenden Simulationsrechnungen zur Verbrennung auf Basis detaillierter Chemie stimmen mit den experimentellen Ergebnissen überein und erlauben eine zielgerichtete Geometrie- und Parameterauswahl. Im Fazit zeigen die Ergebnisse, dass das Verfahren in der Lage ist, in schnelllaufenden, drehzahlvariablen Großmotoren sehr niedrige Methanschlupfwerte zu erreichen. Zudem ist unter den vorgegebenen Randbedingungen eine Leistungssteigerung gegenüber des Referenz-Otto-Gas Motorkonzeptes von 30% experimentell nachgewiesen.

EINLEITUNG

Zur Reduzierung der Schadstoff- und Treibhausgasemissionen in Schiffsantrieben sind neben modernen Antriebsystemen mit drehzahlvariablen Dieselmotoren zur Verbrennung von Marinedestillaten zunehmend Antriebsysteme für den Betrieb mit verflüssigtem Erdgas (LNG) von Interesse.

Sowohl von Erdgasmotoren nach dem Otto-Prinzip als auch von Motoren nach dem Low Pressure Dual Fuel Verfahren ist bekannt, dass signifikante Anteile an unverbranntem Methan im Abgas das Potenzial des Kraftstoffes Erdgas zur Minderung der Treibhausgasemissionen schmälern [AND-15]. Eine vielversprechende Alternative zur Erreichung sehr niedriger Methanemissionen ist das High Pressure Dual Fuel (HPDF) Verfahren, bei dem unter Hochdruck in den Brennraum eingebrachtes Erdgas an einer geringen Menge Dieselkraftstoff entzündet wird. Durch Gemischbildung im Brennraum sowie diffusive Verbrennung wird erwartet, dass der Methanschlupf auf ein Minimum reduziert wird, während durch die dieselmotorische Qualitätsregelung auch im Teillastbetrieb ein hohes Wirkungsgradniveau erreicht werden kann [HAR-02, McT-07].

SCHIFFSANTRIEBSSYSTEM MIT HPDF-MOTOREN

Für das HPDF-Antriebssystem wird grundsätzlich eine Hochdruckgasversorgung an Bord des Schiffes benötigt. Das verflüssigte Erdgas wird lastpunktabhängig auf Einspritzdrücke über den Kompressionsdruck des Hubkolbenmotors hinaus komprimiert, über einen Hochdruckwärmetauscher dem Motor zugeführt und zylinderindividuell in den Brennraum eingespritzt. Die Entzündung erfolgt über die Einspritzung einer Pilotdieselmenge.

Der Mehraufwand gegenüber Otto-Gasmotoren, welche mit Brenngas im Niederdruckbereich versorgt werden, wird durch die Kraftstoffflexibilität des Motorkonzeptes und durch Vereinfachung der erforderlichen Antriebsredundanz relativiert. Abbildung 1 zeigt links eine mögliche Ausführung des Antriebs mit Otto-Gas Motoren. Aus Redundanzgründen sind zwei separate Kraftstoffpfade für die Versorgung der Motoren mit Erdgas erforderlich. Bei der Verwendung von HPDF Motoren (rechts) genügt eine einzelne Gasversorgungseinheit der Motoren mit Hochdruckgas, da der alternative Dieselbetriebsmodus der Motoren die erforderliche Antriebsredundanz ermöglicht.

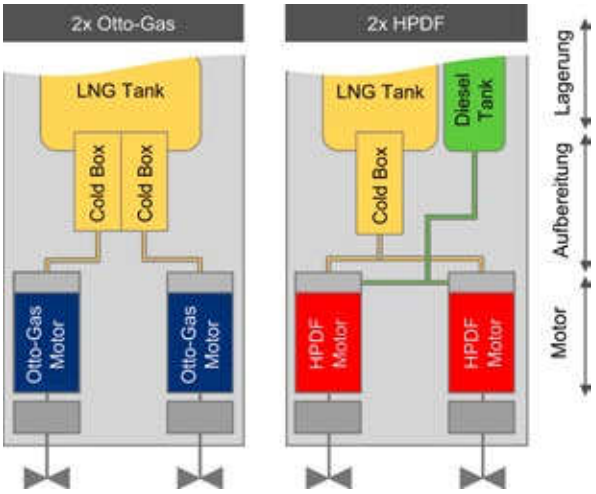


Abb. 1: Zweimotoranlage für den Schiffshauptantrieb mit Otto-Gas Motoren (links) und mit HPDF-Motoren (rechts)

VORGEHENSWEISE DER MOTORKONZEPTENTWICKLUNG

Die gewählte Vorgehensweise zur Entwicklung des HPDF Verfahrens ist gemäß Abbildung 2 durch mehrere Entwicklungsschritte charakterisiert.

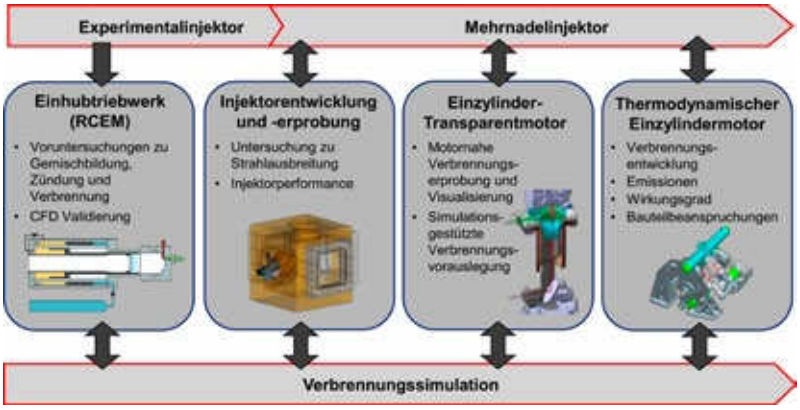


Abb. 2: Vorgehensweise zur HPDF Motorkonzeptentwicklung

Für die Motorkonzeptentwicklung des HPDF-Verfahrens steht im ersten Schritt der Methodenkette ein Einloch-Experimentalinjektor zur phänomenologischen Untersuchung der Verbrennungseigenschaften und Geometrieeinflüsse an einer Rapid Compression Expansion Machine (RCEM) mit optischem Zugang zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen mit den begleitenden 3D-CFD Simulationsrechnungen die bevorzugten Parameter zur Beeinflussung der Zündung und der Verbrennung.

Gestützt auf die Erfahrungen aus Versuch und Simulation wird ein hochflexibles Mehrnadelinjektorkonzept für die motorischen Untersuchungen entwickelt, welches die unabhängige Einspritzung von Hochdruckgas sowie Dieselkraftstoff ermöglicht. Auf Basis dieses Injektors erfolgt die weitere Untersuchung des Verfahrens an einem Optikmotor zur Visualisierung der Zündung und der Verbrennung. Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben unter Nutzung der Simulation die zielgerichtete Ausgestaltung des Verfahrens im motorischen Betrieb. Unter realitätsnahen Bedingungen erfolgt schlussendlich der Potenzialnachweis an einem thermodynamischen Einzylindermotor.

GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN MIT EINZELSTRAHLEN AN RCEM

Durch den Einsatz zweier separater Injektoren mit jeweils einem Strahl für Pilotkraftstoff und Erdgas wurden die Verbrennungseigenschaften an einer RCEM untersucht. Dabei kann die geometrische Anordnung, der relative Injektionszeitpunkt und die Kraftstoffpaarung variiert werden. Aufgrund der exzellenten optischen Zugänglichkeit für die simultane Aufnahme von Schattenbildern und OH*-Flammenleuchten und den sehr genau definierbaren Randbedingungen liefert dieser Versuchsträger wichtige Validierungsdaten für die Entwicklung eines CFD-Verbrennungsmodelles auf Basis von detaillierter Chemie.

Zu Beginn der Entwicklung eines integrierten Injektorsystems für beide Kraftstoffe stellt sich die Frage nach der Anzahl und geometrischen Anordnung der Nadeln im Injektor. Während ein Zweinadel-Konzept mit nur einer Nadel für jeden Kraftstoff die ökonomischste Variante darstellt, ist bei dieser Konfiguration jedoch eine Kreuzung der Strahlen bei zeitlich überlappender Injektion unumgänglich. Diese gleichzeitige Injektion ist beispielsweise zur Erreichung einer Teilvormischung notwendig und in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die RCEM-Versuche zeigen, dass der Dieselstrahl den kreuzenden Gasstrahl nicht durchdringt und bei starker Kreuzung daher bereits die Pilotzündung ausbleiben kann. Aufgrund der gleichmäßigen Zündbedingungen aller Strahlen und einer größeren Flexibilität hinsichtlich der weiteren Untersuchungen zur Teilvormischung wurde schlussendlich ein Mehrnadel-Konzept gewählt.

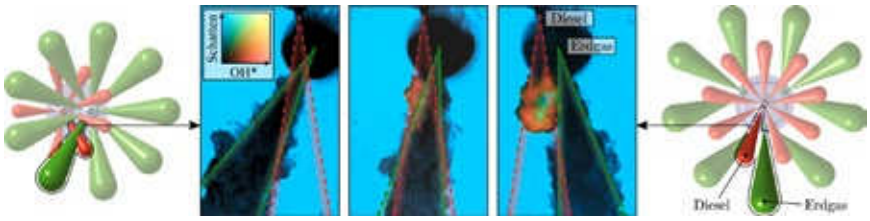


Abb. 3: Kreuzende Strahlen bei Zweinadel-Konzept (links) und tangentiale Ausbreitung bei Mehrnadel-Konzept (rechts); ausbleibende Pilotzündung bei zunehmender Kreuzung

Darauf aufbauend wurde der wechselseitige Einfluss von Geometrie, Injektionszeitpunkt und Betriebsbedingungen auf die Verbrennung untersucht. Generell folgt die Verbrennung dem Ablauf wie in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Ausprägung der einzelnen Teilphänomene mit der Parameterwahl variiert. Auf die stark rußende Pilotflamme (helle blaue oder gelbe Bereiche im Strahlbereich) folgt die Entflammung des Erdgasstrahles durch das Einmischen der Diesel-Verbrennungsprodukte. Zu diesem Zeitpunkt hat sich der Strahl bereits teilweise mit Luft gemischt und es kommt zur Flammenausbreitung innerhalb des Gasstrahles (rot). Diese teilvorgemischte Verbrennung in der turbulenten Scherschicht des Strahles läuft sehr schnell ab, was an einem starken Ausschlag der Wärmefreisetzungsrate zu erkennen ist. Im Folgenden führt die fortlaufende Brennstoffzufuhr zu einer mischungslimitierten Verbrennung in sehr fetten Zonen, was in einer sichtbaren Rußbildung resultiert. Das Diagramm in Abbildung 4 demonstriert eindrücklich, dass die Simulation diese Phänomene sowohl qualitativ als auch quantitativ weitestgehend sehr gut abbildet. Damit ist das Modell in der Lage, für die Verbrennungsoptimierung im weiteren Verlauf der Brennverfahrensentwicklung wichtige Erkenntnisse zu liefern.

Gegenüber anderen Gasmotorenkonzepten stellt das HPDF-Verfahren nur sehr geringe Anforderungen an den Hauptkraftstoff. Dadurch ist es sehr robust hinsichtlich global sehr stark schwankenden Erdgasqualitäten und kann sogar für flüssige alternative Brennstoffe eingesetzt werden. Dieses Potential wurde für Methanol durch den direkten Vergleich mit der Erdgasverbrennung nachgewiesen. Wie die Massenstromverläufe in Abbildung 5 zeigen, musste dafür aufgrund der deutlich unterschiedlichen Heizwerte für einen energetisch vergleichbaren Lastpunkt deutlich mehr Methanol eingebracht werden.

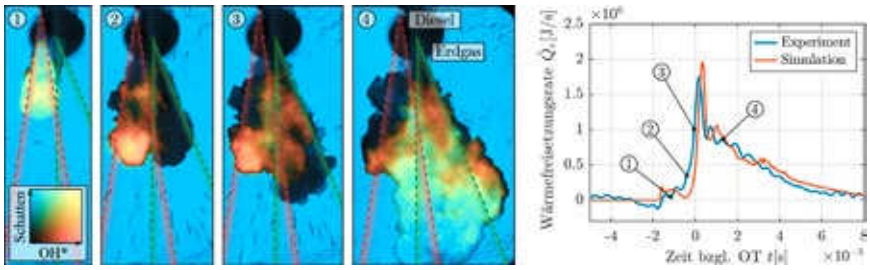


Abb. 4: Ablauf der Verbrennung bei tangentialer Zündung und Vergleich der Wärmefreisetzung zwischen Experiment und Simulation: (1) Pilotverbrennung, (2) Zündung Gasstrahl, (3) Flammenausbreitung, (4) diffusive Verbrennung

Die beiden Kraftstoffe zeigen trotz eines zeitlich versetzten Brennbeginns einen sehr ähnlichen Verlauf der Verbrennung, was die Flexibilität des Verfahrens unterstreicht. Der Grund für den Versatz liegt an einer deutlich leichteren Entflammbarkeit von Methanol im Vergleich mit Erdgas: während der Erdgasstrahl zum Zeitpunkt 1 in Abbildung 5 gerade zündet, hat die Flamme den Methanolstrahl zu diesem Zeitpunkt bereits komplett erfasst. Im Hinblick auf die Rußbildung zeigt sich durch die Substitution zudem ein deutliches Reduktionspotential. Die beim Erdgas beobachtete Rußbildung in den fetten Zonen während der mischungslimitierten Verbrennung kann für Methanol nicht beobachtet werden (Zeitpunkt 2).

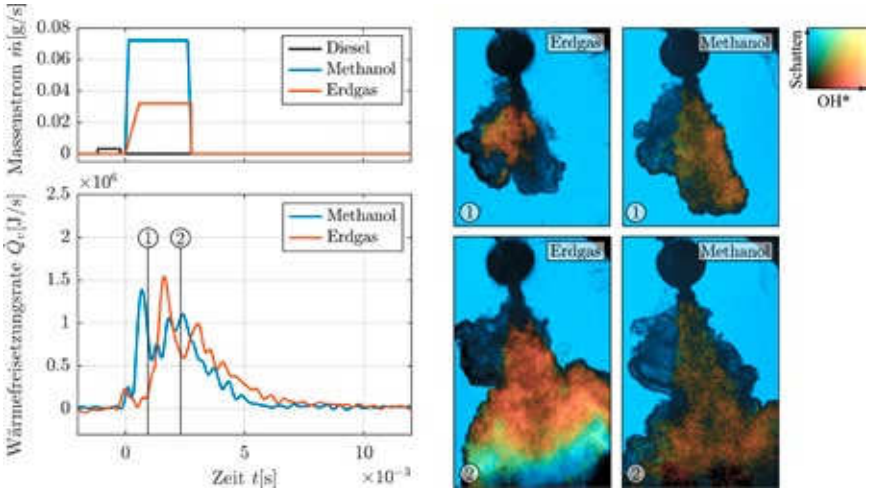


Abb. 5: Ersatz von Erdgas durch Methanol als Hauptbrennstoff: (1) schnellere Entflammung, (2) keine Rußbildung

INJEKTORENTWICKLUNG

Die Umsetzbarkeit eines Dual-Fuel-Brennverfahrens mit Hochdruckgas wird wesentlich vom Einspritzsystem und insbesondere vom Injektor bestimmt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Hochdruckgas-Injektoren entwickelt.

Zum einen wurde ein gängiger Dieselinjektor zu einem Experimentalinjektor für die Gaseinblasung modifiziert. Damit konnten bereits sehr früh im Projekt Erfahrungen mit der Hochdruckgaseindüsung und -zündung gesammelt werden. Dazu gehören zum einen die Ergebnisse im vorangegangenen Kapitel. Darüber hinaus diente der Injektor bei Woodward L'Orange für zahlreiche Vorab-Untersuchungen. Unter anderem wurden Messungen unter nicht reagierenden Bedingungen an einer Strahlkammer durchgeführt. Mithilfe des Schlieren-Verfahrens konnten wesentliche Erkenntnisse zur Strahlausbreitung gewonnen werden. In Abbildung 6 ist exemplarisch der Versuchsaufbau an der Strahlkammer dargestellt. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die tatsächliche Gas-Strahlausbreitung und darüber, welche injektorinternen Geometrien einen Einfluss darauf besitzen. Da die Injektoren mit zahlreichen Sensoren ausgestattet sind, konnten bereits sehr früh im Projekt wesentliche Fragen zur Auslegung solcher HD-Gas-Injektoren beantwortet werden.

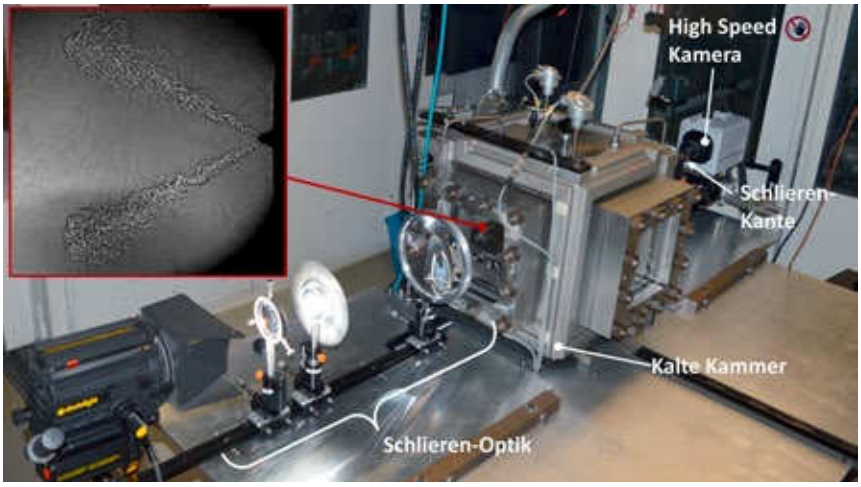


Abb. 6: Schlieren-Bild und -Messaufbau an der Kalten Kammer

Die Hauptmotivation besteht in der Neuentwicklung eines Injektors für den Dual-Fuel-Betrieb mit Diesel und Hochdruckgas. Dieser Injektor ist für den Volllastbetrieb mit 500 bar Gasdruck und Pilotunterstützung oder reinem Dieselbetrieb bis 2200 bar ausgelegt. Damit stellt er den ersten Dual Fuel-Injektor dar, der für den Common Rail Betrieb auf Gas- und Dieselseite geeignet ist und zudem in der Lage ist Mehrfacheinspritzungen durchzuführen. In Abbildung 7 befindet sich ein maßstäblicher Vergleich zwischen dem Experimental- und dem Dual-Fuel-Injektor.

Der Dieselpfad des Injektors ist identisch zu einem herkömmlichen Dieselinjektor ausgelegt, um hier keine Kompromisse eingehen zu müssen. Darüber hinaus ist ein Gasinjektor in das Gehäuse integriert. Eine Besonderheit ist, dass das HD-Gas koaxial zum Diesel eingedüst werden kann. Um ein besonders schlankes Injektorgehäuse realisieren zu

können, musste ein für Injektoren völlig neuartiges Schaltkonzept erarbeitet werden. Eigens hierfür wurde ein Schaltventil entwickelt, das mithilfe eines Steuerfluids die Gasnadeln hydraulisch aktuiert.

Abb. 7:Gegenüberstellung der HD-Gas-Injektoren

Dieses wird an einem eigens hierfür entwickelten Komponentenprüfstand untersucht und stetig weiter optimiert. Durch diese Weiterentwicklungen konnte die Reaktionszeit der Gasnadeln bereits um 40% verkürzt und die Flankensteilheit bei deren Öffnung bis auf das Doppelte erhöht werden.

Das Design des Injektors zeigt sich vergleichsweise robust, die zyklischen Streuungen der eingespritzten Gasmengen liegen bei unter 1%. Auch die bis dato beobachteten Verschleißerscheinungen nach mehreren 100 Betriebsstunden, u.a. im motorischen Einsatz, bewegen sich in von Diesel-Injektoren bekannten Ausmaßen.

ERGEBNISSE AUF BASIS DES OPTIKMOTORS

Um ein Verständnis für den Ablauf der HPDF-Verbrennung in einem realen Motor unter Einfluss von Effekten wie Ladungsbewegung und Interaktion der Kraftstoffstrahlen mit der Wand und der Kolbenmulde zu generieren, wurden mit dem Mehrnadelinjektor Untersuchungen am Einzylinder-Transparentmotor durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde der Optikmotor dabei zunächst um einen seitlichen optischen Zugang zur Beleuchtung des Brennraums sowie einen verbesserten, für hohe Spitzendrücke ausgelegten optischen Kolben mit einem muldenförmigen Glaseinsatz erweitert. Der für die Untersuchungen verwendete Konstruktionsstand des Optikmotors ist in Abbildung 8 gezeigt.

Ein beispielhafter Vergleich zwischen CFD-Simulation und Experiment für einen HPDF-Betriebspunkt am Optikmotor ist in Abbildung 9 gezeigt. Die Wärme-freisetzungsrate zeigt prinzipiell einen vergleichbaren Verlauf, wie er schon aus den Einzelstrahluntersuchungen der RCEM bekannt ist: Zuerst erfolgt die Zündung des Pilot-Diesels. Die Eindüsung des Hochdruckgases ist in den Aufnahmen durch im Hochdruckgas enthaltene flüssige Bestandteile erkennbar und beginnt bei dem gezeigten Betriebspunkt in etwa zeitgleich mit der Zündung des Diesel-Pilots bei 722° Kurbelwinkel. Dadurch, dass die Gasstrahlen hier mittig zu den Diesel-Pilot-Strahlen angeordnet sind, erfolgt die Zündung des Hochdruckgases relativ spät

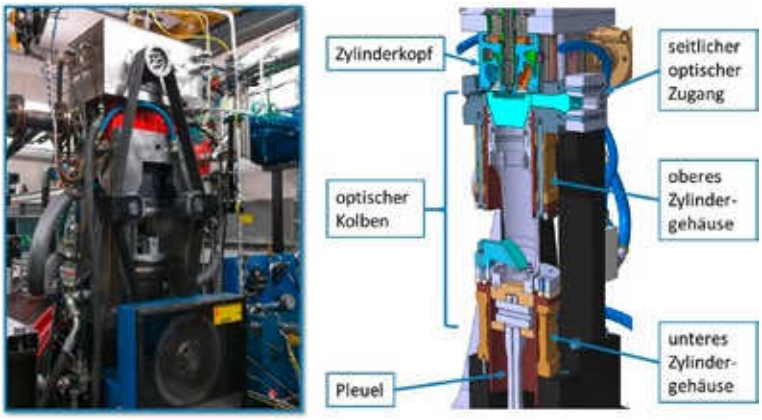


Abb. 8: optisch zugänglicher Einzylinder-Forschungsmotor des LVK

nach Beginn der Gaseindüsung bei 725° Kurbelwinkel. In der Folge ergibt sich für die Gasverbrennung ein ausgeprägter Peak in der Wärmefreisetzung. Da in dieser Verbrennungsphase zunächst das bis zu diesem Zeitpunkt gebildete vorgemischte Gas-Luft-Gemisch verbrennt, ist in den Aufnahmen bei der Gasverbrennung kaum Rußleuchten erkennbar. Bei der anschließenden diffusiven Verbrennung (ab ca. 728°KW) ist auch bei der Gasverbrennung ein deutliches Rußleuchten sichtbar. Allerdings ist dessen Intensität im Vergleich zur Diesel-Pilot-Flamme wesentlich geringer. Dies ist ein Indiz für dort niedrigere Verbrennungstemperaturen und damit geringere Neigung der Gasverbrennung zur Stickoxidbildung.

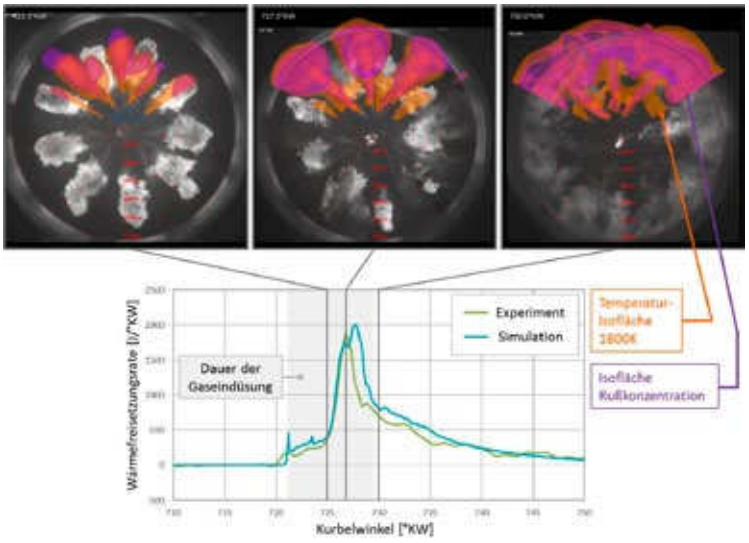


Abb. 9: Am Optikmotor untersuchter HPDF-Betriebspunkt im Vergleich mit der CFD-Simulation

Die Untersuchungen am Optikmotor zeigen außerdem, dass es in der diffusiven Verbrennungsphase im Brennraum zu einer Schichtung kommt. Unverbranntes Gas bzw. fettes

Gas-Luft-Gemisch sammelt sich im äußeren Bereich der Kolbenmulde, während im inneren Bereich eine relativ große Luftmenge zunächst nicht an der Verbrennung teilnimmt. Die Wärmefreisetzungsrate ist in dieser Verbrennungsphase durch die Einmischung von Luft in die äußere, fette Zone limitiert. Nach Ende der Gaseinspritzung ist die Ladungsbewegung (Drallströmung) im Zylinder maßgeblich verantwortlich für die Einmischung von Luft in diese Zone.

Das CFD-Simulationsmodell ist auch für den Optikmotor in der Lage, sowohl den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate als auch die bei der HPDF-Verbrennung auftretenden Phänomene wie Zündung, vorgemischte und mischungskontrollierte Verbrennung abzubilden. Mit dem Simulationsmodell steht somit ein Werkzeug zur Verfügung, um beispielsweise die Form der Kolbenmulde oder die zeitliche und räumliche Anordnung von Gas- und Dieseleinspritzung zu optimieren.

ERGEBNISSE AUF BASIS DES THERMODYNAMISCHEN EINZYLINDERMOTORS

An einem thermodynamischen Einzylindermotor mit einem Hubvolumen von 4,7 Litern und einer Drehzahl von bis zu 1800 1/min werden die Verbrauchs- und Emissionswerte ermittelt Basierend auf den Ergebnissen der RCEM, des Optikmotors und unter Zuhilfenahme von Verbrennungsimulationen wurde eine Injektordüsengeometrie mit 9 Gas- und 9 Dieseleinspritzlöchern sowie eine darauf abgestimmte Kolbengeometrie ausgelegt. Über Druckregelklappen werden am Einzylindermotor sowohl ladeluft- als auch abgasseitig die gleichen Randbedingungen wie am Vollmotor vorgegeben. Dadurch ist sichergestellt, dass der Hochdruckprozess des Einzylindermotors und des Mehrzylindermotors vergleichbar sind. Nach einer sukzessiven Steigerung der Leistung auf die maximale Zylinderleistung wurden über eine Parametervariation der Gas- und Pilotdieseleinspritzdrücke sowie der Einspritzzeitpunkte die Emissionsmodelle mit der Methode Design of Experiments (DoE) für den Parameterraum erstellt. Anschließend wurden nach einer analytischen Optimierung dieser Betriebsparameter innerhalb der erstellten Verbrauchs- und Emissionsmodelle optimierte Emissionswerte vorhergesagt und experimentell nachgewiesen.

Ein alternatives Verbrennungskonzept zum HPDF Motor ist ein fremdgezündeter Otto-Gasmotor, der Erdgas homogen vorgemischt verbrennt. Im Folgenden werden beide Verbrennungskonzepte auf Basis experimenteller Untersuchungen bei der jeweils maximalen Motorleistung vergleichend bewertet wobei der HPDF Einzylinder gegenüber dem Otto-Gas Motor bei einer 30% höheren Zylinderleistung betrieben wird. Die höheren Leistungen des HPDF Verfahrens resultieren insbesondere aus der Tatsache, dass die dieselmotorische Verbrennung nicht durch die für Ottomotoren typische Klopfgrenze limitiert wird.

Die spezifischen Stickoxid (NOx) Motorrohemissionen liegen bei dem HPDF Verfahren um 30% über dem Otto-Gas Motor. Um die NOx Emissionsgrenzwerte für EPA4 und EU5 einzuhalten wird für das HPDF Verfahren konzeptionell eine Abgasnachbehandlung nach dem Prinzip der selektiven katalytischen Reaktion (SCR) vorgesehen.

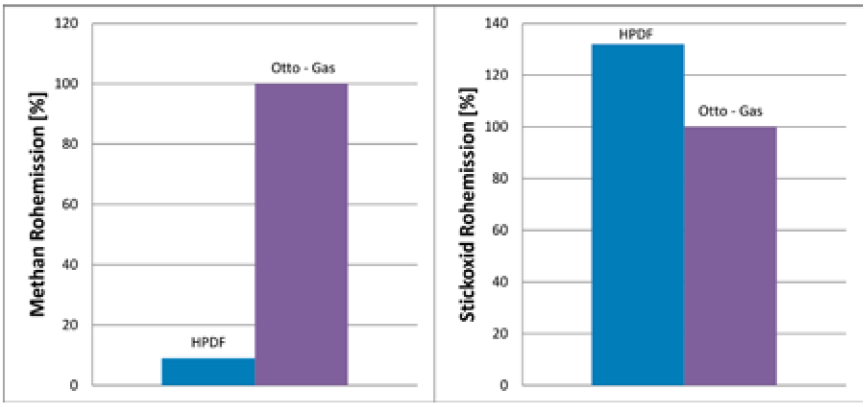


Abb. 10: Relativer Unterschied der Stickoxid Rohemissionen und Methanrohemissionen von HPDF und Gas-Otto Motor

Ein großer Vorteil des HPDF Brennverfahrens liegt in der geringen Methan-Rohemission. Aufgrund der Hochdruckeinspritzung der beiden Kraftstoffarten unmittelbar vor und während der Verbrennung gelangen nur sehr geringe Brennstoffanteile in den Bereich der Brennraumwände. In diesem wandnahen Bereich kann die Verbrennung aufgrund der dort vorliegenden geringen Temperaturen erlöschen. Die unverbrannten Kraftstoffbestandteile werden anschließend im darauf folgenden Arbeitstakt als Rohemission aus dem Brennraum ausgeschoben, was zu höheren Methanemissionen führt. Das HPDF Brennverfahren zeigt an dem vorliegenden Vollastbetriebspunkt eine Reduktion der Methan Rohemissionen um 81% gegenüber dem Otto-Gas Brennverfahren.

Hinsichtlich Partikelemissionen und Wirkungsgrad zeigen die bisherigen Untersuchungen noch deutliches Verbesserungspotenzial, welches in weiteren Untersuchungen und Optimierungsschritten ausgeschöpft werden soll.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse des hier in Ausschnitten vorgestellten Projektes zeigen, dass das Verfahren in der Lage ist, in schnelllaufenden, drehzahlvariablen Großmotoren die angestrebte Methanschlupfminderung zu erreichen. Vorteilhaft gegenüber alternativen Gasmotorkonzepten ist die Steigerung der Leistungsdichte, welche durch das dieselmotorische Verfahrensprinzip erreicht wird, da konzeptionell eine klopfende Verbrennung ausgeschlossen wird.

Nachdem die erarbeiten Modelle eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen zeigen, ist im Rahmen der weiteren Verwertung vorgesehen, die bereits nachgewiesenen Potenziale zu verbessern. Damit wird angestrebt, die Vor- und Nachteile des vorgestellten HPDF Konzeptes im Vergleich zum Otto-Gas Konzept in einen detaillierten technischen und wirtschaftlichen Vergleich zu bringen.

Für die Bereitstellung des Hochdruckgases am schnelllaufenden Motor ist eine transientfähige und effiziente Brenngasdruckbereitstellung und –regelung mit hohen Standzeiten für den kommerziellen Einsatz erforderlich. Es ist weiter zu untersuchen, wie mit dem HPDF Verfahren möglichst innermotorisch zukünftige Partikelemissionsziele erreicht werden können. Dies ist beispielsweise durch Variation der Zündölzusammensetzung möglich. Weiterhin sollen verschiedene regenerativ hergestellte, methanbasierte Kraftstoffzusammensetzungen hinsichtlich der Eignung in dem Konzept untersucht werden. Die Grundlagenuntersuchungen haben gezeigt, dass das Verfahren auch für sonstige Kraftstoffe wie beispielsweise Methanol geeignet ist. Die Eignung von Methanol als Kraftstoff mit einfacherer Kraftstoffdruckbereitstellung im Vergleich zur Kompression des verflüssigten Erdgases soll untersucht werden.

Die weiterführenden Inhalte werden in dem Verbundvorhaben MethQuest, Erzeugung und Einsatz von Methan aus erneuerbaren Quellen in mobilen und stationären Anwendungen bearbeitet.

LITERATUR

[1] [AND-15]
Anderson, M.; Kent, S.; Fridell, E.: Particle- and Gaseous Emissions from an LNG Powered Ship, Environ. Science &. Technology, 49(20):12568−12575, 2015

[2] [HAR-02]
Harrington, J.; Munshi, S.; Nedelcu, C.; Ouellette, P.; Thompson, J.; Whitfield, S.: Direct Injection of Natural Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine, SAE Technical Paper 2002-01-1630, 2002

[3] [McT-07]
Mctaggart-Cowan, G.; Jones, H.; Rogak, S.; Bushe, W.; Hill, P. G.; Munshi, S.: The Effects of High-Pressure Injection on a Compression–Ignition, Direct Injection of Natural Gas Engine, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 129(2):579-588, 2007

PROEIS –
EINFLUSS DER FORMGEBUNG VON SCHIFFEN AUF DIE PROPULSIONSEFFIZIENZ UND PROPELLER-EIS-BELASTUNG

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX391A-G

DIPL.-ING. MARKUS MOTZ	develogic GmbH (Hamburg)
DR.-ING. ALESSIO MELONI	develogic GmbH (Hamburg)
DR.-ING. FRANK BERNING	develogic GmbH (Hamburg)
DIPL.-ING. HOLGER MUMM	DNV GL (Hamburg)
DIPL.-ING. DANIELA MYLAND	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (Hamburg)
M.SC. QUENTIN HISETTE	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (Hamburg)
DIPL.-ING. LUTZ KLEINSORGE	Mecklenburger Metallguß GmbH, (Waren, Müritz)
DR.-ING. RALF TSCHULLIK	MV WERFTEN Wismar GmbH (Wismar)
M.SC. DENNIS MIERKE	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie (Hamburg)
M.SC. MARTIN GEHRKE	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie (Hamburg)
DR.-ING. CHRISTIAN JANSSEN	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie, (Hamburg)
PROF. DR.-ING. THOMAS RUNG	Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie (Hamburg)
DIPL.-ING. PHILIPP HAUER	Voith Turbo GmbH & Co. KG (Heidenheim)

EINLEITUNG

Die nachhaltigen klimatischen Veränderungen erlauben zunehmend einen wirtschaftlichen Schiffsverkehr in arktischen Gewässern. Dadurch gewinnt die Möglichkeit der Umsetzung von wirtschaftlichen Interessen, wie einer Bewirtschaftung arktischer Gebiete, insbesondere im Zusammenhang mit dem Ausbau der Rohstoffgewinnung, sowie der möglichenVerkürzung der Seetransportwege zwischen Europa und Asien zunehmend an Bedeutung.

Die Antriebseigenschaften eisgehender Schiffe werden durch ihren Widerstand in Eis, die installierte Leistung und die Propeller-Eis-Interaktion bestimmt. Die Eiszufuhr zum Propeller ist nicht nur für die Propulsionsgüte sondern auch für die Häufigkeit hoher Belastungen aus Propeller-Eis-Interaktion entscheidend. Die Eismenge, die die Propellerebene erreicht, wird durch die Rumpfform des Schiffes bestimmt und führt zu einer möglichen Reduktion der Propulsionsgüte sowie einem Anstieg der Propellerbelastung.

Vor dem oben genannten Hintergrund verfolgte ein Forschungskonsortium, bestehend aus Mitarbeitern einer Werft, zweier Schiffsantriebshersteller, einer Klassifikationsgesellschaft, einem Messtechnik-Entwickler für Unterwasser-Anwendungen, einer Versuchsanstalt und einer Universität das Ziel, effiziente softwarebasierte Simulationswerkzeuge im Hinblick auf die Wechselwirkung zwischen Rumpf, Propeller und Eis auf Basis von Modellversuchen und Großausführungsmessungen zu entwickeln und zu validieren. Die Werkzeuge ermöglichen eine Analyse der Schollenbewegung in Abhängigkeit verschiedener Schiffdesigns, die Prognose des Eiseinflusses auf die Propulsionsgüte und die Abschätzung der eisinduzierten Propellerbelastung. Mit Hilfe der Werkzeuge wurden Entwurfsverfahren für Propeller- und Schiffsdesigns in der Konzeptphase verbessert. Des Weiteren wurden Grundlagen für die Abschätzung von Propeller-Eislasten für Propulsoren und Betriebsarten geschaffen, für die im aktuellen Regelwerk keine Lasten zur Dimensionierung des Propellers und Propulsionsstranges zur Verfügung stehen.

FORMALE STRUKTUR DES VERBUNDVORHABENS

Das Verbundvorhaben ProEis gliederte sich in vier Arbeitspakete (siehe Abb. 1), wobei jedes Arbeitspaket unter Beteiligung mehrerer Verbundpartner von einer Person verantwortlich geleitet wurde.

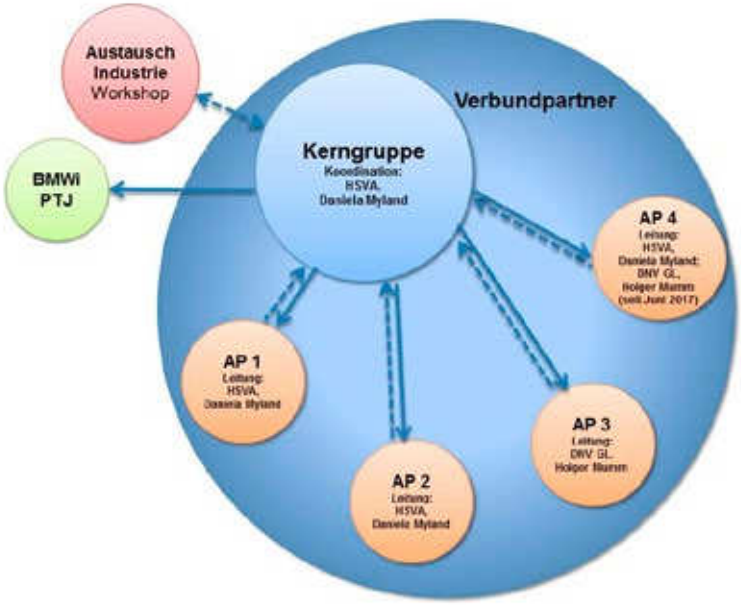


Abb. 1: Struktur des Verbundes, Koordinators, der Arbeitspakte sowie des Austauschs mit der Industrie.

Die Arbeitspakete setzen einzelne Forschungsschwerpunkte (siehe Abb. 2) zeigen aber auch die Vernetzung der Arbeitsaufgaben der Verbundpartner sowie die Vernetzung der Forschung und Entwicklung zwischen den Partnern auf den Gebieten der Schiffshydrodynamik und Festigkeit.

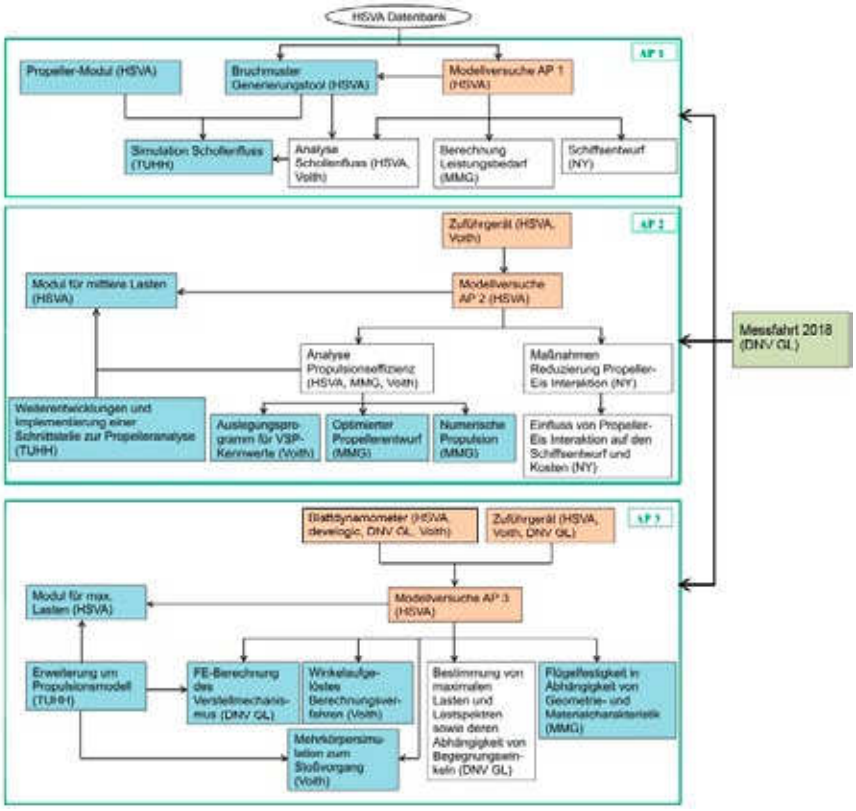


Abb. 2: Vernetzung der Arbeitsaufgaben.

Die Gesamtkoordination des Vorhabens lag bei der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA), im Vorhaben vertreten durch die Koordinatorin Daniela Myland. Neben der HSVA waren folgende Verbundpartner am Projekt beteiligt:

› Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG (VOITH)
› Mecklenburger Metallguss GmbH (MMG)
› MV Werften Wismar GmbH (MVW), Nordic Yards Wismar GmbH (NY)
› DNV GL SE (DNV GL)
› develogic GmbH (develogic)
› Technische Universität Hamburg, Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie (TUHH)

Das Gesamtziel, anwendungsorientierte und effiziente softwarebasierte Entwurfs- und Berechnungswerkzeuge zu entwickeln, basiert, wie im Flussdiagramm dargestellt, grundlegend auf Modellversuchsergebnissen, zu denen alle Partner unterschiedliche Beiträge lieferten oder Ergebnisse daraus nutzten. Abgerundet wurde das Vorhaben mit der Durchführung von Großausführungsmessungen.

INDIVIDUELLE BEITRÄGE DER VERBUNDPARTNER ZUR ERREICHUNG DES GESAMTZIELS

Der Partner HSVA führte im Rahmen des Vorhabens ProEis eine ganzheitliche Betrachtung des Eisbrechprozesses entlang des Schiffsrumpfes von eisbrechenden Schiffen durch. Dabei verfolgte der ganzheitliche Ansatz die systematische Untersuchung des Einflusses der Formgebung von eisbrechenden Schiffen auf die Propulsionsgüte und die Propeller-Eis-Belastung. Konkret wurden neue Versuchsverfahren, insbesondere mit Blick auf die Testaufbauten sowie eine Reihe numerischer Werkzeuge entwickelt, die sowohl eine Effizienzsteigerung als auch eine Beschädigungsreduzierung des Propellers begünstigen. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

Zunächst wurde ein anwendungsorientiertes Vorhersagewerkzeugs zur Generierung von idealisierten Bruchmustern, die beim Brechen von ebenem Eis durch verschiedene Schiffstypen in Vorwärtsfahrt entstehen, entwickelt (siehe Abb. 3) [1]. Die geometrischen Eigenschaften der erzeugten Bruchmuster dienen als Eingangsdaten für die Simulationen der TUHH.

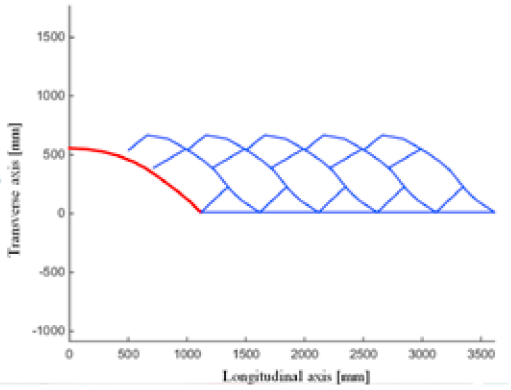


Abb. 3: Beispiel für ein generiertes Bruchmuster eines eisbrechenden Schiffmodells.

Als Basis für die Entwicklung neuer Vorschriften durch DNV GL und zur Entwicklung und Validierung realistischer numerischer Modelle durch die TUHH sowie zum Entwurf von Propellern durch MMG und VOITH und konstruktiven Reduzierungsmaßnahmen der Propeller-Eis-Interaktion durch MVW bereitete die HSVA Modellversuche im Großen Eistank, im Eislabor und im Großen Schlepptank vor, führte diese durch und unterstützte die Auswertung. Eine Auswahl der Versuche ist in den Abb. 4 bis 6 dargestellt.

Abb. 4: Eiszuführgerät zur Untersuchung der Propeller-Eis-Interaktion verschiedener Propeller.

Abb. 5: Fahrt eines eisbrechenden Schiffmodells durch vorgesägtes Eis zur Validierung numerischer Tools.

Abb. 6: Propulsionsversuch zur Untersuchung eines optimierten Eisklassepropellers.

Weiterhin wurde auf Basis der Modellversuchsergebnisse, i.e. Unterwasservideoaufnahmen, eine Bildanalyse-Methodik entwickelt, mit der eine detaillierte Beschreibung und Analyse der komplexen physikalischen Zusammenhänge der Schollenbewegung entlang

des Schiffsrumpfes nach Beendigung des Brechvorgangs auf der Wasserlinie unter dem Einfluss verschiedener Schiffsgeometrien durchgeführt werden konnte [2]. Durch Anwendung der Methodik konnten zudem der Einfluss der Schollengeometrie und der Einfluss der Formgebung von Schiffen auf die Schollenbewegung bestimmt werden (siehe Abb. 7).

Abb. 7: oben: Unterwasservideoaufnahme des Schollenflusses entlang eines Schiffmodells; unten: identifizierte Schollen nach Anwendung der Bild-Analyse Methodik.

Ein Teil der Modellversuchsergebnisse diente der Validierung eines numerischen Verfahrens für die Berechnung von mittleren und maximalen Lasten und Spannungen auf Propellerflügel [3], [4]. Das Verfahren stellt eine Erweiterung bereits bestehender HSVA-interner Programme dar.

Nicht zuletzt umfassten die Arbeiten der HSVA die Unterstützung der Partner als Eisexperten und Koordinator des Verbundprojektes. Für den Austausch zwischenzeitlicher Projektergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit dem Konsortium ein erfolgreicher internationaler Workshop zum Thema „Effizienz von eisgehenden und eisbrechenden Schiffen in Abhängigkeit vom Schiffs- und Propellerentwurf" organisiert und durchgeführt.

Die geleisteten Arbeiten ermöglichten der HSVA insbesondere die Erschließung neuer Tätigkeitsfelder im Bereich der Beratung von Werften und Reedereien mit Blick auf eine sicherere und effizientere Schifffahrt.

Für den Partner MMG stand während des Vorhabens die hydrodynamisch effiziente Auslegung eines Eisklasse-Propellers unter Berücksichtigung des Festigkeitsnachweises im Vordergrund. Die komplexeren Lastannahmen und höheren Sicherheiten in der Auslegung eines Eisklasse-Propellers beeinflussen maßgeblich die Flügeldicke des Propellers. Dies steht in einem natürlichen Widerspruch zur hydrodynamischen Effizienz.

Zunächst wurden die aktuellen Finnisch-Schwedischen-Eisregularien (FSICR) aufgearbeitet. Hierfür wurde eine automatisierte FEM-Routine entwickelt, die die erforderlichen Eislasten berechnet und automatisiert die fünf Eislast-Fälle für Festpropeller überprüft (siehe Abb. 8). Hiermit wurden generelle Studien zu dem Einfluss von Propellerhauptdaten (Skew, Rake, etc.) auf den Festigkeitsnachweis durchgeführt. Die Ergebnisse der Auslegung nach FEM-Routine und nach Regeln der Klassifikationsgesellschaften wurden verglichen, so dass

Korrelationsfaktoren für eine Abschätzung von Eisklasse Flügeldicken im ersten Entwurf genutzt werden können.

Für die hydrodynamische Auslegung wurden die Flügeldicken eines existierenden Containerschiffspropellers entsprechend der FSICR 1A erhöht. Beim Partner HSVA sind mit diesem Propeller Propulsionsversuche durchgeführt worden. Diese zeigten, dass die Propulsionseffizienz durch die Dickenauslegung für die Eisklasse um bis zu 4% verringert wird. Gleichzeitig wurden hierzu bei der MMG numerische Propulsionsversuche mit RANSE-Methoden durchgeführt, welche diese Verringerung der Propulsionseffizienz bestätigen konnten.

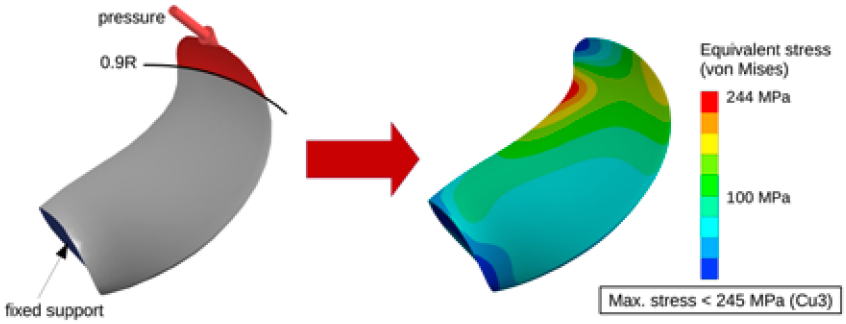


Abb. 8: FEM-Berechnung des Lastfalls 4 der FSICR. Die Eislast wird auf die Druckseite der Propellerspitze aufgebracht. Die automatisierte FEM-Routine bestätigt, dass die maximalen Spannungen nicht überschritten werden.

Mit Hilfe der hauseigenen Entwurfsumgebung ist eine Optimierungsroutine für Eisklasse-Propeller entwickelt worden. Zur numerischen Berechnung der Effizienz wurde eine Panelmethode genutzt. Als Zielfunktion wurde die Propulsionseffizienz gewählt. Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Optimierungsroutine. Die optimierte Variante zeichnet ein wesentlich kleineres Flächenverhältnis aus, die Flügelmasse wurde signifikant reduziert. Der optimierte Propeller wird ebenfalls beim Partner HSVA im Modellversuch und bei der MMG numerisch mit RANSE-Methoden untersucht. Die Ergebnisse der Versuche und Berechnungen variieren. Dies wird auf die kurzen, dicken Profile zurückgeführt, die eine turbulente Umströmung im Modellversuch nicht immer gewährleisten. Hier wird weiterer Forschungsbedarf gesehen, damit auch hier in Zukunft eine Verifikation & Validierung erreicht werden kann.

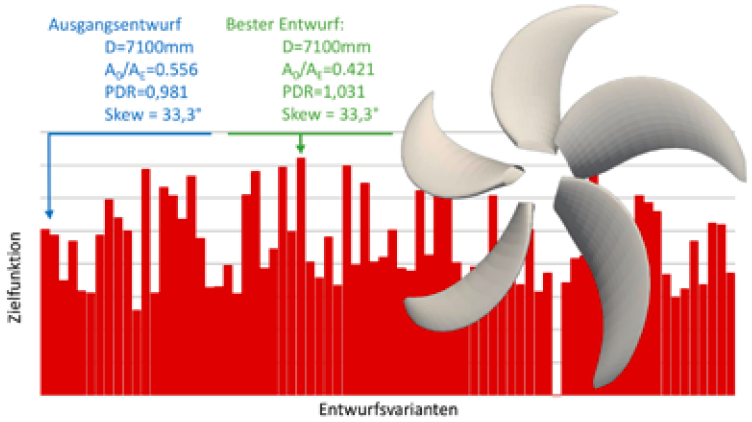


Abb. 9: Ergebnis der Optimierung der Propulsionseffizienz eines Eisklasse Propellers mit einem Panelverfahren.

Die entwickelte FEM-Routine wird fortlaufend in der Festigkeitsauslegung für Eisklasse-Propeller im Unternehmen angewendet. Die geschaffene Optimierungsroutine wird für weitere Entwurfsaufgaben zukünftig erweitert. Durch die Einbindung in die hauseigene Entwurfsumgebung wird die Routine ebenfalls in vielen laufenden Prozessen fest mit eingebunden. Der Entwurfsprozess für Eisklasse-Propeller wird durch die entwickelten Methoden verschlankt, die Entwurfssicherheit wird erhöht.

Der Projektpartner NY bzw. MVW fungiert innerhalb des Verbundforschungsvorhabens als Systemintegrator. Abzielend auf das Zusammenspiel von Propulsionswirkungsgrad eisbrechender Schiffe unter Berücksichtigung der Propeller-Eis-Interaktion ist daher für die Werft das Augenmerk auf das System Schiff und die Optimierung der Propulsionsleistung in der Konzeptdesignphase gelegt worden. So wurden einerseits die schiffsformgebenden Parameter und deren Einfluss auf das Eisbrechverhalten sowie der Transport der Eisschollen entlang der Außenhaut untersucht. Zum anderen waren spezielle Maßnahmen zur Verringerung der Propeller-Eis-Interaktion Schwerpunkt der Untersuchung. Darüber hinaus wurde der Einfluss auf den Wirkungsgrad durch die Interaktion ermittelt.

Während des Bearbeitungszeitraumes kam es zu einem Wechsel. Mit dem Wechsel des Projektpartners von Nordic Yards zu MV Werften konnten wichtige Teile des Teilvorhabens weiter verfolgt werden. Maßnahmen, im Speziellen Räumkeile, für die speziellen Anforderungen von Flachwassereisbrechern sind im Projekt konzipiert und bedeuten einen Ausbau des Wissenstandes für zukünftige Projekte von Werften für diese Regionen. Ein weit wichtigerer Aspekt stellt in der momentanen Marksituation die Kreuzschifffahrt dar. Auch diese dringt in arktische Gewässer vor. Innerhalb des Teilvorhabens wurde daher ein innovatives Schiff unter Berücksichtigung der Anforderung der Zukunft entworfen. Das ermöglicht die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Sicherheit der Leistungsprognose im frühen Designprozess, die Minimierung des Risikos von Fehlentwicklungen, die Beschleunigung des Entwurfsprozesses, die Verbesserung der Umweltbilanz des Schiffes und vieles mehr. Dieses Konzeptdesign diente weiterhin vor allem auch als Validierungsfall für die

entwickelten Rechentools im Hinblick auf die Verbundpartner. Darüber hinaus ist es für Modellversuche beim Projektpartner HSVA verwendet worden um die entwickelten Werkzeuge auch experimentell zu bestätigen und auszuwerten. Mit Hilfe der Validierung durch Modellversuche wird den MV Werften ein wichtiger und innovativer Konzept-Generalplan vorliegen. In der Verwertung kann dieser für den Entwurfsprozess nutzbar sein und kostenintensive Fehlentwicklungen verringern helfen. Darüber hinaus werden die werfteigenen Kompetenzen für diesen Bereich gestärkt.

Die Arbeiten der TUHH befassen sich mit der numerischen Modellierung der Umströmung von Schiffen in eisbedeckten Gewässern. Hierzu wurde ein Simulationsverfahren entwickelt, das die Prognose des Schollenflusses entlang des Schiffsrumpfes bis hin zur Propulsionsebene ermöglicht und dabei die Auswirkungen der Propeller-Eis-Wechselwirkung auf die Propulsionscharakteristik untersucht.

Die Grundlage des Simulationverfahrens stellt der am Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie (FDS) entwickelte Strömungslöser elbe [5] dar. Dieser basiert auf einer effizienten Gitter-Boltzmann-Methode für Strömungen mit freien Oberflächen und ist für die Anwendung auf Grafikkarten-Hardware zugeschnitten. elbe wurde im Rahmen dieses Verbundforschungsvorhabens signifikant erweitert und optimiert [6]. Grundlage bildete dabei eine bidirektionale Kopplung des Strömungslösers an die Open Dynamics Engine (ODE) [7] zur Vorhersage der Eisschollen-Dynamik, der Eis-Eis- sowie der Schiff-Eis-Interaktionen. Die Eisschollen werden dabei als Starrkörper behandelt und die numerische Modellierung des Eisbrechens wurde vernachlässigt. Weitere Verbesserungen umfassen Methoden zum Gitterverfeinerung, zur Propulsionsmodellierung sowie zum Eisschollengenerierung. Die entwickelte Gitterverfeinerungsmethode dient zur lokalen Verfeinerung der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung von Strömungszonen, in denen hohe Gradienten zu erwarten sind oder aufzulösende geometrische Details vorliegen, wie beispielsweise Propellerblätter (siehe Abb. 10). Schraubenpropeller werden hydrodynamisch durch die Aufprägung propellerinduzierter Geschwindigkeiten mittels eines Panelverfahrens der HSVA auf Basis des Nachstroms berücksichtigt (siehe Abb. 11). Zur kontinuierlichen Zufuhr von Eisschollen wurde darüber hinaus ein Eisschollengenerator entwickelt, der beliebige Eisschollen dynamisch initialisiert und dem Rechengebiet störungsfrei zu- und abführt. Ein ausführlicher Überblick über weitere Beiträge und die Details der Umsetzung des Eistanks finden sich in [8] und [9].

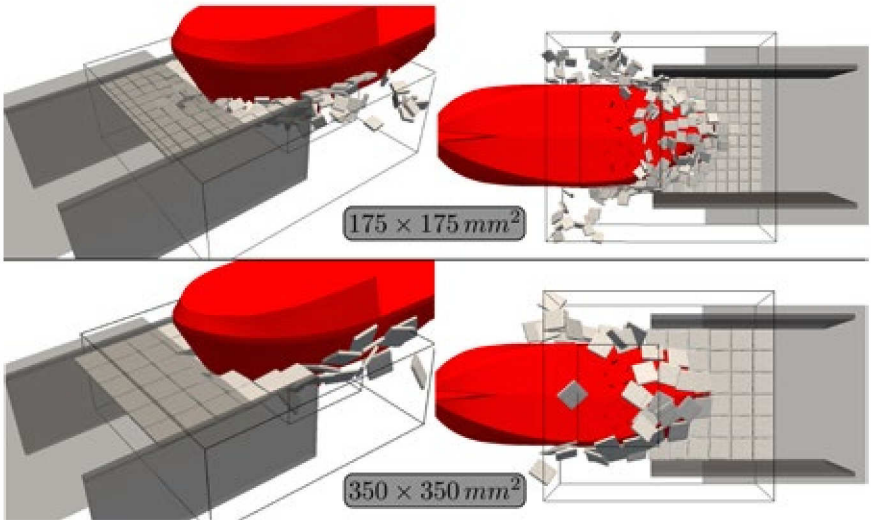


Abb. 10: Simulation eines Voith-Wassertreckers in einer Eisrinne mit vorgebrochenen Eisschollen. Links: Totalansicht, rechts: Ansicht von unten. Das Strömungsfeld ist ausgeblendet (großer schwarzer Rahmen). Die Voith-Schneider-Propeller befinden sich in einer Gitterverfeinerungszone (kleiner schwarzer Rahmen). Die Eisschollen werden dynamisch zu- und abgeführten und wurden in ihrer Größe variiert (oben: 175mm, unten: 350mm). Die Eisschollen werden durch zwei virtuelle Platten (dunkelgrau) in der Eisrinne gehalten.

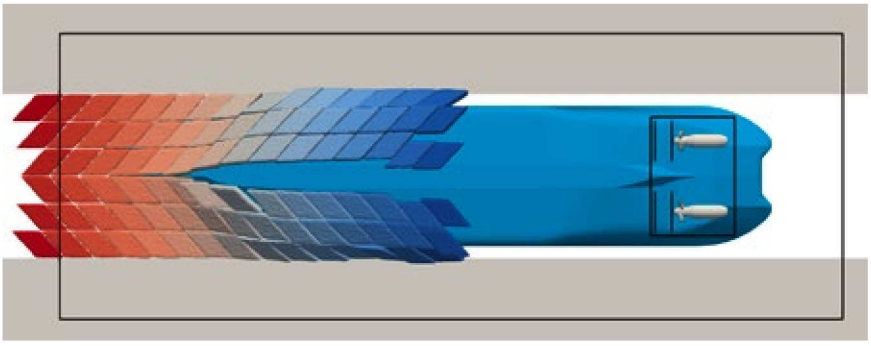


Abb. 11: Simulation eines Zweischraubers in Bodenansicht. Das Strömungsfeld ist ausgeblendet (großer schwarzer Rahmen). Gitterverfeinerung um die Propulsionsorgane und die Quell- und Aufprägungszonen der induzierten Geschwindigkeiten (kleiner schwarzer Rahmen). Dynamische Zufuhr parallelogrammförmig vorgebrochener Eisschollen von links. Fernfeldeis zur Modellierung der Eisrinne auf beiden Seiten des Schiffes (grau).

Im Anschluss an die methodischen Erweiterungen zur Simulation eisgehender Schiffe wurde elbe mit anderen numerischen Methoden verglichen [10] sowie auf Basis von Modellversuchen der HSVA im hauseigenen Großen Eistank anhand generisch vorgebrochener Eisschollen validiert [1]. Sämtliche im Rahmen des Projekts entstandenen Erweiterungen der Software haben dabei die besondere algorithmische Natur der Methode berücksichtigt und ermöglichen damit weiterhin sowohl genaue als auch belastbare Simulationsergebnisse bei Rechenzeiten in der Größenordnung eines Tages. Der entstandene numerische Eistank ermöglicht es, Entwürfe und Parameterstudien effizient und kostengünstig durchführen zu können und kann somit mittelfristig als Erweiterung zu konventionellen Eistankversuchen dienen.

Im Rahmen des Projektes hat develogic einen Controllable Pitch Propeller mit Blatt Dynamometer und Pod-Antriebseinheit (CPP-DynaPod) zur experimentellen Validierung von Simulationsmodellen entwickelt und hergestellt. Bestandteile des CPP sind ein Motor mit dynamischer Antriebsregelung, hochauflösende Erfassung der Messwerte, kabellose Telemetrie und Energieversorgung zwischen Nabe und Pod sowie sämtliche erforderliche Steuer- und Datenerfassungssoftware. Die gemessenen Daten werden auf 13 Kanälen mit einer Abtastrate von 1,2 kHz übertragen. Abb. 12 zeigt den CPP (ohne Rotorblätter), Abb. 13 zeigt den CPP als CG-Modell mit Rotorblättern. Das Schnittbild des Modells ist in Abb. 14 dargestellt. Die rotierende Schnittstelle der kabellosen Telemetrie und Energieversorgung ist in Abb. 15 zu sehen.

Abb. 12: CPP (ohne Rotorblätter).

Abb. 13: CPP (mit Rotorblätter, Modell).

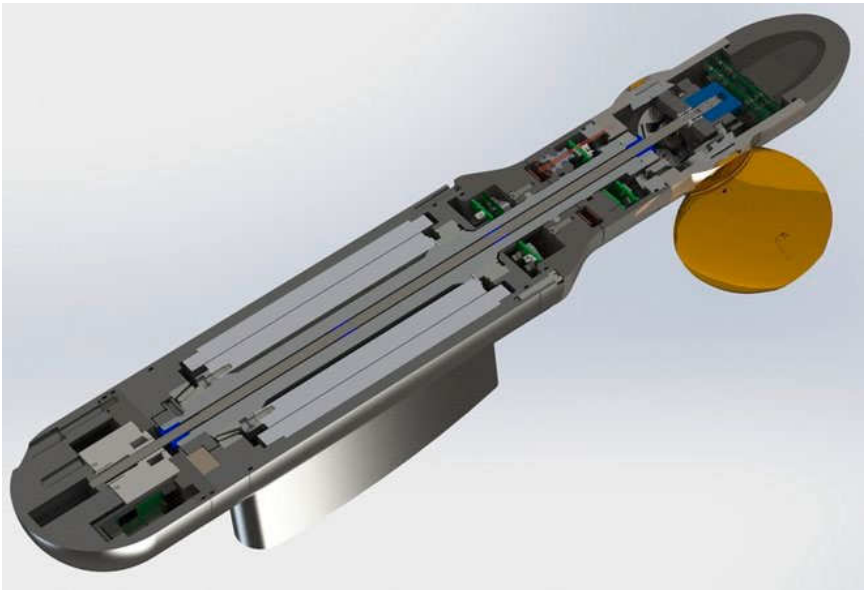


Abb. 14: CPP Schnittbild.

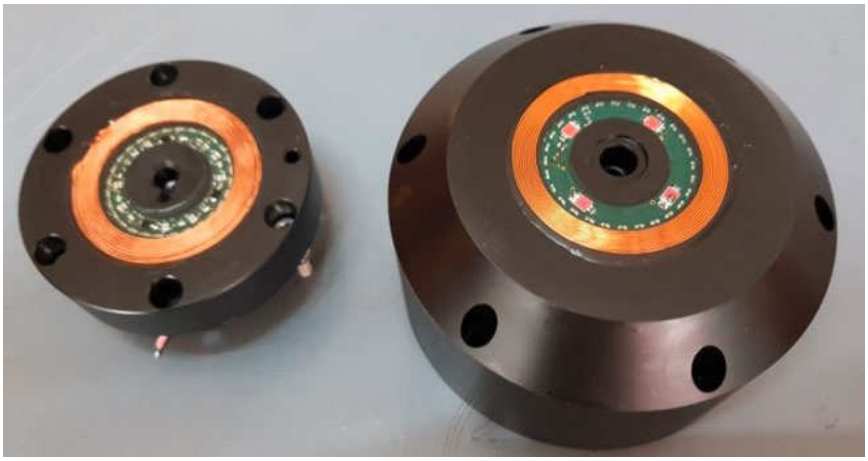


Abb. 15: Rotierende Schnittstelle (kabellose Telemetrie und Energieversorgung).

Force/Torque-Sensoren (F/T-Sensor) erfassen auftretende Kräfte an einer Blattwurzel und am Rotorschaft. Die Sensoren wurden speziell hierfür entwickelt, da am Markt keine Sensoren verfügbar sind, die gleichzeitig kompakt und belastbar genug sind. Zur mechanischen Ausführung wurde anodisiertes hochfestes Aluminium mit einem großen linearen Dehnungsbereich verwendet, für das spezifisch angepasste Dehnungsmessstreifen (DMS, k-Faktor) verfügbar sind. Aufgrund der kleinen Abmessungen mussten Kompromisse bei Konstruktion und DMS-Applikation eingegangen werden; so betragen die Außendurchmesser der Sensoren nur 60 mm (siehe Abb. 16, links, Wellensensor) bzw. nur 36 mm (siehe Abb. 16, rechts, Blattsensor), Abb. 17 zeigt den Blattsensor mit applizierten DMS.

Abb. 16: Wellensensor (links), Blattsensor (rechts), CG-Modelle.

Abb. 17: Blattsensor mit applizierten DMS.

Die Sensoren sind mit je 12 DMS in erprobter Konfiguration versehen. Bei der Entwicklung der zugehörigen DMS-Elektronik wurde neben der Anforderung der kleinen Abmessungen (geringer Bauraum) besonders das Rauschverhalten minimiert. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt über die Auswertung umfangreicher Messreihen verschiedener Kombinationen aus Lasteinleitung und jeweils resultierenden DMS-Antworten (siehe [11], [12], [13]). Wegen der beschriebenen besonderen Anforderungen (Neuentwicklung der Sensoren, geringe Abmessungen) wurde mit einer Least-Squares-Methodik ein konventionelles Verfahren gewählt, bei dem die Möglichkeiten zur Feinabstimmung und schrittweisen Kontrolle des Kalibrierprozesses besonders gegeben sind.

Die für die zahlreichen Einzelprobleme dieses Entwicklungsprojektes geschaffenen Lösungen stärken weiter die Kompetenz von develogic hinsichtlich der Entwicklung von komplexen mechatronischen Systemen zur Messdatengenerierung, -erfassung und -übertragung.

VOITH hat in seinem Beitrag das Thema Propeller-Eis-Interaktion mit Bezug auf den Voith Schneider Propeller (VSP) bearbeitet.

Als ersten Schritt wurde der Schollenfluss und die Eiszuströmung auf den Voith Schneider Propeller bei zwei typischen Schiffsformen untersucht, einem Schlepper und einem Plattformversorgungsschiff. Die Abb. 18 und 19 zeigen das Schleppermodell im Eistank des Projektpartners HSVA.

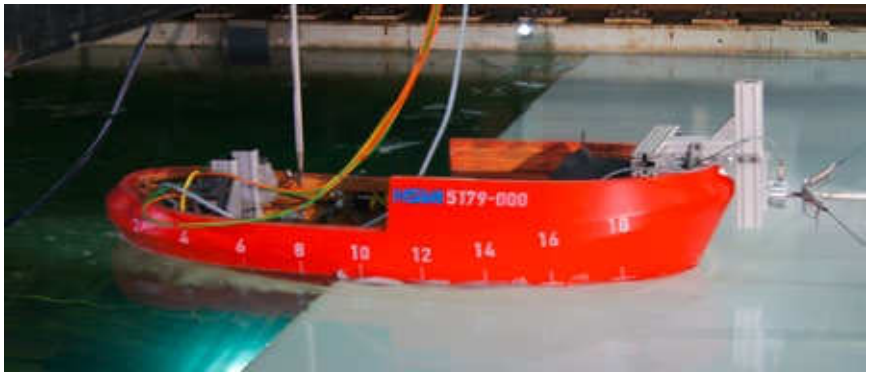


Abb. 18: Modell-Schleppschiff bei der Fahrt in die Eisdecke.

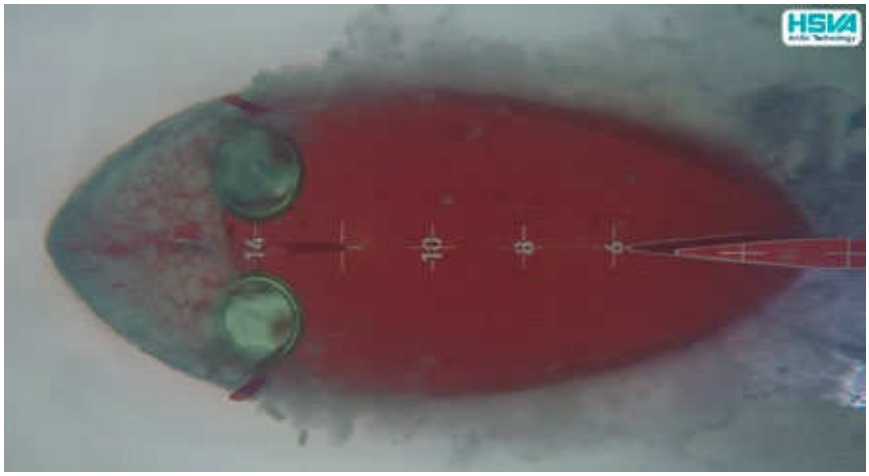


Abb. 19: Unterwasseransicht auf das Schleppschiff während der Fahrt durch das Eis.

Danach wurden umfangreiche Untersuchungen zu den Lasten, die bei der Propeller-Eis-Interaktion entstehen, durchgeführt. Hierfür wurde von Voith ein vollkommen neuer Modellpropeller entwickelt, der die Messung sämtlicher Kräfte und Momente auf die einzelnen Flügel sowie auf den Flügelverstellmechanismus erlaubt. Seitens des Projektpartners develogic wurde eine Elektronik zur Erfassung der Messdaten der Dehnmessstreifen sowie zu deren digitaler Übertragung aus dem Rotor zugeliefert. Der Partner HSVA hatte eine Vorrichtung zur kontrollierten Zufuhr von Eis an den Propeller entwickelt und gebaut. Durch

die Messungen konnte der Kenntnisstand bezüglich der Kräfte erheblich erweitert werden, die durch das Eis auf den Propeller wirken und für die mechanische Auslegung des Propellers relevant sind. Für die künftige Argumentation vor Klassifikationsgesellschaften und Kunden wird dies von großem Nutzen sein.

Zuletzt wurde die Propeller-Eis-Interaktion unter dem Gesichtspunkt der Propulsionseffizienz behandelt. Der erwähnte instrumentierte Modellpropeller wurde in ein eigens entworfenes Schiffsmodell eingesetzt, das ein für Voith Schneider Propeller typisches Heck kombiniert mit einem Vorderschiff, welches Eisschollen dem Propeller zuführt ohne diese zu zerteilen. Der in das Modell eingebaute VSP ist in Abb. 20 ersichtlich. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen, möglichst viele Eiskontakte aufzuzeichnen, die unter kontrollierten Bedingungen stattgefunden haben. Gefahren wurde das Modell in Kanälen aus gesägten Schollen sowie fein zerteiltem Eis („brash ice"), was dem vorgesehenen Einsatzszenario sehr nahe kommt, der Fahrt in durch Eisbrecher gebrochenen Rinnen. Aus der Auswertung dieser Daten konnten weitere Lastszenarien gewonnen werden, die im Vergleich zum vorherigen Arbeitspunkt deutlich realistischere Bedingungen abbilden. Durch Vergleich mit ebenfalls aufgenommenen Fahrten ohne Eis gestatten die Daten Rückschlüsse auf die Effizienzverluste durch das Eis.

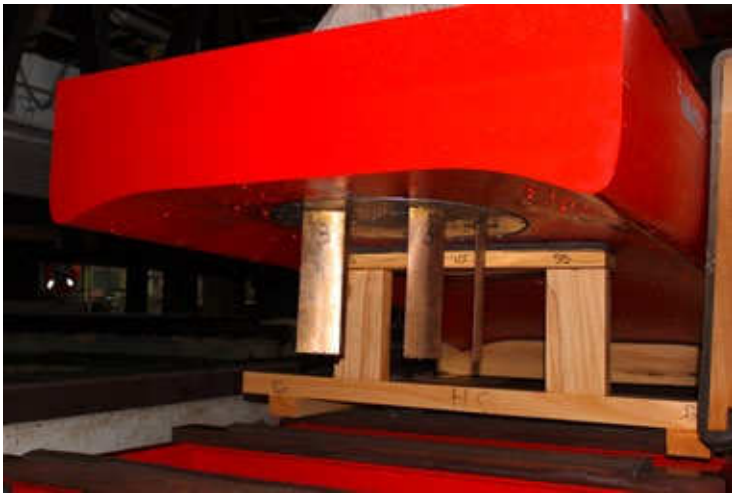


Abb. 20: Modell-VSP (D=400 mm) in einem zur kontrollierten Zuführung von Eisschollen konzipierten Schiffsmodell.

Insgesamt hat die Teilnahme am Forschungsvorhaben ProEis einen deutlich tieferen Einblick in die Physik des Voith Schneider Propellers unter Eisbedingungen ermöglicht. Es konnten Erkenntnisse bezüglich geeigneter Schiffs- und Flügeldesigns gewonnen werden, womit sich die benötigte Antriebsleistung und die Belastung von Flügeln und Verstellmechanismus reduzieren lassen. Darüber hinaus wurde ein umfassender Katalog an Lastannahmen für die betroffenen Komponenten abgeleitet.

Die Überprüfung des Propellerverstellmechanismus unter Eislasten erfolgt bis dato auf Basis präskriptiver Formeln, die relativ hohe Sicherheitsfaktoren enthalten. Direkte Berechnungen stellen eine Alternative dar, erfordern jedoch größeren Aufwand. Das von DNV GL neu entwickelte Verfahren ermöglicht die automatisierte Erstellung eines 3D-Finite Elemente Modells einer beliebigen Baugröße einer Serie auf Basis eines parametrisierten 3D-Geometrie der betreffenden Serie. Zunächst wird ein 3D-Geometriemodell auf Basis weniger Eingabedaten erzeugt, siehe Abb. 21, woraus im Folgeschritt ein 3D Finite-Elemente-Modell unter Einbeziehung der Kontaktbedingungen und Lasten generiert wird. Für die Modellierung und die Automatisierung der Arbeitsabläufe sowie die interaktive finale Festigkeitsbewertung wurde die ANSYS-Workbench verwendet. DNV GL steht nun ein Verfahren zur Verfügung, dass eine wirtschaftlichere Überprüfung der Dimensionierung des Verstellmechanismus mittels direkter Berechnung als bisher erlaubt und ist somit besser für den zunehmenden Einzugs direkter Berechnungsmethoden in die Dimensionierungspraxis gerüstet.

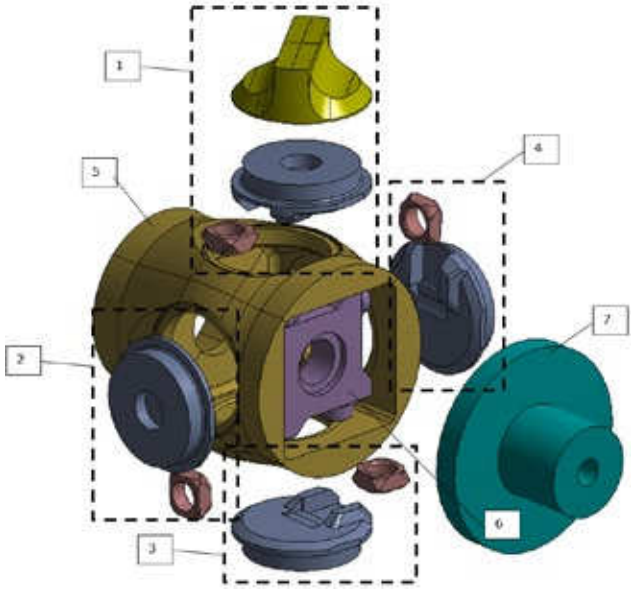


Abb. 21: Komponenten des Verstellmechanismus eines Verstellpropellers.

Die Entwurfslasten beruhen auf Erfahrungen aus Schadensfällen und Messungen in Großausführung und Modellversuch in Kombination mit theoretischen Modellen. Das Interesse von DNV GL konzentrierte sich auf den Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Propeller-Eislasten von Azimuthantrieben sowie die Gewinnung von Erkenntnissen zu Lasten auf Voith Schneider Propeller.

Es wurden Versuche für sogenanntes „Milling" des Propellers, als auch zu impulsartigen Lasten, die beim Aufprall von Eisschollen auf den Propeller entstehen, durchgeführt. Die Erkenntnisse dienen der besseren Abschätzung von Eislasten auf Voith Schneider Propeller sowie der konzeptionellen Planung von Modellversuchen zur Propeller-Eis-Interaktion.

DNV GL führte im Winter 2017/18 Langzeitmessungen auf einem Containerschiff mit Eisklasse im Liniendienst zwischen Rotterdam und St. Petersburg durch. Zentrales Anliegen dieser Messungen war es, Erkenntnisse über Häufigkeit und Stärke der Anregung von Torsionsschwingungen des Propulsionsstranges durch Propellerblatt-Eis Impulse zu gewinnen. Durch kontinuierliche Messung von Schiffsgeschwindigkeit und Propulsionskenndaten bei gleichzeitiger Dokumentation der vorliegenden Eisverhältnisse konnten aber auch Rückschlüsse auf die Erhöhung des Schiffswiderstandes und die Auswirkungen auf die Propulsionsgüte bei Betrieb im Eis gezogen werden, siehe Abb. 22.

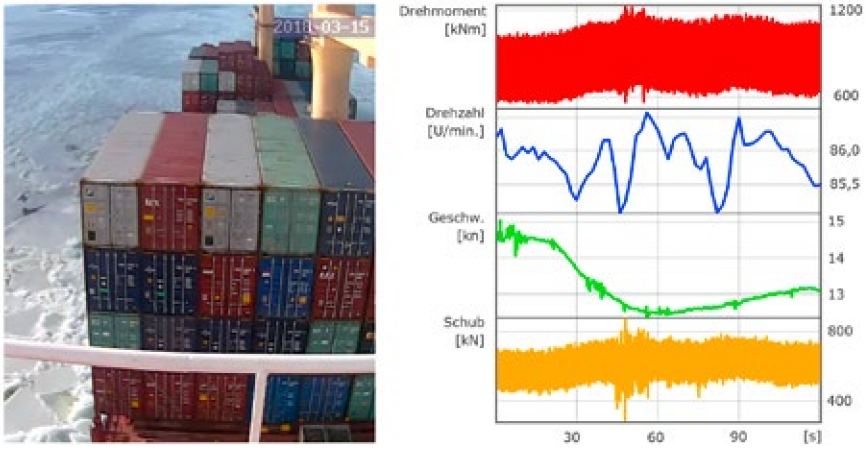


Abb. 22: Geschwindigkeitsreduktion bei Fahrt in vorgebrochenes dichteres Eis (im März 2018).

ZUSAMMENFASSUNG

Alle Partner sehen in den ihnen zur Verfügung stehenden neuen Werkzeugen und der ganzheitlichen Prognose der Propeller-Eis-Interaktion eine Verbesserung ihrer Konkurrenzfähigkeit auf den internationalen Märkten. Sie sehen nicht zuletzt wegen der Zunahme der wirtschaftlichen Aktivitäten in arktischen Regionen und der damit verbundenen Zunahme der Eisschifffahrt eine Stärkung ihrer Marktposition in folgenden Themenbereichen:

- Entwurf und Bau von eisbrechenden Schiffen
- Entwurf und Bewertung von Antriebskonzepten
- Betrachtung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Eisschifffahrt
- Anwendung neuer Modellversuchstechniken und Prognosemethoden
- Beratung bei der Formgebung von eisbrechenden und eisgehenden Schiffen
- Beratung bei der Auswahl von Maschinen und Propellern

LITERATUR

[1] Myland D, Mierke D. „Methodology for Investigation of Ice Breaking Performance“, in: Proc. of the 26th Conference of The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2016.

[2] Myland, D., Ehlers S. „Methodology to Assess the Floe Size and Distribution Along a Ship Hull During Model Scale Ice Tests for Self-propelled Ships Sailing Ahead in Level Ice". Journal of Ships and Offshore Structures, 2017, Vol. 12, No. S1, S100-108.

[3] Khan A., Hisette Q., Streckwall H. „Numerical Investigation of Propeller-Ice Interaction Effects." Proc. 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Sapporo, Japan, 2018.

[4] Khan A. (2018). „Numerical Investigation of Propeller-Ice Interaction Effects." M. Sc. Thesis, Universität Rostock, 2018.

[5] Janßen CF, Mierke D, Überrück M, Gralher S, Rung T. „Validation of the GPU-accelerated CFD solver ELBE for free surface flow problems in civil and environmental engineering“, in: Computation 3 (3): 354-385.

[6] Mierke D, Janßen CF, Rung T. “An efficient algorithm for the calculation of subgrid distances for higher-order LBM boundary conditions in a GPU simulation environment”, in: Computers & Mathematics with Applications (article in press), 2018.

[7] Open Dynamics Engine. Online: https://www.ode.org/

[8] Mierke D, Janßen CF, Rung T. „GPU-Accelerated Large-Eddy Simulation of Ship-Ice Interactions“, in: Proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE): 850–861, 2015.

[9] Mierke D, Gehrke M, Janßen CF, Rung T. „Validation of a GPU-accelerated fully viscous numerical ice tank“, talk: VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE), 2017.

[10] Janßen CF, 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“, in: Computers & Fluids 155: 22-32.

[11] Hess, David E., Nigon, Richard T., Bedel, John W. „Dynamometer Calibration and Usage“, Report ADA386680. NAVAL SURFACE WARFARE CENTER CARDEROCK, 09/2000.

[12] Morrow, J. D., Khosla, P. „The Shape from Motion Approach to Rapid and Precise Force/Torque Sensor Calibration“, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,Vol. 119, Issue 2, p. 229-235, 06/1997.

[13] Cursi, F., Malzahn, J., Tsagarakis, N., Caldwell, D. „An online interactive Method for guided Calibration of multi-dimensional Force/Torque Transducers“, Conference Paper of 17th International Conference on Humanoid Robotics, Birmingham UK, 11/2017.

SMART PUMP –
ENTWICKLUNG EINER ROBUSTEN UND INTELLIGENTEN HYDRAULISCHEN VERSORGUNGSEINHEIT FÜR ELEKTRONISCH GEREGELTE ZWEITAKT-SCHIFFSDIESELMOTOREN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX382A, B

DIPL.-ING. SEBASTIAN SCHMATZ	Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG
M.SC. AHMED SHORBAGY	IFD, Technische Universität Dresden
M.SC. ROMAN IVANTYSYN	IFD, Technische Universität Dresden
ANDERS HILDINGSON	Parker Hannifin Manufacturing Sweden AB
DIPL.-ING (FH) NICO LOITSCH	Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG
PROF. DR. ING. JÜRGEN WEBER	IFD, Technische Universität Dresden

MOTIVATION

Mega-Yachten-Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit im Schiffbau in Deutschland sind wichtige Faktoren zur Gewährleistung der Zukunftsfähigkeit dieser Branche und stellen einen wesentlichen Teil der globalen Herausforderungen dar. Weiterhin ist die Senkung der Emissionen im Teillastbetrieb von großer Bedeutung mit der langfristigen Vision für ein Nullemissionsschiff.

Die separate Steuerung der Auslassventile sowie die Treibstoffeinspritzung bei modernen Zweitakt-Schiffsdieselmotoren über eine hydraulische Hochdruckversorgungseinheit (HPS–hydraulic pressure supply) war dabei ein wichtiger Meilenstein der letzten Jahre. Die Hauptkomponenten stellen hierbei zentral geregelte Axialkolbenpumpen dar. Beim Stand der Technik übernimmt die zentrale Motorsteuerung die Aufgabe der Regelung dieser Pumpen, wodurch die Steuerung stark ausgelastet und das Risiko von Störungen im Betrieb vergleichsweise hoch ist.

Des Weiteren ist die Lebensdauer der Hydraulikversorgung maßgeblich von den eingesetzten Hydraulikpumpen, welche einen unterbrechungsfreien Betrieb dieser Versorgungseinheit von 5 Jahren gewährleisten müssen, abhängig. Lange Wartungsintervalle bei gleichzeitig geringer Ausfallwahrscheinlichkeit sind wichtige Faktoren für ein wirtschaftliches Betreiben dieser Schiffsdieselmotoren. Hierbei werden die Pumpen hohen Temperaturen, starken Vibrationen sowie aus dem Betrieb resultierenden anspruchsvollen Lastfällen unterzogen.

ZIEL

Ziel des Verbundprojektes „Smart Pump“ ist die Entwicklung einer robusten und zuverlässigen hydraulischen Versorgungseinheit (HPS – hydraulic pressure supply) mit dezentraler Steuerung für den Einsatz in langsam laufenden Zweitakt-Schiffsdieselmotoren mit variablem Ventiltrieb. Neben komponentenspezifischen Aspekten soll eine Betrachtung der hydraulischen Versorgungseinheit und ihrer Ansteuerung im Kontext des gesamten Ventiltriebs erfolgen, um die Funktionalität der HPS zu verbessern und die Effizienz und Präzision im Betrieb zu steigern.

Für eine deutlich höhere Robustheit der hydraulischen Regelpumpe gegenüber dem Stand der Technik sind die einzelnen Komponenten der zu entwickelnden Pumpe separat auf Ihre Festigkeit und Langlebigkeit hin zu untersuchen und auf Basis der Ergebnisse anzupassen bzw. neu zu konstruieren. Ziel ist eine Lebensdauererwartung von mindestens 32.000 Betriebsstunden ohne Unterbrechung.

Neben der Entwicklung einer robusteren Pumpe ist es notwendig die erhöhte Lebensdauer in Tests nachzuweisen. Hierfür soll ein spezieller Qualifikationstest vom Verbundpartner TU-Dresden erarbeitet werden.

Ein wesentliches Projektziel ist die Schaffung einer dezentralen Steuerungsarchitektur für die Hydraulikversorgung des Ventiltriebs und der Einspritzung direkt an der Regelpumpe. Des Weiteren sollen ein Ventil und ein Parametersatz für alle Baugrößen verwendet werden, um Austauschbarkeit untereinander zu gewährleisten.

„Smart Pump“ hat den Anspruch einer Systemlösung, welche direkt für den Einsatz im Schiffsdieselmotor unter Berücksichtigung auftretender Lastfälle entwickelt wird. Erst durch eine optimale Integration als System kann die neue Lösung signifikante Vorteile gegenüber aktuell auf dem Markt verfügbaren Lösungen erzielen.

VORGEHENSWEISE

Das Förderprojekt ist in 11 Arbeitspakete unterteilt. In Abbildung 1 wird neben der zeitlichen Abfolge und Dauer der einzelnen Projekte zudem die Interaktion zwischen den Arbeitspaketen dargestellt. Abschließend soll in Feldtests auf einem Schiff die Funktion, Sicherheit, Systemintegration und Lebensdauer überprüft werden.

Entsprechend des Entwicklungsprozesses wird zunächst ein Lastenheft für die kritischen Komponenten erstellt. Hierzu zählen Bauteile wie die Verstelleinheit, die Rotationsgruppe, das Schrägscheibenlager und die Anschlussplatte. Dieses wird mit dem Pflichtenheft verglichen und die notwendigen primären sowie sekundären Entwicklungsziele formuliert.

Im Rahmen des Verbundprojektes sollen insgesamt vier unterschiedliche Baugrößen bei acht verschiedenen Verdrängungsvolumina zwischen 40 ccm und 360 ccm entwickelt werden. Begonnen wird mit der Baugröße 4 (Q=125-180cc/rev), anschließend werden die Größen parallel hoch- und runterskaliert, siehe Abbildung 2.

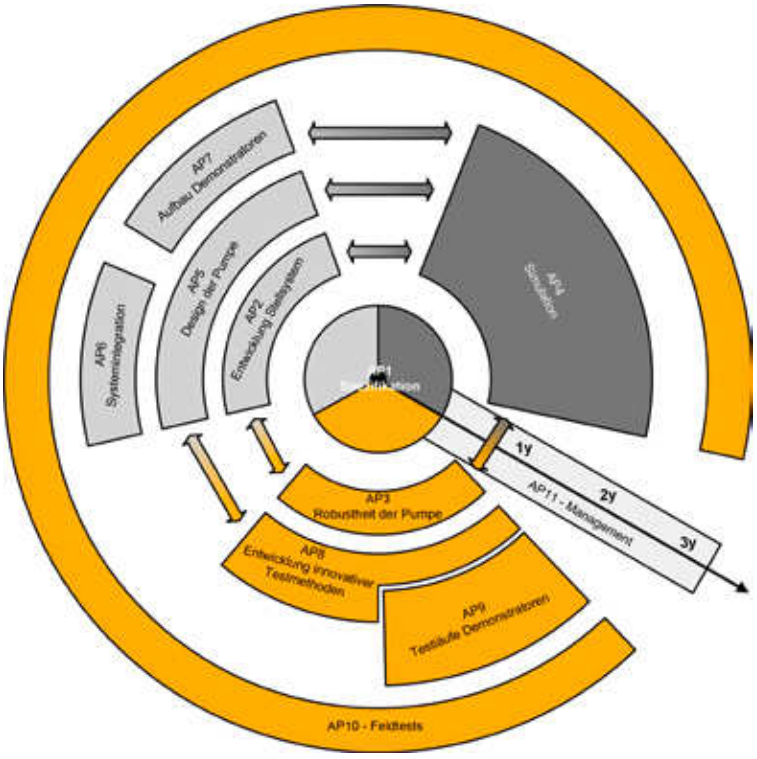


Abb. 1: Interaktion der Arbeitspakete

Abb. 2: Pumpen 40cc-360cc Verdrängungsvolumen

Zur verbesserten Regelung wird eine dezentrale Steuerung der Regelpumpe für die Hydraulikversorgung entwickelt. Der angestrebte Lösungsansatz verfolgt die Entwicklung eines geschlossenen Regelkreises direkt an der Pumpe, um die Schwenkregelung der Pumpe zur Änderung des Förderstroms lokal vorzunehmen.

ENTWICKLUNG DES STELLSYSTEMS

Anhand zu definierender Kriterien hinsichtlich Funktionalität, Dynamik sowie Stabilität werden verschiedene existente Stellsysteme auf ihre Eigenschaften und Anforderungen hin untersucht. Im Fokus stehen auftretende Drücke, Schwenkdynamik, Geometrien der Kolben und Stellflächen. Als Resultat der Analysen ergibt sich eine Liste aus drei geeigneten Stellsystemen, die in Abbildung 3 aufgeführt sind. Eine weitere Anforderung ist, dass das gewählte Stellsystem der neuen Pumpe möglichst nur geringe Veränderungen gegenüber existierenden Varianten aufweist, um Entwicklungszeit und spätere Kosten zu minimieren. Immer unter der Voraussetzung der Erfüllung der geforderten Spezifikationen.

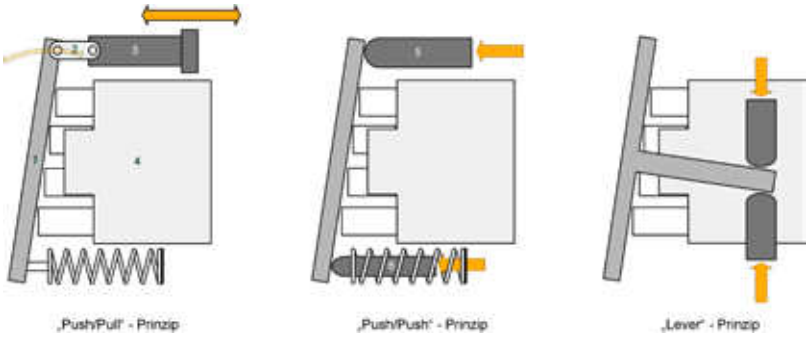


Abb. 3: Vergleich Stellsysteme

Das "Lever-Prinzip" (siehe Abbildung 3 ganz rechts) fiel somit aus den Betrachtungen heraus. Eine Implementierung hätte sehr viel Konstruktionsaufwand zur Folge gehabt. Beim „Push/Pull"-Prinzip wird die Schrägscheibe durch einen doppeltwirkenden Stellkolben bewegt. Dieser kann aufgrund des Kettenglieds Zug- und Druckkräfte auf die Schrägscheibe übertragen. Da sich der Verbindungspunkt des Kettenglieds in der Schrägscheibe entlang einer Kreisbahn bewegt und die Stellkolbenachse konstant bleibt, wird das Kettenglied beim Schwenken nach oben bzw. nach unten ausgelenkt. Arbeitet die Pumpe dann im 2ten Quadranten, erhöhen sich die radialen Kräfte auf den Stellkolben selbst bei optimierter Stellkolbenposition etwa um den Faktor 3,4 (siehe Abbildung 4). Damit erhöhen sich auch die axialen Kräfte auf das Kettenglied um etwa 27%.

Abb. 4: Querkraft am Stellkolben (Push/Pull-Prinzip)

Neben den konstruktiven Aspekten werden die verschiedenen Stellsysteme durch die erarbeiteten Anforderungen in einer PUGH-Matrix miteinander verglichen [1]. Hierbei werden die einzelnen Kriterien gewichtet und innerhalb der Konzepte bewertet. Folgende Kriterien fließen in die Bewertung ein:

- Erfüllung der Anforderungen des Lastenheftes
- Steuer- und Regelbarkeit
- Möglichkeit der Umsetzbarkeit einer hydrostatischen Entlastung der Schrägscheibe
- Umfang der Änderungen an bestehenden Konzepten
- Abzuschätzende Entwicklungszeit und Ressourcen
- Herstellbarkeit der neuen Teile
- Montagekonzept
- Risikoanalyse bezüglich technisch komplizierter Teile und gegebenenfalls neuer Technologien
- Kostenabschätzung und Möglichkeit der Einbindung in bestehende Prozesse

Die Auswertung der PUGH-Matrix zeigte, dass das „Push/Push"-Prinzip zu favorisieren und am geeignetsten zur Erfüllung des Lastenheftes sowie im Einklang mit bestehenden Prozessen ist.

DESIGN DER PUMPE

Wie zuvor erwähnt, wird mit der Entwicklung der Baugröße 4 begonnen. Wie im Abschnitt "Entwicklung des Stellsystems" beschrieben, wurde das "push/push Prinzip" gewählt, welches nun konkret ausgelegt werden soll. Damit die Pumpe das notwendige Fördervolumen erreicht, wird der maximale Schwenkwinkel α errechnet. Daraus wiederum erfolgt die Ermittlung des Stellkolbenweges s_{SK}, mit Hilfe dessen die Längen der Stellkolben und Laufbuchsen festgelegt werden können. Für die Ermittlung des kleinsten Stellkolbendurchmessers wird zunächst das Kippmoment M_x der Schrägschebie benötigt, da jederzeit ein kontrolliertes Positionieren der Schrägscheibe gewährleistet sein muss.

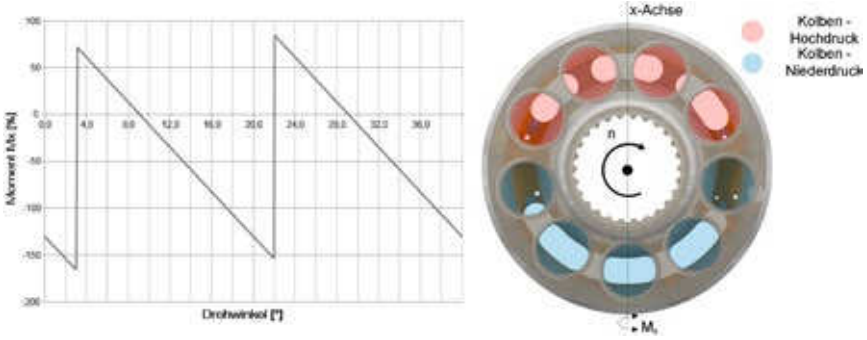


Abb. 5: Moment M_x

Das Moment M_x entsteht durch den sich ändernden senkrechten Abstand der Kolbenbohrungen zur x-Achse, siehe Abbildung 5. Hierbei haben die unter Hochdruck befind-

lichen Kolben einen wesentlich größeren Einfluss. Im rechten Bild sind vier Kolben druckbelastet, wobei aufgrund der senkrechten Abstände der Kolbenmittelpunkte zur x-Achse das Moment M_x nahezu Null ist. In Folge der Rotation der Trommel ergibt sich das dargestellte Sägezahnmuster. Die fast senkrechten Flanken entstehen durch den Wechsel von vier auf fünf und umgekehrt druckbelastete Kolben.

Im Hinblick auf die in der hydraulischen Versorgungseinheit verwendeten Proportional-Ventile gilt es, deren Verstärkungsfaktoren im Regelbetrieb bei der Auslegung der Stellkolben zu berücksichtigen. Besonders das Stellkolbenverhältnis hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Zusammenspiel Proportional-Ventil › Pumpe. Folgende Eigenschaften der Pumpe werden durch das Stellsystem beeinflusst:

› Schwenkzeiten
› Stabilität des Pumpe-Regler-Systems
› Druckverhältnis von „großem" zu „kleinem" Stellkolben
› Abstimmung der PID-Parameter im Ventil

Die umfassende Systembetrachtung ermöglichte eine zielgerichtete Auslegung und Abstimmung des Pumpe-Regler-Systems. Durch den Einsatz der „Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse" (FMEA) während der Design-Phase konnten kritische Risiko-Faktoren identifiziert, analysiert und eliminiert werden. Dieser analytische Ansatz dient dazu, mögliche Störfälle, ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Signifikanz ihrer Effekte abzubilden und den folgenden Arbeitsschritten in diesem Arbeitspaket als Arbeitsgrundlage zur Verfügung zu stellen.

In Abbildung 6 ist das fertige Stellsystem der Baugröße 4 dargestellt. Der Schrägscheibenverbinder (1), bestehend aus hellgrauem Stahlstück und Messingschuh, überträgt die Stellkräfte auf die Schrägscheibe, welcher die translatorische Bewegung der Stellkolben in eine rotatorische umwandelt. Der untere Schrägscheibenverbinder leitet außerdem unter Hochdruck befindliches Öl in die Schrägscheibe für deren hydrostatische Entlastung. Der kleinere Stellkolben (5) hat hierfür eine durchgehende Bohrung und wird durch die Laufbuchse (6) geführt. Diese dient ebenfalls der Rückstellfeder als Führung. Über die Einstellspindeln (4) und (8) können die Endanschläge bzw. das maximale Fördervolumen der jeweiligen Drehrichtung eingestellt werden. Der größere Stellkolben (2) fungiert zudem als Tastschräge für den Sensor, welcher dem Regelventil bzw. Controller den aktuellen Schwenkwinkel meldet.

ROBUSTHEIT DER PUMPE

In die Untersuchungen zur Robustheit der Pumpe fließen die Erfahrungen aus der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb von Hydraulikpumpen bei der Firma Parker Hannifin sowie insbesondere des Stellsystems in Axialkolbenpumpen ein. Die Validierung bestehender Designs erfolgt mittels „Failure Mode and Effect Analysis" (FMEA) für die Einzelteile, Funktionsgruppen und letztlich der gesamten Pumpe. Anhand dieser Ergebnisse können Entwicklungsziele für die Komponenten in Hinblick auf Design, Qualität und Lebensdauer definiert werden.

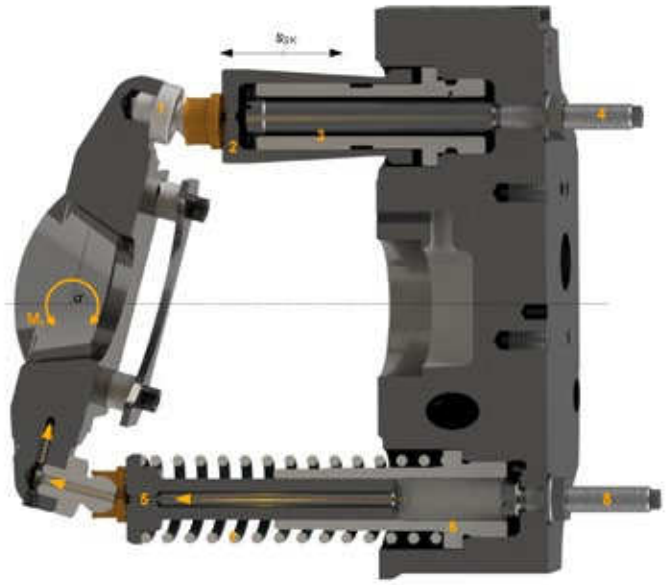


Abb. 6: Finales Stellsystem der Baugröße 4

Als besonders kritisch in Bezug auf die Lebensdauer wurde das Schwenklager identifiziert. Dieses besteht aus einer im Gehäuse befindlichen Lageraufnahme, den Lagerschalen und der Schrägscheibe, siehe Abbildung 7. Die entstehenden Kräfte am Schwenklager setzen sich aus den Kolbenkräften und den Stellkräften zusammen. Bei einer Baugröße 4 mit 180ccm/U liegen diese bei 450bar bei ca. 100kN. Aufgrund dieser hohen Belastung wird die Schrägscheibe hydrostatisch entlastet. Hierbei erzeugen in Schrägscheibe befindliche, durch Hochdrucköl gefüllte Taschen eine Gegenkraft, die die Hertz'sche Pressung zwischen Schrägscheibe und Lagerschale verringert. Die Auslegung der hydrostatischen Entlastung erfolgt unter Zuhilfenahme der Finiten-Element-Methode (FEM). Somit können Verformungen und Spannung abgeschätzt werden.

Abb. 7: Lagerschalen, Stellsystem, Rotationsgruppe, Steuerscheibe und Anschlussplatte (von links)

Als Aufnahme der Stellkolben dient die Anschlussplatte. Weitere Funktionen der Anschlussplatte sind:

- Anschluss der hydraulischen Verbindungen wie Druckleitung, Saugleitung sowie externes Steueröl
- Aufnahme der Kolbenkräfte und Weiterleitung ins Gehäuse
- Bereitstellen einer möglichst verwindungssteifen Oberfläche für die Steuerscheibe
- Beherbergen des Vorkompressionsvolumens durch Druckpulsationsverminderung
- Anschluss des Regelventils
- Anschluss des Nachsaugblocks

Da große Bereiche der Anschlussplatte durch Hochdruck belastet sind, wurde diese ausführlich mittels FEM simuliert. Hierbei ist zu beachten, dass die Wahl der Randbedingungen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Kritische Bereiche (gelb) sind die Hochdrucknieren, das Vorkompressionsvolumen und die Stellkolbenbohrungen, siehe Abbildung 8.

Abb. 8: FEM-Analyse der Anschlussplatte

Die Dauerfestigkeit der Anschlussplatten wird durch Pulsationstests geprüft. Hierbei werden zwei Anschlussplatten gegeneinander auf eine Platte geschraubt. Diese dichtet verschiedene Hochdruckbereiche zueinander mittels O-Ringe ab, um im Falle einer Leckage den Defekt leichter zu finden. Die Versuchsobjekte, siehe Abbildung 9, werden mit einer Lastwechselfrequenz von 1Hz zwischen 0bar - 450bar belastet. Der Test gilt als bestanden, wenn 3 Millionen Zyklen rissfrei erreicht sind.

Abb. 9: Pulsationstest Anschlussplatten inklusive Nachsaugblock

Durch den erweiterten Betriebsbereich von +100% bis -100% ist es notwendig, die Steuerscheibe neu auszulegen. Dies erfolgt durch einen iterativen Prozess, in dem die Öffnungs- und Schließwinkel der Saug- und Drucknieren sowie Übergangsnuten/Kerben und Bohrungen festgelegt werden. Das Design hat maßgeblich Einfluss auf:

- die entstehenden Druckpulsationen im Nieder- bzw. Hochdruckanschluss,
- Selbstsaugdrehzahl der Pumpe,
- Kavitationsneigung bei Umsteuervorgängen,
- Pumpeneffizienz,
- Erosion im Bereich der Steuerscheibenoberfläche bzw. Kolbentrommelnieren.

Die Selbsaugdrehzahl ist die Grenzdrehzahl einer Pumpe bei einem definierten Eingangsdruck, bei welcher die Pumpe gerade noch nicht kavitiert. Wird die Pumpe längere Zeit über der Selbstsaugdrehzahl betrieben, so kann diese dauerhaft Schaden nehmen. Für die Auslegung der Steuerscheibe ist die Verwendung von numerischen Strömungssimulationen (CFD) unerlässlich. In Abbildung 10 ist die Umlenkung des Ölstrahls beim Umsteuervorgang von Niederdruck auf Hochdruck dargestellt. Durch das Einbringen einer zusätzlichen Bohrung wurde der Ölstrahl in den mittleren Bereich der Kolbenbohrung abgelenkt, wodurch die Erosion an der Kolbenwand stark minimiert werden konnte.

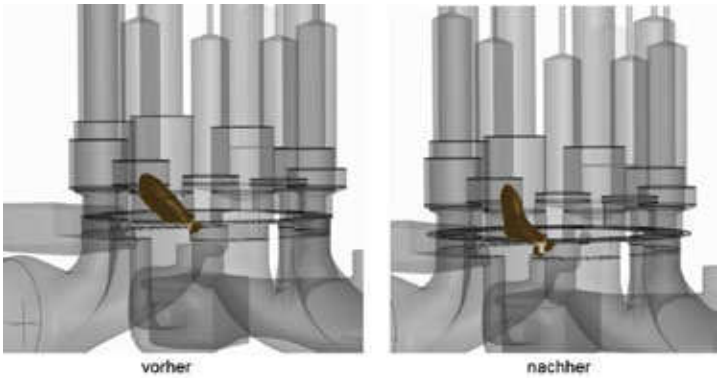


Abb. 10: Ölstrahlumlenkung im Umsteuerbereich

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Auslegung der Steuerscheibe immer ein Kompromiss über alle Betriebspunkte ist, da die Umsteuervorgänge nicht nur von der Drehzahl, sondern auch vom Druck und Schwenkwinkel abhängen.

SYSTEMINTEGRATION

Die „Smart Pump" hat den Anspruch einer Systemlösung, welche direkt für diesen Einsatz unter Berücksichtigung auftretender Lastfälle entwickelt wird. Erst eine umfassende Systembetrachtung ermöglicht eine zielgerichtete Auslegung und Abstimmung des Systems. Hierfür wird zur Datenerhebung ein Vergleichssystem auf Basis des aktuell verwendeten

MPC–Multi Purpose Controllers und des Standardregelventils zur zentralen Steuerung der Pumpe aufgebaut. Der MPC operiert dabei mit den Standardparametern und gibt einen definierten Lastzyklus vor. Die Pumpe ist nun so abzustimmen, dass die Schwenkzeiten innerhalb eines vorgegebenen Bereichs liegen, das Einregelverhalten nur geringe Überschwinger ausweist und insgesamt das System stabil ist. Der Grad der Stabilität des Systems kann durch Austesten der Grenzen des Proportionalanteils des PID-Reglers bestimmt werden. Ergibt sich dabei ein sehr großer nutzbarer Bereich um den Standardwert, so gilt das System als sehr stabil und robust gegen Störgrößen. In Abbildung 11 ist der definierte Lastzyklus, welcher aus Sprungantworten zwischen 10% und 100% des Schwenkwinkels besteht, dargestellt.

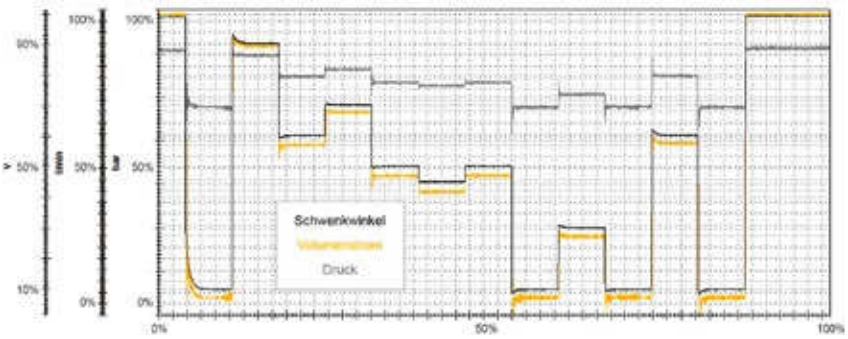


Abb. 11: Definierter Lastzyklus für die Verstellpumpe

Die Ermittlung dieser Messkurven erfolgte mit drei Regelventilen mit unterschiedlicher Schiebergeometrie (12l/min, 25l/min, 40l/min), weshalb sich unterschiedliche Schwenkzeiten ergaben. Mit der Wahl des kleinsten Schieberquerschnitts konnten Schwenkzeiten für alle Baugrößen im geforderten Bereich erzielt werden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: erforderliche Schwenkzeiten pro Baugröße

Baugröße	2 – 46cc	3 – 92cc	4 – 180cc	6 – 360cc
Schwenkzeit [ms]	40	60	90	120

INNOVATIVE TESTMETHODEN

Die Überprüfung der Lebensdauer hydraulischer Verdrängereinheiten über einen realen Zeitraum ist wirtschaftlich nicht sinnvoll und wird aufgrund dessen heute durch Überlasttests durchgeführt. Es ist jedoch ungeklärt, ob diese Art von Tests repräsentativ ist und verlässliche Aussagen liefert. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes ein beschleunigter Lebensdauertestansatz durch das IFD der TU Dresden entwickelt, um die gewünschte Lebensdauer von 32.000 Betriebsstunden zu erreichen. Dieser ist in der Lage, die Pumpe in 1100 h auf ihre Lebenszeit zu testen. Dabei basieren die Tests auf statistischen Analysen und empirischen Daten. Hier spielt die Stichprobengröße eine große Rolle, deshalb wurden insgesamt drei Lebensdauertests für jede Pumpenbaugröße durchgeführt, um die statistischen Verteilungen zu berücksichtigen [2].

Bei dem ersten Test der Pumpenbaugröße BG4 zeigte der Versuchsträger nach 860 h ein abnormales Verhalten an. Im System konnte der notwendige Druck nicht mehr aufgebaut werden. Während der Inspektion konnte einen Riss in der Zylindertrommel festgestellt werden. Mit den Erfahrungen aus den ersten Test wurden sowohl das Triebwerk der BG4 als auch die der anderen Baugrößen überprüft und bei Bedarf optimiert. Damit konnte sowohl für die Baugröße 4 als auch die anderen Baugrößen ein Bestehen der Qualifikationstests ermöglicht werden. Darauffolgend wurden zwei weitere Lebensdauertests mit gehärteter Zylindertrommel erfolgreich durchgeführt. Abbildung 12 zeigt schematisch die überstandenen Testzeiten der einzelnen Lebensdauertests.

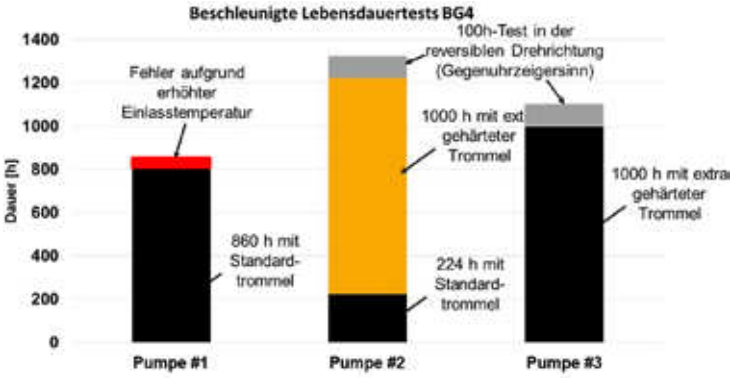


Abb. 12: Die überstandenen Testzeiten der einzelnen Lebensdauertests der Baugröße BG4

Um Informationen über den Pumpenverschleiß mit fortschreitender Lebensdauer zu erhalten, ohne aufwendige und kostenintensive Sensorik für den Feldeinsatz bereitstellen zu müssen, wurde ein Condition-Monitoring-Konzept für die beschleunigten Lebensdauertests erarbeitet. Ziel war es dabei, mit Hilfe bereits auf dem Prüfstand verfügbarer Sensoren Schäden vorherzusagen. Hierfür wurde eine Analyse mit Hilfe des Fast-Fourier-Transformationen (FFT) – Algorithmus nach Tukey und Cooley verwendet. Dieser nutzt die Symmetrieeigenschaften eines Zeitsignals aus, um die Rechenschritte erheblich zu reduzieren [3].

In Test #1 konnte man, kurz bevor es zum Ausfall der Pumpe kam, starke Veränderungen im Frequenzbereich erkennen, siehe Abbildung 13. Das Schadensmuster dieses Tests wurde als Referenz benutzt, um die Frequenzverläufe zukünftiger Tests auf Schäden zu beurteilen. Aus dem Verlauf der Frequenz wird ersichtlich, dass das Magnitudenlevel des Zeitintervalls während des Schadens stark gestiegen ist.

Dieser Ansatz zeigt vielversprechende Potentiale zur Überwachung des Pumpenzustands und wurde bei den Tests der anderen Baugrößen weiterverfolgt. Allerdings ist eine Schadensmustererkennung nur mit einer breiten Basis an Messdaten erkennbar. Dies erfordert die Auswertung mehrerer Lebensdauertests derselben Baugröße.

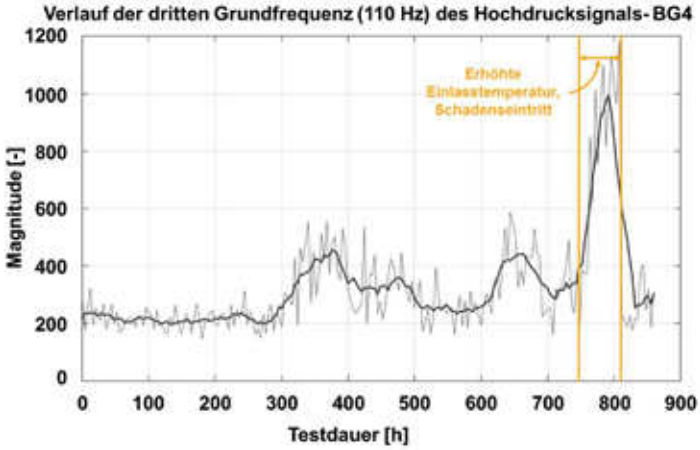


Abb. 13: Entwicklung der dritten Grundfrequenz über die gesamte Testdauer

GLÄSERNE PUMPE

Die „gläserne Pumpe“ bildet ein zentrales Glied im Teilvorhaben des IFD der TU Dresden. Diese ist ein innovativer Prüfstand, in dem die Dichtspalte in der Rotationsgruppe einer Axialkolbenpumpe untersucht und visualisiert werden. Bei dem Ansatz werden die experimentellen Untersuchungen mit Spaltsimulationen kombiniert, um ein besseres Verständnis für die Spaltströmungen liefern zu können. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse ist es möglich bessere Effizienz- und Lebensdauervorhersagen für Kolben-Buchse, Trommel-Steuerscheibe und Gleitschuh-Schrägscheibe-Paarungen zu treffen.

Die Schrägscheibe der Versuchspumpe BG3 wurde mit zahlreichen Sensoren zur Erfassung von Spalthöhen und Temperaturfeldern ausgestattet. Diese sollen zum einem die Simulation validieren und zum anderen Aussagen zu dynamischen und anderen lebensdauerkritischen Aspekten liefern. Zahlreiche Untersuchungen wurden mit dem Versuchsträger gemacht, vergleiche hierzu [4], [5], [6], [7].

Die Spaltsimulationen wurden mit Programm Caspar FSTI für die Baugröße 3 durchgeführt. In diesem folgenden Abschnitt wird ein Beispiel für die Validierung der Simulationsergebnisse für den Gleitschuh vorgestellt.

Abbildung 14 zeigt den Vergleich zwischen Messung und Simulation für den inneren Totpunkt (IDC – φ = 180°), den Wechsel von Hoch- auf Niederdruck. Im unteren linken Bereich ist der Messbereich der Spaltsensoren graphisch gezeigt. Der Gleitschuh (in Gelb) rotiert entgegen dem Uhrzeigersinn. Die entsprechenden Signale der Spaltsensoren (1-blau, 2-rot und 3-grün) sind unten rechts gezeigt. Der Spaltsensor gibt erst ein brauchbares Signal aus, wenn dessen gesamter Sensorkopf mit dem Messobjekt (Gleitschuh) bedeckt ist. Die Sensoren 1 und 3 haben aufgrund ihrer Platzierung einen längeren Messbereich. Sensor 2 ist mittig auf dem Rotationskreis installiert. Im oberen rechten Bereich der Abbildung ist das entsprechende Simulationsergebnis zu sehen. Sowohl die Simulation als

auch die Messung zeigen ein ähnliches Bild, eine recht konstante Spalthöhe mit einer leichten Neigung nach außen. Die 3D-Sicht der Fluiddicke beim inneren Totpunkt ist zur Visualisierung oben links gezeigt. Hier sind auch die jeweiligen Sensorpositionen bei diesem Winkel illustriert.

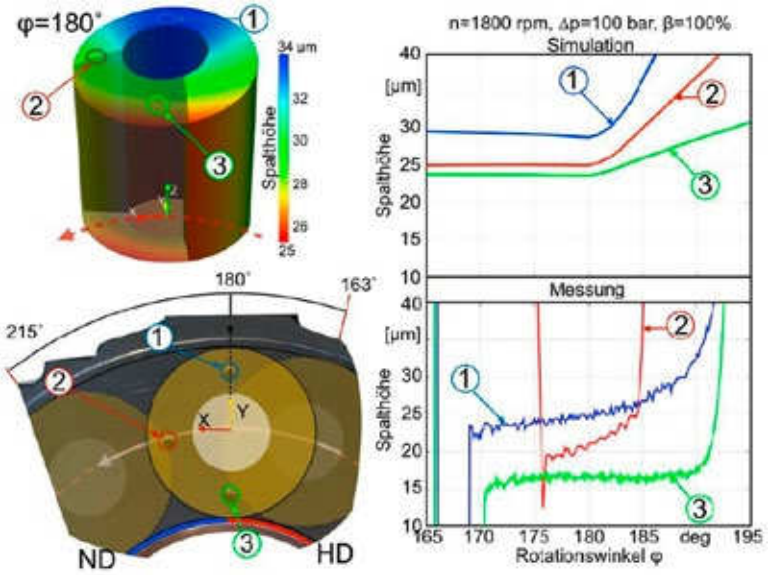


Abb. 14: Vergleich von Messung und Simulation für den inneren Totpunkt (IDC)

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung einer robusten und zuverlässigen Pumpenbaureihe für die hydraulische Versorgungseinheit mit dezentraler Steuerung für den Einsatz in langsam laufenden Zweitakt-Schiffsdieselmotoren mit variablem Ventiltrieb konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Mit dem, von der TU Dresden entwickelten, Qualifikationstest konnte die geforderte Pumpenlebensdauer von 32.000h bestätigt werden. Die dezentrale Steuerung über das Regelventil wurde ausgiebig getestet und steht zur Implementierung bereit. Somit wird das Vorhaben „Smart Pump" dem Anspruch einer Systemlösung gerecht.

DANKSAGUNG

Das Projekt Smart Pump bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Vorhabens sowie für die Betreuung durch den Projektträger Jülich. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

LITERATUR

[1] AIT Business Solutions, Design for Six Sigma Session 2, 2014.

[2] D.-S. Jung, H.-E. Kim, S.-H. Kim und E.-S. KANG, Development of accelerated life test method of hydraulic pump, Switzland: Key Engineering Materials, Vols. 326-328, pp. 1861-1864, 2006.

[3] M. Oppermann, „A new approach for failure prediction in mobile hydraulic systems," VDI Fortschritt-Berichte. Reihe 12 No. 665., Düsseldorf, Germany, 2007.

[4] R. IVANTYSYN, A. SHORBAGY und J. .. Weber, „An Approach to Visualize Lifetime Limiting Factors in the Cylinder block/Valve Plate Gap in Axial Piston Pumps," in ASEM/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Bath, United Kindom, 2017.

[5] A. Shorbagy, R. Ivantysyn und J. Weber, „An experimental approach to simultaneously measure the temperature field and fluid film thickness in the cylinder block/valve plate gap of an axial piston pump," in THMT-2018, Rio de Janeiro, Brazil, 2018.

[6] R. a. W. J. Ivantysyn, „Investigation of the Thermal Behavior in the Lubricating Gap of an Axial Piston Pump with respect to Lifetime," in 11th IFK, Aachen, Germany, 208.

[7] R. Ivantysyn und J. Weber, „"Transparent Pump"–An approach to visualize-lifetime limiting factors in axial piston pumps," in FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power, Florianopolis, Brazil, 2016.

[8] J. a. I. M. Ivantysyn, Hydrostatic pumps and motors: principles, design, performance, modelling, analysis, control and testing, New Delhi: Akademia: New Delhi, India Akad. Books Internat., 2001.

METHASHIP –
METHANOL ALS GRUNDBRENNSTOFF FÜR DIE PASSAGIER-SCHIFFFAHRT

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX378A-C

DANIEL SAHNEN	MEYER WERFT, Papenburg
GERHARD UNTIEDT	MEYER WERFT, Papenburg
ROLF NAGEL	Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, Flensburg
DIRK SCHRÖDER	Lloyd's Register EMEA, Hamburg

EINLEITUNG

Im Zuge der Verschärfung von Emissionsvorschriften und aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins sowohl bei Reedereien als auch bei Passagieren, steht die Schifffahrt vor der großen Herausforderung umweltfreundlicher und effizienter zu werden. Schon heute sehen sich die Schiffsbetreiber mit Nachrüstungskosten oder höheren Brennstoffkosten konfrontiert. Insbesondere schadstoffarmen, sauberen Kraftstoffen kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Darüber hinaus muss auch die Schifffahrt ihren Beitrag zur Reduzierung von klimaschädlichen Treibhausgasemissionen leisten und somit ist die vollständige Abkehr von fossilen Brennstoffen unausweichlich. Aus diesem Grund muss ein Kraftstoff der Zukunft die Anforderung erfüllen in großen Mengen regenerativ hergestellt werden zu können.

Zur Erreichung beider Ziele rückt die Verwendung der Stoffgruppe der Alkohole als Kraftstoff in der Schifffahrt immer stärker in den Fokus der Betrachtungen. Eine ganze Reihe von Vorteilen resultiert daraus, dass sie bei Umgebungsbedingungen flüssig sind. Unter anderem können sie aufgrund dieser Eigenschaft an Bord von Schiffen, bei denen die Verfügbarkeit von Platz immer sehr beschränkt ist, besonders raumsparend und einfach – also ohne anspruchsvolle Technik – gelagert werden.

Insbesondere der einfachste Alkohol – Methanol – ist für die Schifffahrt geradezu prädestiniert. Er verbrennt besonders sauber, weist eine ausgezeichnete Umweltverträglichkeit auf, lässt sich einfach und sicher handhaben und ist als Basisstoff der Industrie bereits heute weltweit verfügbar. Außerdem besitzt Methanol die Eigenschaft über verschiedene Pfade regenerativ hergestellt werden zu können.

Die Eignung von Methanol für die Schiffsanwendung, mit Fokus auf Passagierschiffe, die damit verbundene Auslegung von Bordsystemen, Fragen der Versorgungs-Infrastruktur sowie Aspekte der regenerativen Herstellung stehen im Fokus der Untersuchungen von MethaShip. Dieser Artikel verschafft einen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt und zeigt auf, warum Methanol einer der vielversprechendsten Kraftstoffe für Schiffe ist – besonders im Hinblick auf eine vollständig regenerative Zukunft.

PROJEKTKONSORTIUM

Das Projektkonsortium des Verbundforschungsprojektes MethaShip setzt sich zusammen aus den beiden deutschen Schiffbauwerften MEYER WERFT (Papenburg) und Flensburger Schiffbau-Gesellschaft sowie der Klassifikationsgesellschaft Lloyd's Register EMEA (Hamburg). Die MEYER WERFT ist auf den Bau von großen Kreuzfahrtschiffen spezialisiert und beliefert Kreuzfahrtunternehmen weltweit mit den Schiffen der neuesten Generation. Ebenfalls technologisch führend und mit einer weltweiten Klientel ist die Flensburger Schiffbau-Gesellschaft im Bau von Fähren, die zum gleichzeitigen Transport von Passagieren und Kraftfahrzeugen dienen, sog. RoPax-Fähren. Beide Schifftypen decken einen großen Teil der seegehenden Passagierschifffahrt ab und sind beispielhaft in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1: Kreuzfahrtschiff Disney Fantasy und RoPax-Fähre British Columbia als Beispiele für Passagierschiffe

Lloyd's Register ist ein weltweit vertretenes Unternehmen zur Klassifikation von Schiffen und eine unabhängige Risikomanagement-Organisation, die über große Erfahrung bei der Einführung und Bewertung innovativer Technologie in der Schifffahrt verfügt.

Unterstützt wird das Vorhaben durch die beiden Motorenhersteller Caterpillar Motoren (Kiel) und MAN Diesel & Turbo (Augsburg) als assoziierte Partner. Sie sind Hersteller von mittelschnelllaufenden 4-Takt-Großmotoren für das Segment der Passagierschifffahrt und verfügen über große Erfahrung bei der Entwicklung und Anpassung von Motoren an verschiedene Kraftstoffe und Anwendungen. Als weiterer assoziierter Partner rundet das Methanol Produktions- und Vertriebsunternehmen HELM AG (Hamburg) das Projektkonsortium ab. Die Helm AG verfügt über das notwendige Wissen, Kontakte sowie Marktkenntnisse in diesem Bereich. Die Gesamtleitung und Koordination des Verbundvorhabens erfolgt durch die MEYER WERFT.

VORGEHENSWEISE

Im Forschungsvorhaben MethaShip wurde die Eignung von Methanol als Grundbrennstoff für die seegehende Passagierschifffahrt untersucht und bewertet. Für die systematische Bearbeitung der relevanten Aspekte gliederte sich das Projekt in aufeinander abgestimmte Themenschwerpunkte (siehe Abb. 2).

In einem zentralen Arbeitspaket unter der Leitung der MEYER WERFT erfolgen die Entwicklung der Schiffssystem- und Energiekonverter-Technologien für die Verwendung von Methanol als Grundbrennstoff. Unter anderem wurden die schiffsseitigen Brennstoff-Aufbereitungs- und -Verteilungssysteme sowie die Architektur der Tanksysteme inklusive Armaturen und Sicherheitseinrichtungen entwickelt und evaluiert. Begleitend analysierte das Projekt die mögliche Nutzung der thermischen Energieströme, die der sauber verbrennende Kraftstoff Methanol offeriert.

In dem Arbeitspaket Entwicklung und Entwurf wurden die Erkenntnisse von der Systemebene in zwei technisch abgesicherte Gesamt-Schiffsentwürfe für das Kreuzfahrtschiff und die RoPax-Fähre weiterentwickelt. Alle Betrachtungen wurden vom Projektpartner Lloyd's Register begleitet und in dem zentralen Arbeitspaket „Vorschriften und Sicherheit" bewertet. Neben den Schiffsystemen und der Bord-Integration wurden Sicherheitskonzepte für die Methanol-Handhabung, Lagerung und den Betrieb von Passagierschiffen erarbeitet. Eine zentrale Bedeutung nahm dabei die Identifikation, Analyse und Bewertung von möglichen Gefahren im Rahmen von HAZID-Prozessen ein. Es wurden sämtliche Risiken und Gefahren, die mit der Verwendung von Methanol verbunden sind, analysiert und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen definiert.

Im Mittelpunkt des Arbeitspakets „Brennstoff-Infrastruktur", unter Leitung von Lloyd's Register, standen die Überprüfung der Brennstoff-Verfügbarkeit, eine Analyse des Marktpotentials und Aspekte der Abstimmung von Zulassungsvoraussetzungen mit Hafenbehörden für eine mögliche Einführung des neuen Brennstoffes in deutsche Häfen.

Das allüberspannende Arbeitspaket „Ökobilanzierung und Lebenszyklusanalyse" rückte die Nachhaltigkeitsaspekte in den Fokus der Betrachtungen. Entsprechende Methodiken wurden systematisch auf die im Vorhaben erstellten Schiffskonzepte angewendet. Insbesondere die dem eigentlichen Schiffbetrieb vorgelagerte Kraftstoffbereitstellungskette unterlag einer detaillierten Untersuchung. Unter anderem wurde die Frage beantwortet, wie und mit welcher Technologie der Kraftstoff auf lange Frist vollständig regenerativ und verantwortungsvoll zur Verfügung gestellt werden kann.

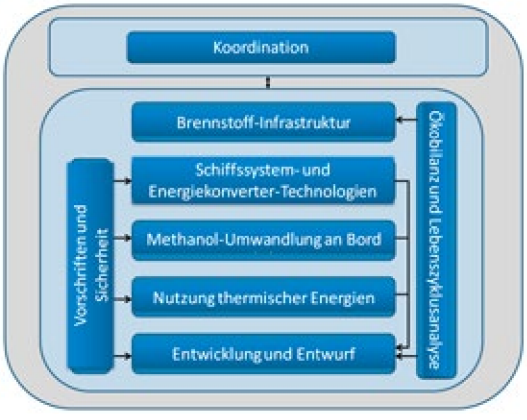


Abb. 2: Arbeitspakete und Themenschwerpunkte in MethaShip sowie deren Zusammenwirken

METHANOL ALS KRAFTSTOFF

Methanol, auch bekannt als Methyl-Alkohol, ist der einfachste Vertreter aus der Stoffgruppe der Alkohole und somit von seiner Molekülstruktur einer der einfachsten Kohlenwasserstoffe. Es handelt sich um eine farblose, wasserlösliche, biologisch abbaubare, saubere, leicht entzündliche Flüssigkeit mit der Summenformel CH_3OH.

In der Schifffahrt dominieren die fossilen Energieträger Schweröl und Marinediesel. Diese zeichnen sich durch einen Flammpunkt von mindestens 60°C aus. Der Flammpunkt ist die Temperatur, ab der sich oberhalb einer Flüssigkeitsoberfläche an Luft ein entzündliches Gemisch bildet. Historisch ist in der Seeschifffahrt die Verwendung von Kraftstoffen mit einem Flammpunkt kleiner als 60°C nicht erlaubt. Die Tendenz zu sauber verbrennenden Kraftstoffen rückt nun solche mit einem Flammpunkt unterhalb dieser Marke in den Vordergrund.

Abb. 3 zeigt eine Auflistung ausgewählter Kraftstoffeigenschaften. Seit 2017 ist die Verwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG) in der Seeschifffahrt weltweit erlaubt, das einen sehr niedrigen Flammpunkt von -188°C aufweist. Demgegenüber ist ein entscheidender Vorteil von Methanol, dessen Flammpunkt bei 11°C liegt, die sehr gute Handhabbarkeit. Denn Methanol ist im Gegensatz zu LNG (Lagertemperatur -162°C), bei Raumtemperatur flüssig und kann ohne besonderen Aufwand gelagert und transportiert werden. Das aufgeführte Benzin ist in der Seeschifffahrt nicht gebräuchlich, für den Leser jedoch in seinem Umfeld allgegenwärtig und die vergleichende Aufstellung erleichtert die Einordnung der Kraftstoffeigenschaften.

In der Tabelle grün markiert sind die sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Methanol, die mehrfach deutlich besser ausfallen als bei LNG, Diesel bzw. Benzin. Methanol wird insbesondere durch seine hohe Selbstentzündungstemperatur, eine hohe untere Explosionsgrenze und die im Vergleich zu den ölbasierten Kraftstoffen etwa viermal so hohe Verdampfungsenthalpie zu einem sehr feuersicheren Kraftstoff, was auch die Ausführungen in [1] näher erläutern.

Das wichtigste Kriterium bei dem Entwurf von Schiffen ist jedoch der auf das Volumen bezogene Heizwert. Er bestimmt, wie viel Platz für die Speicherung des Kraftstoffs vorgehalten werden muss. Hierbei schneidet Methanol um den Faktor 2,3-2,5 schlechter ab als etablierte Dieselbrennstoffe bzw. Schweröl. Auf den ersten Blick ein entscheidender Nachteil, der sich jedoch relativiert, wenn der Ort der Lagerung in die Betrachtungen einbezogen wird. Während wassergefährdende Dieselöle und insbesondere Schweröl nicht direkt an der Außenhaut gelagert werden dürfen, stellt dies bei Methanol kein Problem dar (siehe Abschnitt Umwelteigenschaften). Dadurch ergibt sich eine hohe Raumausnutzung im Bereich des Rumpfes bei Verwendung von Methanol. Noch deutlicher tritt der Aspekt der effektiven Raumausnutzung beim Vergleich zu LNG auf. Der Unterschied von 15,8 zu 22,0 MJ/l im volumetrischen Heizwert relativiert sich, wenn die Betrachtungen auf das Tanksystem erweitert werden wie Abb. 4 verdeutlicht. LNG wird üblicherweise in zylindrischen Drucktanks gelagert, noch dazu mit einer mehrere Zentimeter starken Wärmeisolierung. Außerdem muss der zylindrische Tank, sofern er im Schiffkörper untergebracht wird,

Eigenschaft	Methanol	LNG	Diesel	Benzin
Dichte [kg/m³]	790	448	850	740
Heizwert (volumenbezogen) [MJ/l]	15,8	22,0	35,6	34,6
Heizwert (gewichtsbezogen) [MJ/kg]	20	49	42,8	46,7
Flammpunkt [°C]	11	-188	52 - 96	-45
Selbstentzündungstemperatur [°C]	455	540	250	280 - 460
untere Explosionsgrenze [Vol.-%]	5,5	4,6	0,5	1,4
obere Explosionsgrenze [Vol.-%]	36	15	7,5	7,6
Wärmefreisetzung bei Feuer [kW/m²]	450	4000	1400	2500
Siedepunkt (bei 1 bar) [°C]	65	-162	170 - 350	25 - 190
Verdampfungsenthalpie [kJ/kg]	1160	511,7	250	375
Dampfdruck (bei 20°C) [bar]	0,13	gasförmig	0,004 (40°C)	0,25 - 0,45
Relative Dampfdichte (Luft=1)	1,1	0,55	6	3 - 4
Viskosität (bei 20°C) [cSt]	0,74	-	2,5 - 3,0	0,6
Wasserlöslichkeit	100%	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar

Abb. 3: Vergleichende Zusammenstellung ausgewählter Kraftstoffe

innerhalb eines rechteckigen Raumes (Tankhalteraum) positioniert werden unter Einhaltung eines vorgeschriebenen Abstands zu den Wänden.

Dies alles entfällt für Methanol. Es bedarf lediglich einer zweiten Barriere zum Schutz gegen Auslaufen in den Schiffsraum. Die Aufbewahrung geschieht bei Umgebungstemperatur und ohne Druck und in einem Tank mit optimaler Volumenausnutzung. Abb. 4 zeigt, dass Methanol und LNG in etwas das gleiche Tankraumvolumen beanspruchen. Günstiger, was die Raumausnutzung angeht, ist jedoch Methanol, da sich die Tanks nahezu beliebig in die Schiffsgeometrie integrieren lassen, LNG-Tanks hingegen benötigen einen deutlichen Sicherheitsabstand zur Außenhaut, in der Regel ein Fünftel der Schiffsbreite.

Abb. 4: Platzbedarf Kraftstofftanks an Bord für die gleiche Energiemenge. LNG-Drucktanks sind in einem Tankraum (blau) positioniert. Der effektive Volumenbedarf ist daher in etwa gleich mit Methanol, das drucklos gelagert wird.

SCHIFFSENTWURF UND INTEGRATION DER SYSTEME

Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Kreuzfahrtschiff ist in Abb. 5 dargestellt. Das Schiff ist 238 m lang, 32,2 m breit und weist eine Tonnage von knapp 63.000 GT auf. In seinen Kabinen finden 2050 Passagiere und 570 Crew-Mitglieder Platz. Die Energieversorgung an Bord wird von 4 x 9 MW Methanol-Motoren gewährleistet, die

elektrische Fahranlage weist eine Leistung von 2 x 12,5 MW auf. Zur Lagerung von 2.400 m^3 Methanol stehen sieben Methanol-Tanks zur Verfügung, die als platzsparende Strukturtanks direkt in die Schiffsstruktur integriert sind. Abb. 5 zeigt die Positionierung der grün gekennzeichneten Tanks in der Schiffsmitte sowie im hinteren Bereich. Die Draufsichten von Deck 1 und dem darunter liegenden Doppelboden (Bildmitte) verdeutlichen die Tankaufteilung und Positionierung. Besonders vorteilhaft für den Schiffsentwurf ist, dass Methanol direkt an der Außenhaut des Schiffes gelagert wird. Das verdeutlichen die Schnitte im unteren Teil der Abbildung. Die – im Hinblick auf die Wertigkeit von Raum an Bord von Schiffen – besonders wertvolle Schiffsmitte bleibt weitgehend frei von Lagertanks und steht anderen Komponenten zur Verfügung. Zusätzlich wird durch die Nutzung selbst kleinster Nischen und der Ausdehnung der Tanks bis an die Außenhaut eine optimale Raumausnutzung erzielt.

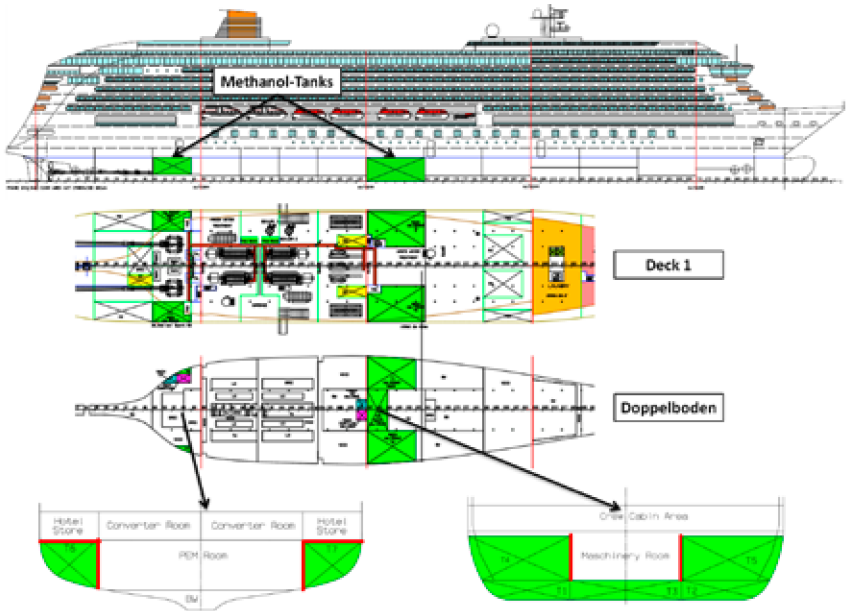


Abb. 5: Methanol-Kreuzfahrtschiff, grün gekennzeichnet sind die Methanol-Lagertanks. Die unteren Schnittbilder verdeutlichen die Positionierung im Doppelboden, an der Seite des Schiffes sowie direkt an der Außenhülle. Dies erlaubt eine optimale Raumnutzung.

Abhängig vom angrenzenden Raum sind die Lagertanks zum Schiffsinneren hin mit einer zweiten Barriere versehen, für das Auffangen und sichere Verwahren der Flüssigkeit im Fall einer Leckage. Abb. 6 illustriert auf der linken Seite das dazu entwickelte Barrieren-Konzept. Die Tanks sind mit einer Vorrichtung zur Inertisierung ausgestattet sowie einem Ventil, das die Tankatmung sicherstellt. Auf der rechten Seite von Abb. 6 wird die Anordnung von Komponenten, die zum Methanolsystem gehören, verdeutlicht. Alle Tankanschlüsse, Ventile und dazugehörige Rohrleitungen sind in gekapselten Zellen untergebracht, dem sog. Tank Connection Space (TCS). Das Bild zeigt schematisch auch das Ventilationskonzept auf, das dafür sorgt, dass im Schadensfall mit Methanol verunreinigte Bereiche sicher ventiliert werden können.

Ein wesentlicher Vorteil von Methanol ist die Einfachheit des Brennstoffsystems. Die bei Schweröl notwendige Aufbereitungsanlage entfällt komplett. Methanol kann aus dem Tank entnommen und auf direktem Wege zum Verbraucher (Motor) geleitet werden. Zwei gekapselte und redundant ausgeführte Methanol-Pumpeneinheiten (Fuel Pump Units – FPU) stellen den Kraftstoff für die Hauptmaschinen bereit. Die Auslegung und Auswahl der Komponenten erfolgt nach den Maßgaben der ATEX-Richtlinien für Explosionsschutz zur Sicherstellung eines sicheren Gesamtsystems. Die Methanol-Rohrleitungen außerhalb der FPU und TCS sind doppelwandig ausgeführt, der Zwischenraum ist mit einer Lecküberwachung versehen.

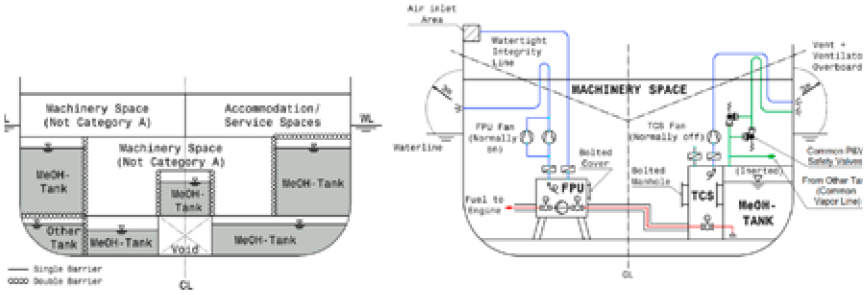


Abb. 6: Tank-Anordnung und Barrieren-Konzept (links), Anordnung von Komponenten und Ventilationskonzept (rechts)

UMWELTEIGENSCHAFTEN VON METHANOL

Die Einordnung der Gefahren von Methanol und anderer Kraftstoffe anhand des Global Harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) zeigt, dass Methanol nicht generell gefährlicher ist als andere Kraftstoffe (ausführlich im Abschlussbericht). Die Humantoxizität spielt an Bord nahezu keine Rolle, da das beschriebene Zwei-Barrieren- und Ventilations-Konzept eine Exposition für Menschen sehr unwahrscheinlich macht. Zudem war die Giftigkeit von Schweröl (das in einwandigen Systemen gelagert und gehandhabt wird) nie ein Hinderungsgrund für die Verwendung als Brennstoff.

Ein wesentlicher Vorteil von Methanol gegenüber konventionellen Kraftstoffen besteht in seiner sehr guten Umweltverträglichkeit. Diese Eigenschaft ist in einer maritimen Umgebung, in der unbeabsichtigte Freisetzungen von Kraftstoff in die Umwelt leider immer wieder auftreten können – bis hin zur Havarie des Schiffes – von zentraler Bedeutung. Im Fall einer Freisetzung von Methanol besteht so gut wie keine Gefahr für die Umwelt, da Methanol sich in Wasser sehr schnell verdünnt und in wenigen Tagen von Bakterien vollständig biologisch abgebaut wird.

Bemerkenswert ist, dass sogar die Freisetzung relativ großer Methanol-Mengen in Wasser keine bleibenden Schäden verursacht. Quantitativ lässt sich diese Eigenschaft an der LC50-Konzentration festmachen, die in Abb. 7 für verschiedene Kraftstoffe verglichen wird. Als LC50 (engl. lethal concentration, abgekürzt LC) wird die in Wasser befindliche Konzentration einer Substanz bezeichnet, die innerhalb eines definierten Zeitraums für 50 % einer

bestimmten Art von Lebewesen tödlich ist. Die hier gezeigte Darstellung gilt für Fische und der Expositionszeitraum beträgt 96 Stunden. Die dem jeweiligen Kraftstoff zugeordnete Kreisfläche entspricht dem genannten LC50-Wert. Es wird deutlich, dass die unbedenklichen Methanol-Mengen in Wasser im Vergleich zu den übrigen Kraftstoffen sehr groß sind.

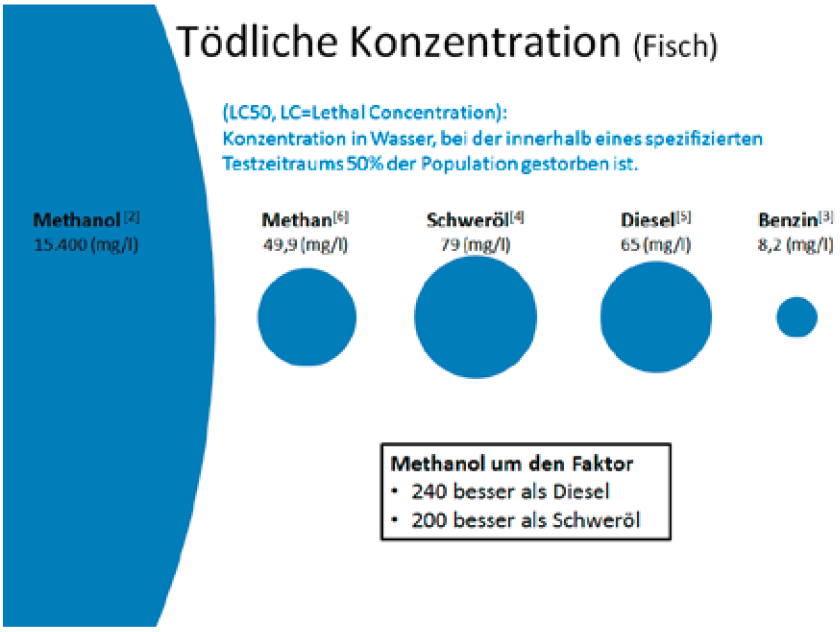


Abb. 7: Wirkung von Kraftstoffen auf Fische bei Freisetzung in Wasser. Die verträgliche Konzentration steigt mit der Größe des Kreises. Methanol ist um mehr als zwei Größenordnungen besser.

Hinzu kommt, dass Methanol in einer maritimen Umgebung durch Wind und Strömungen sehr schnell verdünnt wird und die genannten Expositionszeiträume nicht einmal annähernd erreicht werden [7]. Die daraus resultierenden Ausbreitungsmechanismen und die Folgen einer Haverie stellen Abb. 8 und Abb. 9 gegenüber. Darüber hinaus ist Methanol nicht karzinogen und weist als Stoff selbst kein Treibhausgaspotential auf.

Schweröl	Methanol
Tödlich für Vögel, Algen und Fische	Geringe Auswirkung auf die Umwelt
Entfernung von Schweröl kostet Millionen (Säuberung Strände u. Tiere, Abtragen Ölteppich)	Keine Kosten zur Entfernung von Methanol
Winde u. Wellen begünstigen die Ausbreitung des Ölteppichs	Winde und Wellen verringern die Konzentration von Methanol im Wasser rapide
Kann genetische Veränderungen bei Meerestieren verursachen	Kein Potential für genetische Veränderungen
Wird sehr langsam und nicht vollständig abgebaut (durch Bakterien, langsame Verwitterung und Verdunstung)	Wird sehr schnell und vollständig abgebaut (durch Verdunstung und Bakterien), Halbwertszeit :1-7 Tage

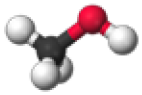


Abb. 8: Mechanismen und Auswirkungen bei der Freisetzung von Schweröl bzw. Methanol

	Unglück 1 [8]	Unglück 2 [8]	Simulation
Schiff	Erika	Tanio	-
Treibstoff	Schweröl	Schweröl	Methanol
Freigesetzte Menge	19.000 t	13.500 t	10.000 t
Betroffene Küstenlinie	400 km	200 km	-> 0
Gesamtschaden (Kosten)	914 Mio. $	-	-> 0
Säuberung	100 Mio. $	50 Mio. $	-> 0
Fischindustrie	98,3 Mio. $	k. A.	-> 0
Tourismus	400-500 Mio. $	-	-> 0
Schadenersatzforderung	120 Mio. $	17 Mio. $	-
Verendete Vögel	60.000	40.000	-> 0

Abb. 9: Folgen von Schiffsunglücken mit Schweröl-Freisetzung und der aus einer Simulationen abgeleiteten Ergebnisse für Methanol

INFRASTRUKTUR UND VERFÜGBARKEIT

Methanol wird weltweit in großem technischen Maßstab hergestellt und vorwiegend als Grundstoff in der chemischen Industrie verwendet. Aus diesem Grund ist die Verfügbarkeit von Methanol bereits heute ohne weiteres möglich. Zwar müssten die für den Betrieb von ganzen Passagierschiffen notwendigen Lagerkapazitäten zum Teil noch aufgebaut werden, jedoch ist dies aufgrund der einfachen Lagerung ohne großen Aufwand möglich. Auch ein Transport auf dem Seeweg, per Schiene oder Tanklastwagen zum Bestimmungsort stellt keine große Herausforderung dar. In Abb. 10 ist beispielhaft für Europa die Verfügbarkeit von Methanol im Umfeld bedeutender Kreuzfahrthäfen dargestellt. Das dichte Netz an verfügbaren küstennahen Standorten zeigt, dass bereits heute alle großen Kreuzfahrthäfen mit Methanol versorgt werden können. Zudem ist eine wesentliche Projekterkenntnis, dass sich existierende Lagertanks (für Schweröl, Diesel, Benzin) nach entsprechender Aufrüstung mit den notwendigen Apparaturen prinzipiell für Methanol verwenden ließen.

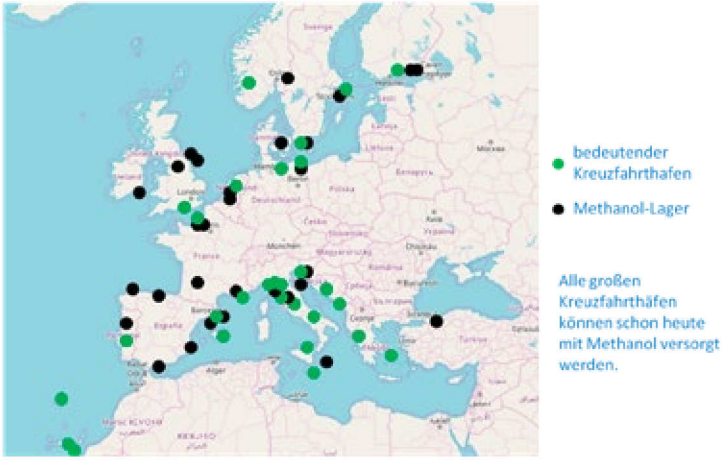


Abb. 10: Verfügbarkeit von Methanol an großen Tanklagern in Europa [Angaben Helm AG]

Darüber hinaus wurde im Projekt die Möglichkeit untersucht Methanol über etablierte wasserseitige Distributionswege bereitzustellen. Abb. 11 zeigt ein Binnenschiff zum Transport von Methanol. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ein solches Schiff nach kleineren Anpassungsmaßnahmen als Bunkerschiff – also zur Kraftstoffversorgung und wasserseitigen Betankung – verwendet lässt. Damit ist eine mögliche Bunkerflotte bereits existent.

Abb. 11: Binnenschiff für den Transport von Methanol von den Seehäfen ins Hinterland, das sich mit überschaubaren Maßnahmen zu einem Bunkerschiff erweitern ließe. [B. Dettmar Reederei]

HERSTELLUNG ERNEUERBARES METHANOL

Mit der Energiewende wird die Systematik der weltweiten Energieversorgung bildlich gesprochen „von den Füßen auf den auf den Kopf" gestellt. Elektrizität war in der Vergangenheit das Produkt einer langen Umwandlungskette, an deren Beginn fossile Primärenergieträger standen. In Zukunft wird Strom komplett zum Primärenergieträger und rückt an

den Anfang der Kette. Alle anderen Energieformen werden daraus passend gewandelt. Das gilt insbesondere auch für die Bereitstellung von in Kraftstoffen gebundener chemischer Energie.

Die Verwendung von Biomasse ist keine (nur auf die Verwertung von Reststoffen beschränkte) Option für die Kraftstoffherstellung, da der Flächenverbrauch exorbitant groß wäre und nicht mit der Ernährung der Weltbevölkerung sowie der Sicherung der weltweiten Biodiversität vereinbar ist. Viel effektiver ist die Verwendung von Photovoltaik und Wind zur Primärenergiegewinnung, wie Bossel [9] in „Energiewende zu Ende gedacht" erläutert.

Die vollständig regenerative Bereitstellung von Methanol als Kraftstoff aus Strom (Power-to-Liquid-Verfahren) wurde in MethaShip eingehend analysiert und u.a. die Energieströme, Flächenbedarfe sowie die Kostenstruktur ermittelt. Die benötigten Anlagen und Prozesse für die Kraftstoffgewinnung sind in Abb. 12 zusammenfassend dargestellt. Entscheidend dabei ist das Schließen des Kohlenstoffkreises über die Gewinnung von CO_2 aus der Atmosphäre mithilfe der Direct Air Capture-Technologie. Hierbei wird die bei der Verbrennung von Methanol an Bord freiwerdende CO_2-Menge dem Kraftstoffgewinnungsprozess wieder zugeführt und somit Klimaneutralität erzielt. Die MethaShip-Untersuchungen beziehen sich auf eine Anlage zur Produktion von 715.000t Methanol jährlich. Das entspricht einer 500 MW-Brennstoffproduktionsanlage (chemische Leistung), und würde etwa 7-10 große Passagierschiffe versorgen können. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) resultiert dabei zu 3 MJ Energie pro MJ produziertem Methanol. Es muss also drei mal mehr Energie (regenerativ) aufgewendet werden, als schließlich chemisch im Kraftstoff gebunden ist.

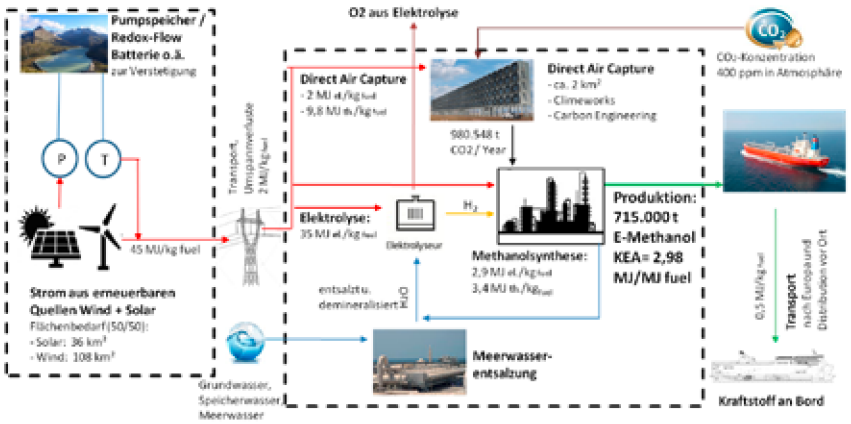


Abb. 12: Schematische Darstellung einer klimaneutralen E-Fuel-Produktionsanlage für Methanol, die CO_2 als Rohstoff aus der Atmosphäre entnimmt.

ZUSAMMENFASSUNG

Kreuzfahrtschiffe und RoPax-Fähren sind darauf angewiesen große Energiemengen als Kraftstoff mitzuführen um weite Distanzen zu überwinden. Das Forschungsprojekt

MethaShip hat die Eignung von Methanol als Grundbrennstoff für diese seegehenden Passagierschiffe untersucht und bewertet. Ein zentrales Untersuchungsergebnis ist, dass Methanol eine ganze Reihe vorteilhafter Eigenschaften mit sich bringt. Weil es bei Umgebungsbedingungen flüssig ist, kann es raumsparend und mit vergleichsweise einfacher Technik an Bord gelagert werden. Zwar weist Methanol eine geringere Energiedichte als Schweröl und Diesel auf, es kann diesen Nachteil jedoch zum Teil kompensieren, weil Methanol wegen seiner sehr guten Umweltverträglichkeit direkt an der Schiffsaußenhaut gelagert werden kann. Der saubere Brennstoff Methanol verbrennt ohne Ruß- und Schwefelfreisetzung und kann aufgrund der Reinheit direkt aus dem Tank entnommen und den Verbrauchern zugeführt werden. Eine Separations- (Schweröl) oder Vergasungsanlage (LNG) entfällt. Doppelwandige Rohleitungen und ein Zwei-Barrierenkonzept garantieren die Sicherheit an Bord. Insgesamt nehmen die Systeme zur Kraftstofflagerung und Energieversorgung weniger wertvollen Platz als bei LNG-Systemen ein, was Methanol für den Schiffsentwurf sehr vorteilhaft macht.

Methanol ist ein seit Jahrzenten verwendeter Basisstoff der chemischen Industrie und somit weltweit bekannt und verfügbar. Das gleiche gilt für Armaturen und Ausrüstung zur Handhabung von Methanol. Eine eingespielte Lieferkette und weltweite Lagerkapazitäten stehen zur Verfügung und ließen sich aufgrund der einfachen Technik preisgünstig erweitern. Im Projekt wurde nachgewiesen, dass sich Binnenschiffe, die schon heute Methanol transportieren, mit geringem Aufwand zu Tankschiffen für die Versorgung von Passagierschiffen umrüsten lassen.

Im Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele hat Methanol das Potential einen entscheidenden Beitrag zu leisten. Es lässt sich auf verschiedenen Wegen in großem Maßstab regenerativ herstellen. Als besonders vielversprechend wurde in MethaShip die Bereitstellung als E-Fuel im Power-to-Liquid-Verfahren identifiziert. Die dafür notwendigen Anlagen und Prozesse sowie Flächen- und Energiebedarfe zur 100%-klimaneutralen Erzeugung, inklusive vorheriger Extraktion von CO_2 aus der Atmosphäre, wurden quantitativ untersucht und bewertet.

Das MethaShip-Projekt hat gezeigt, dass sehr viel für die Verwendung von Methanol als maritimer Kraftstoff spricht und es zur „ersten Wahl" werden könnte. Zurzeit ist Methanol am Markt teurer als konventionelle Marinekraftstoffe. Jedoch ist es schiffbaulich sehr vorteilhaft, hat hervorragende Umwelteigenschaften und ist ein einfach regenerativ herstellbarer Energiespeicher, der dauerhaft lagerfähig ist und als Stoff selbst kein Treibhausgaspotential aufweist. Die schon heute gegebene Verfügbarkeit, vorhandene Lieferketten und etablierte Technologien prädestinieren Methanol zudem als Schiffskraftstoff mit stufenlosem Übergang von fossiler zu regenerativer Versorgung.

DANKSAGUNG

Die Autoren sprechen im Namen des MethaShip-Konsortiums 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 MethaShip.

LITERATUR

[1] U.S. Environmental Protection Agency, Office for mobile sources, "Methanol Fuels and Fire Safety", 1994

[2] European Chemicals Agency (ECHA), Registration Dossier Methanol (CAS 67-56-1), Short-term toxicity to fish

[3] European Chemicals Agency (ECHA), Registration Dossier Gasoline (CAS 86290-81-5), Short-term toxicity to fish

[4] GKG Mineralöl Handel, Sicherheitsdatenblatt Heizöl schwer max. 0,3 - 3,5 % Schwefel (CAS 68476-33-5, Schweröl)

[5] European Chemicals Agency (ECHA), Registration Dossier Diesel (CAS 68334-30-5), Short-term toxicity to fish

[6] European Chemicals Agency (ECHA), Registration Dossier Methane (CAS 74-82-8), Short-term toxicity to fish

[7] Malcolm Pirnie, Inc., "Evaluation of the fate and Transport of Methanol in the Environment", 1999

[8] O. Thébaud et al., „The Cost of Oil Pollution at Sea: An Analysis of the Process of Damage Valuation and Compensation following Oil Spills", in "Economic, Social and Environmental Effects of the 'Prestige' Oil Spill", ISBN 84-95415-74-7, 2004

[9] U. Bossel, „Energiewende zu Ende gedacht", ISBN 978-3-033-04773-0, 2017

ROBEMM –
ROBOTISCHES UNTERWASSER-BERGUNGS- UND ENTSORGUNGSVERFAHREN INKLUSIVE TECHNIK ZUR DELABORATION VON MUNITION IM MEER, INSBESONDERE IM KÜSTEN- UND FLACHWASSERBEREICH

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX403A-D

MELANIE ABBONDANZIERI	Heinrich Hirdes EOD Services GmbH (Hamburg)
TILO KLEIN	Automatic Klein GmbH (Essen)
TORSTEN FREY	Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig (Leipzig)
PAUL MÜLLER	Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (Pfinztal)

EINLEITUNG

Die Experten gehen von über 1,6 Mio. Tonnen konventioneller und chemischer Kampfmittel in der Nord- und Ostsee aus [1]. Auch im inerten Zustand birgt diese umfangreiche Kampfmittelbelastung der Meeresflächen eine latente Gefahr für Mensch und Meeresumwelt, aufgrund der karzinogenen und erbgutverändernden Eigenschaften der darin enthaltenen Bestandteile.

Entschließt man sich für eine Kampfmittelbeseitigung, muss man von einer Explosionsgefahr und der damit einhergehenden Blast- und Splitterwirkung ausgehen. Damit hat sich die Kampfmittelbelastung zur zentralen Problematik beim Ausbau der Offshore-Energieindustrie sowie der gesamten Schifffahrt entwickelt.

Die derzeitige Offshore-Kampfmittelbeseitigung besteht aus drei Hauptphasen: 1. die Sondierung/Erkundung, 2. die Untersuchung der Verdachtspunkte sowie 3. die Vor-Ort-Beseitigung durch Sprengung mit Vorablegung eines Blasenschleiers oder die Bergung mit Abtransport der Kampfmittel zur GEKA. Hinzu kommen vorab eine Recherche nach historischen Daten und eine Dokumentation nach QM-Gesichtspunkten nach erfolgreicher Räumung.

Dieses mehrstufige Vorgehen erfordert einsatzbereite Trägerschiffe, spezialisiertes und geschultes Personal (Taucher, Schiffspersonal, Technikpiloten, etc.) sowie passende Technik (Sidescan Sonare, Multibeam Echosounder, Magnetometer, Kameras etc., die an Unterwasserrobotern o. Ä. befestigt sind). Zudem sind zivile und staatliche Akteure gleichermaßen in den Gesamtvorgang eingebunden. Damit ist das derzeitige Kampfmittelbeseitigungsverfahren für Mensch und Meeresumwelt gefährlich sowie sehr zeit- und kostenintensiv.

AUFGABENSTELLUNG UND ZIELE DES PROJEKTES

Ziel dieses vorliegenden FuE-Vorhabens war es daher, einen wirtschaftlich sinnvollen Verfahrensweg und eine dazugehörige Technik zu entwickeln, die für den Küsten- und Flachwasserbereich (0 bis 35 m Tiefe; perspektivisch auch bis 50 m Tiefe) hervorragend geeignet ist und zukünftig die Vor-Ort-Beseitigung (Unterwasser) des Kampfmittels vollautomatisiert (ohne den Einsatz von Tauchteams und ohne Detonation) durchführen kann. Begleitend sollte ein Validierungsverfahren für die Offshore-Kampfmittelbeseitigung und ein kommerzielles Testfeld zur Erprobung dieser zukünftigen maritimen Technologien entwickelt werden.

Aus dieser Gesamtzielsetzung wurden folgende wissenschaftliche und technische Teilziele abgeleitet:

- Entwicklung und Validierung der Delaborations-/Bearbeitungseinheit mit Versorgungsplattform/-einheit für die Offshore-Kampfmitteldelaboration,
- Entwicklung der Containereinheit zur Aufbewahrung der entstehenden Sprengstoffbestandteile,
- Sicherheitstechnische Auslegung der Prozesskette des Munitions- und Sprengstoffhandlings während der gesamten Delaboration,
- Automatisierung aller Systemkomponenten der Delaborationseinheit und Anbindung an die Versorgungseinheit sowie
- Entwicklung eines Offshore-Validierungsverfahrens in Form eines Qualitätsleitfadens für die derzeitige Kampfmittelbeseitigung und eines Offshore-Testfeldes.

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG DER DELABORATIONSEINHEIT MIT AUFBEWAHRUNGSMÖGLICHKEIT DER KAMPFMITTELBESTANDTEILE UND VERSORGUNGSPLATTFORM

Bevor mit der Konzeption der Delaborationseinheit begonnen werden konnte wurde zunächst festgelegt, für welche großformatigen UXO (engl. Unexploded Ordnance), die Delaborationseinheit ausgelegt werden soll. Dabei spielte die UXO-Auffindungshäufigkeit der letzten fünf Jahre in der Nord- und Ostsee eine entscheidende Rolle.

Danach wurde der Entwicklungsschwerpunkt auf die Betrachtung des gesamten Prozessablaufs, unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Parameter, gelegt: vom Auffinden des großformatigen UXO, über die Unterwasser-Delaboration, bis hin zur Entsorgung der Bestandteile. Folgende wesentliche sicherheitstechnische Aspekte waren dabei von zentraler Bedeutung:

- Transport des UXO zur und innerhalb der Delaborationseinheit, ohne Schlag- und Reibwirkung = Verhinderung einer Spontanumsetzung des enthaltenen Explosivstoffes,

› Möglichkeit zur Auf-/ Abstellung der Delaborationseinheit auf dem Meeresboden = sicherer Stand für die folgende UXO-Bearbeitung wird erreicht,

› Unabhängigkeit der Delaborationseinheit zur Hauptversorgung = Trägerschiff kann in sicherer Distanz verbleiben,

› UW-Stabilisierung und -Transport des UXO erfolgt mit möglichst unabhängigen Workclass Remotely Operated Vehicles (WROVs) = zusätzliche Trennung der Gefahrenbereiche, durch Trennung der Technik (im Notfall bleibt die Delaborationseinheit mit UXO und -Bestandteilen am Meeresboden zurück).

Demzufolge wurde bis Anfang 2018 folgender Offshore-Prozessablauf inkl. Technik entwickelt (siehe folgende Abb. 1):

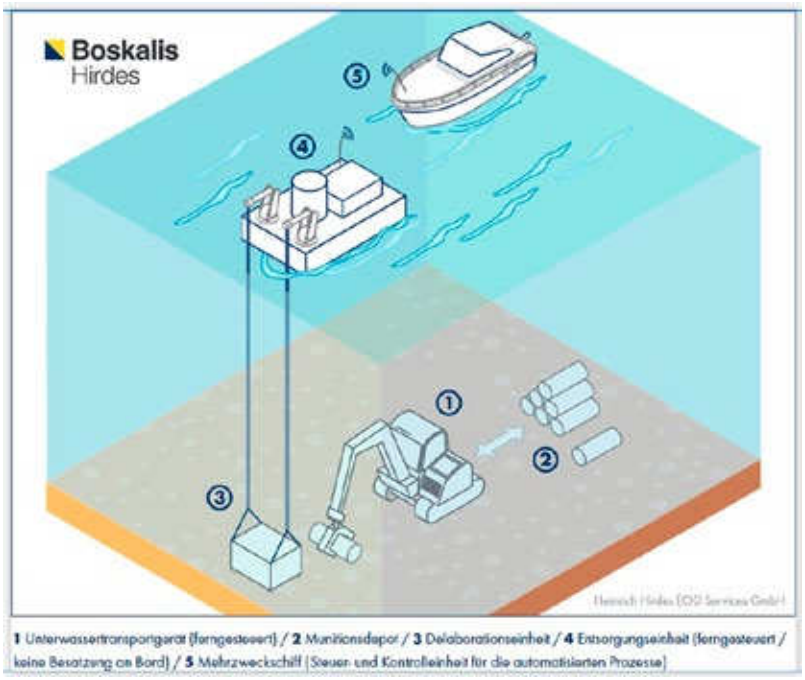


Abb. 1: Offshore-Delaborationsprozess inkl. Technik für großformatige UXO [2]

Der sicherheitstechnische Hauptaspekt beim UXO-Transport zur und in die Delaborationseinheit tritt auch beim UXO-Transport und der -Befestigung innerhalb der Delaborationseinheit auf. Es sollte unbedingt jeglicher Energieeintrag auf das UXO vermieden werden. Dennoch muss das UXO innerhalb der Delaborationseinheit soweit bewegt werden können, dass eine ideale UXO-Positionierung, z. B. für die eigentliche Delaboration anhand von verschiedenen Werkzeugen, vorgenommen werden kann.

Im weiteren Projektverlauf entschied man sich daher für eine Konzeption der Unterwasser-Delaborationseinheit nach dem „Tauchglocken-Prinzip", weil so das UXO-Handling und die Dimensionierung der Einheit auf ein Mindestmaß beschränkt werden konnten. Auch bei der Entwicklung der Aufbewahrung für die UXO-Bestandteile wurde eine spezielle Beschichtung entworfen, so dass keinerlei Anhaftungen von Explosivstoff-Restmengen möglich sind.

ENTWICKLUNG DER SICHERHEITSTECHNISCHEN AUSLEGUNG DES MUNITIONS- UND SPRENGSTOFFHANDLINGS FÜR DIE ENTSORGUNG

Explosivstoffe benötigen keine weiteren Reaktionspartner, wie beispielsweise zusätzlichen Sauerstoff, da sie sowohl den Brennstoff als auch das Oxidationsmittel bereits in einem System enthalten, wodurch die Unterwasser-Bearbeitung der Hauptladungen der Kampfmittel einem hohen Risiko unterliegt. Für die Angabe und Einschätzung sicherheitstechnischer Kenngrößen innerhalb des FuE-Vorhabens wurden Explosivstoffproben aus verschiedenen Kampfmitteln, die sich über 70 Jahre am Meeresgrund befanden untersucht, um die Schlag- und Reibempfindlichkeit, die Explosionswärme, die thermische Stabilität oder die Detonationsgeschwindigkeit zu ermitteln.

Tabelle 1: Schlag- und Reibempfindlichkeit verschiedener Kampfmittelproben

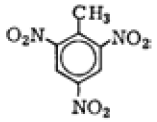
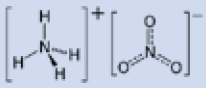
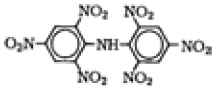
Probe	Bezeichnung	Schlagempfindlichkeit [Nm]	Reibempfindlichkeit [N]
OS 1	Torpedokopf deutsch	25	360
OS 2	Torpedokopf deutsch	50	360
OS 3	Ankertaumine deutsch	25	360
OS 4	Grundmine britisch Mark VI	40	360
OS 5	Grundmine britisch Mark I-IV	50	360
OS 6	Grundmine britisch Mark I-IV	50	360
OS 9	Unbekannt	6	360
OS 10	Unbekannt	10	360

Ein Explosivstoff gilt als schlagempfindlich, wenn er einen Wert kleiner als 40 Nm aufweist und als reibempfindlich bei Werten unter 360 N [3]. Aus den Untersuchungsergebnissen (siehe Tabelle 1) wurde eindeutig ersichtlich, dass fast alle untersuchten Proben schlagempfindlich, aber nicht reibempfindlich waren. Wie bereits beschrieben, hatte daher die Explosivstoffempfindlichkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung den größten Einfluss auf die Gestaltung einzelner Prozessschritte zur Bearbeitung der Kampfmittel.

Des Weiteren wurden die verschiedenen Explosivstoffproben hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht, um daraus Schlussfolgerungen in Bezug auf ihre Toxizität ableiten und einen Vergleich zwischen real enthaltenen Komponenten sowie den Angaben von Munitionsdatenblättern und sonstigen Literaturangaben ziehen zu können. Britische Kampfmittel enthielten beispielsweise meistens Minol oder Amatol, wohingegen deutsche

Kampfmittel überwiegend Schießwolle (Hexanite) beinhalteten. Eine Übersicht der verschiedenen untersuchten Explosivstoffgemische, ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Inhaltstoffe verschiedener Explosivstoffformulierungen [4]

	Strukturformel	Minol	Amatol	Schießwolle
2,4,6-Trinitrotoluol		X	X	X
Ammoniumnitrat		X	X	(X)
2,4,6,2',4',6'-Hexanitrodiphenylamin				X
Aluminiumpulver	Al	X		X

Die jeweiligen Anteile an TNT und Hexyl wurden mittels Gaschromatographie (GC-MS), Hochleistungsflüssigkeits- (HPLC-UV/VIS) und Ionenchromatographie (IC) ermittelt und sind in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnisse der GC- und HPLC-Untersuchungen der Ostseeproben (OS)

Probe	TNT-Gehalt [wt%]	Hexyl-Gehalt [wt%]
OS 1	51,3	4,4
OS 2	53,1	4,8
OS 3	95,9	-
OS 4	61,7	-
OS 5	92,7	-
OS 6	88,9	-
OS 9	64,7	11
OS 10	56,1	15,4

Das Wissen hinsichtlich der Formulierungen der Hauptladungen verschiedener Kampfmittel und anhand der Berechnung des kritischen Energieflusses, basierend auf den Rankine-Hugoniot-Bedingungen [5], ermöglichen auch Abschätzungen zum maximal möglichen Energieeintrag auf ein Kampfmittel und dessen Inhalt. Die Gleichungen beruhen auf der Lagrange-Betrachtungsweise einer Schockwelle und beschreiben über den *Druck P, die Dichte* ρ*, die Schockgeschwindigkeit U, die Partikelgeschwindigkeit u* sowie die Erhaltungsgleichungen vor und hinter einer Schockfront:

$$P_1 = \rho_0 C_0 u_1 + \rho_0 s u_1^2 \quad (1)$$

$$E_C = \frac{P_1^2 t}{\rho_0 U} \quad (2)$$

Für 2,4,6-Trinitrotoluol, welches die Hauptkomponente fast aller Kampfmittelformulierungen ist, beträgt der charakteristische Wert E_C(TNT) = 77 [J/cm²] [5]. Dieser Wert ermöglicht alle im Verfahren angreifenden Kräfte, auf diese kritische Größe zu beziehen und so einen sicherheitstechnischen Puffer einzuplanen.

AUTOMATISIERUNG ALLER SYSTEMKOMPONENTEN DER DELABORATIONS-EINHEIT UND ANBINDUNG AN DIE VERSORGUNGSEINHEIT

Die grundsätzliche Aufgabe automatisiert arbeitender Anlagen ist es im Rahmen festgelegter Grenzen, definierte Teilaufgaben zu vollziehen. Die Teilaufgaben können als Regel- oder Steuerkreise ausgebildet sein innerhalb derer, die Differenzierung von Antriebsmaschine und Arbeitsmaschine wesentlich ist. Die Antriebsmaschine treibt dabei die Arbeitsmaschine an, welche die ihr zugewiesene Arbeitsaufgabe erfüllt.

Die Ausstattung der elektrischen Automatisierungstechnik innerhalb des Vorhabenverlaufs hatte hinsichtlich der Ausprägungen Kapazität, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Kommunikationsfähigkeit inzwischen ein Niveau erreicht, das eine Verwendung für den angestrebten Einsatzzweck ermöglichte und die Einhaltung des Nebenziels low-cost realisierte.

Automatisierungstechnisch war die Definition einer neuen Betriebsart erforderlich. Die Arbeitsmaschine/Delaborationseinheit sollte einen kombiniert geführten Handbetrieb mit Automatikunterstützung sowie einen Automatikbetrieb mit laufender manueller Korrektur beinhalten. Diese Funktionen waren außerdem hinsichtlich der Raumkoordinaten exakt zu verorten und mussten durch das Bedienpersonal wiederholt abrufbar sein.

Das Verrichten von Arbeiten an Zündern von Wasserbomben, Torpedos oder Ankertau-/Grundminen mit unbekanntem internen Zustand kann nicht unter vollständigem Risikoausschluss ausgeführt werden. Daher erfolgt aus Automatisierungssicht die zyklusgenaue Übertragung des Speicherabbildes der Zustände aller elektrischen Signale des Steuerungscomputers auf den Leitrechner. Unter Beachtung aller Latenzzeiten stehen auf diese Weise sämtliche Prozessdaten bis zu einem Zeitpunkt von etwa 50 Millisekunden vor einer ungeplanten detonativen Umsetzung des Explosivstoffgemisches zur späteren Auswertung und Analyse zur Verfügung.

ENTWICKLUNG EINES QUALITÄTSLEITFADENS FÜR DIE DERZEITIGE OFFSHORE-KAMPFMITTELBESEITIGUNG

Der entwickelte Qualitätsleitfaden stellt eine Validierungsgrundlage für die, in der Offshore-Kampfmittelbeseitigung, eingesetzten Verfahren und Technologien sowie beauftragten Unternehmen dar.

Wesentlich für die Entwicklung eines allgemein anerkannten Qualitätsleitfadens war die Einbeziehung aller betroffenen Interessengruppen in den Erstellungsprozess. Zu Beginn wurde eine vergleichende Analyse existierender Ablaufschemata, die sich mit der Beseitigung von Offshore-Kampfmitteln befassen, durchgeführt. Aus dieser Bewertung speiste sich anschließend die Erstellung eines neuen ganzheitlichen Phasenschemas für die Offshore-Kampfmittelbeseitigung.

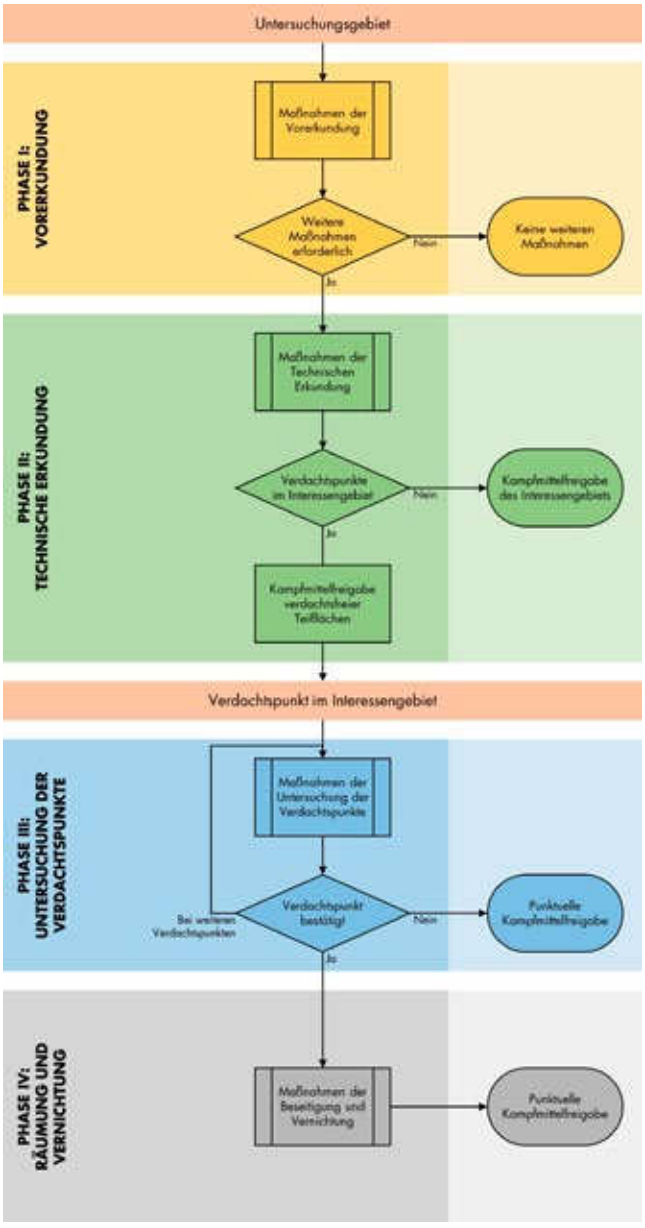


Abb. 2: Phasenschema Offshore-Kampfmittelbeseitigung [6]

Weiterhin wurden Workshops, entsprechend der verschiedenen Phasen der Offshore-Kampfmittelbeseitigung, organisiert. Als Teilergebnis wurden Qualitätsfaktoren und konkrete Anforderungen an die einzelnen Prozesse der Phasen ermittelt. Danach wurde eine Primärversion des Qualitätsleitfadens erstellt, welche den Experten zur Kommentierung zur Verfügung gestellt wurde. Die Kommentierung wurde ausgewertet, eingearbeitet und abschließend innerhalb eines Expertengremiums diskutiert. Schließlich wurde die finale Version des Qualitätsleitfadens verfasst. Als Resultat ist ein Qualitätsleitfaden mit über 150 Seiten entstanden, der die vier Phasen der Kampfmittelbeseitigung (siehe Abb. 2) vollumfänglich beinhaltet.

Das heißt im Einzelnen, der konkrete Ablauf der einzelnen Teilprozesse wurde beschrieben und dargestellt sowie die beteiligten Akteure charakterisiert. Es wurde außerdem festgelegt, welche Technologien zulässig sind und welche Eignungsanforderungen erfüllt sein müssen. Zuletzt wurde der Informationsfluss zwischen Akteuren, Dokumentationsanforderungen und Berichtswesen festgelegt.

Über die Anforderungen an die Phasen und Teilprozesse hinaus, enthält der Qualitätsleitfaden ein Glossar sowie eine Auflistung empfohlener und einzuhaltender rechtlicher und normativer Dokumente. Des Weiteren wurden Anforderungen an das geeignete Personal zur Durchführung einer vollständigen Kampfmittelbeseitigung formuliert. Das abschließende Kapitel beinhaltet ein Nachschlagewerk, welches die identifizierten Qualitätsfaktoren der o. g. Teilprozesse definiert und ggf. Grenzwerte angibt.

KONZEPTION EINES OFFSHORE-TESTFELDES

Um zukünftig den Einsatz entwickelter Technologien zur technischen Erkundung innerhalb einer Offshore-Kampfmittelbeseitigung hinreichend testen zu können, wurde ein dafür geeignetes Testfeld konzipiert. Dazu wurden zunächst Tests für Seitensichtsonare, Fächerecholote, Sedimentecholote, Magnetometer und elektromagnetische Verfahren entwickelt. Die Tests wurden in Anlehnung an die ISO 17000-Normenfamilie für Konformitätsbewertung gestaltet. Die im entwickelten Qualitätsleitfaden dargelegten Qualitätsfaktoren bilden eine Grundlage für Anforderungen an ein qualitativ hochwertiges Vorgehen bei der technischen Kampfmittelerkundung, jedoch ist die Einhaltung dieser Qualitätsfaktoren von den technischen Parametern der derzeit verwendeten Geräte abhängig. Aus diesem Grund wurde die Konzeption des Testfeldes für die Erfüllung folgender Einzelaufgaben für hydrographische und geophysikalische Verfahren ausgelegt:

› die Definition an Sensoranforderungen,
› das Testen technischer Parameter sowie
› die Ableitung der Einsatzeignung der Sensoren.

Zudem sieht das entwickelte Konzept vor, dass die zukünftige Testdurchführung auf einem Rasterfeld mit bekannten Positionen verschiedener idealisierter Testkörper erfolgen wird. Die zu testenden Sensoren werden dabei iterativ schienengeführt über das Rasterfeld bewegt,

um gleichbleibende Testbedingungen (Geschwindigkeit und Höhe über Grund, Winkel zum Grund) anzutreffen. Die Testkörper und ihre Einbringung werden variabel gestaltet, so dass eine Vielzahl verschiedener Tests mit gleichem Ablauf möglich ist. Variabel sind dabei die Form der Testkörper, die Tiefe ihrer Einbringung, ihre Größe sowie die Art des umgebenden Sediments.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Derzeit können nur etwa 20 bis 30 % der kampfmittelbelasteten Flächen der Nord- und Ostsee beräumt werden, aufgrund der vorherrschenden Gefahr und der Ressourcenintensität, die mit der Kampfmittelbeseitigung einhergehen. Das Konsortium geht davon aus, dass mit der Etablierung der RoBEMM-Technik innerhalb der nächsten 10 Jahre, 70 bis 100% aller belasteten Flächen in der Nord- und Ostsee beräumt werden könnten - weitestgehend ohne Gefahr für Mensch und Meeresumwelt.

DANKSAGUNG

Das Konsortium dankt dem BMWi für die Förderung dieses FuE-Vorhabens und dem PtJ für die sehr gute und stetige Betreuung in allen inhaltlichen und administrativen Belangen.

LITERATUR

[1] Böttcher, C.; Knobloch, T.; Rühl, N.; Sternheim, J.; Wichert, U.; Wöhler, J. (2011): Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer - Bestandsaufnahme und Empfehlungen. (Stand 2011). Hamburg: Sekretariat Bund/Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BLMP) im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

[2] Abbondanzieri, M.; Freudenthal, M.; Mensing, T.; Scheffer, N.; Wachter, L. (2018): Entwickelter Offshore-Delaborationsprozess inkl. Technik für großformatige UXO. Hamburg: Heinrich Hirdes EOD Services GmbH

[3] DGUV Information 213-065; Sicherheitstechnische Kenngrößen - Ermitteln und bewerten

[4] Köhler, J.; Meyer, R.; Homburg, A. (2008); Explosivstoffe. 10. Auflage, Weinheim: Wiley-VCH.

[5] Cooper, P. (1996); Explosives Engineering. New York: Wiley-VCH.

[6] Frey, T.; Holländer, R. (2018): Qualitätsleitfaden Offshore-Kampfmittelbeseitigung. Entwurf v0.18. Leipzig: Universität Leipzig, *Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement.*

MPNET –

MARITIME MULTIPHASENTRANSPORTNETZWERKE – FÖRDERTECHNOLOGIE ZUM BEDARFSGERECHTEN TRANSPORT VON MEHRPHASENGESCHMISCHEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX373A-F

JENS-UWE BRANDT	ITT Bornemann GmbH (Obernkirchen)
JÖRG LEWERENZ	ITT Bornemann GmbH (Obernkirchen)
MARK REICHWAGE	ITT Bornemann GmbH (Obernkirchen)
ABDULMALIK ALWAN	Arbeitsgruppe Reservoir Engineering und Fördertechnik, Technische Universität Berlin
MILAN PESCHKES	Arbeitsgruppe Baumaschinen- und Fördertechnik, Ruhruniversität Bochum
JENS DANKER	GISMA Steckverbinder GmbH (Neumünster)
ANDREA LUKE	Fachgebiet technische Thermodynamik, Universität Kassel
DIPL.-ING. MARTIN MEHLICH	
DIPL.-WIRTSCH.-ING. CHRISTOPH MÜNSTER	Institut für Schadensforschung und Schadensverhütung ISSV e. V. an der Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
PROF. DR.-ING. HANS HOFFMEISTER	

DAS VERBUNDPROJEKT BESTEHT AUS DEN TEILPROJEKTEN

03SX373A:

Entwicklung eines wartungsfreien Multiphasenpumpen Downhole Aggregates und komplex vernetzter Mehrphasen Transporttechnik von der Lagerstätte bis zur zentralen Verarbeitung“

03SX373B:

Lagerstättenverhalten bei Mehrphasenförderung und komplex vernetzten Förderszenarien, Subsea, Off- und Onshore

03SX373C:

Festigkeitsbewertung ausgewählter Komponenten vernetzter Mehrphasen-Transportsysteme bei Verwendung alternativer Werkstoffe

03SX373D:

Forschung & Entwicklung hoch belastbarer, bauraumoptimierter Hybridsteckverbinder für den Betrieb von Mehrphasen Down Hole Aggregaten subsea, Off- und Onshore

03SX373E:

Erweiterung der Berechnungsgrundlagen für Mehrphasenpumpen auf MDA´s in Leitungsnetzwerken zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen Subsea, on- und offshore unter Berücksichtigung des bedarfsgerechten Transports

03SX373F:

Werkstoffverhalten in vernetzten Multiphasentransportsystemen unter transienten Bedingungen („MPNet/WTB")

Der weltweit steigende Energiebedarf und die an Land knapper werdenden fossilen Energie-Ressourcen erhöhen zukünftig die Bedeutung der Erschließung von Öl- und Gasvorkommen im Meer, in schwerzugänglichen seebedeckten Gebieten und in Wassertiefen über 2000m.

AUFGABENSTELLUNG

In diesem Verbundforschungsprojektes wurde ein störungs- und wartungsfrei operierendes Multiphasen-Downhole-Aggregat (MDA) entwickelt, welches in subsea Förderbohrungen installiert als Teil eines ebenfalls entwickelten komplex vernetzten Fördersystems zu einer besonders effizienten und nachhaltigen Gewinnung von Kohlenwasserstoffen im maritimen Bereich beiträgt. Dabei wurde die gesamte Förderkette von der Lagerstätte bis zur Verarbeitung betrachtet, um die Herausforderungen bei einer bedarfsgerechten Förderung zu erkennen und Lösungen zu erarbeiten.

ENTWICKLUNG DES MEHRPHASENPUMPEN-DOWNHOLE-AGGREGATES (MDA)

Auf den Ergebnissen des Vorhabens 03SX321 aufbauend wurde das MDA hinsichtlich Differenzdruckfähigkeit, Wartungsfreiheit und Lebensdauer weiterentwickelt und den gehobenen Anforderungen des Betriebes untertage angepasst. Dazu wurde für das MDA eine modularere Bauweise entwickelt und die einzelnen Module wurden robuster sowie leistungsfähiger gestaltet.

Die Gehäuse wurden hinsichtlich der Kanalführungen weiterentwickelt und damit die Möglichkeit geschaffen, zum Erreichen maximaler Systemdifferenzdrücke MDA's seriell im Bohrloch zu installieren.

Zur Regelung des Druckes im Schmierölkreislauf sowie zur Nachführung von systembedingt auftretender Leckage an den dynamischen Wellendichtungen wurde ein hydraulisches Regelmodul in das MDA integriert. Ein Druckspeicher erlaubt die Aufrechterhaltung der hydraulischen Regelfunktionen ohne eine obertägige Versorgung während des Installationsvorgangs.

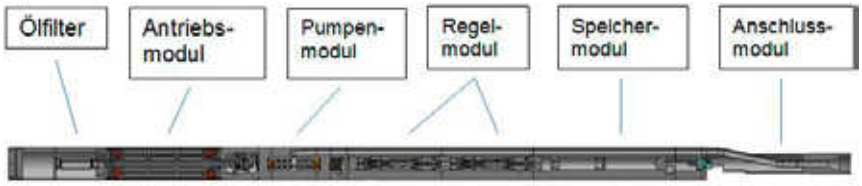


Abb. 1: MDA-Aggregat in Modulbauweise

Abb. 2: Antriebs- und Getriebeseite des Pumpenmoduls

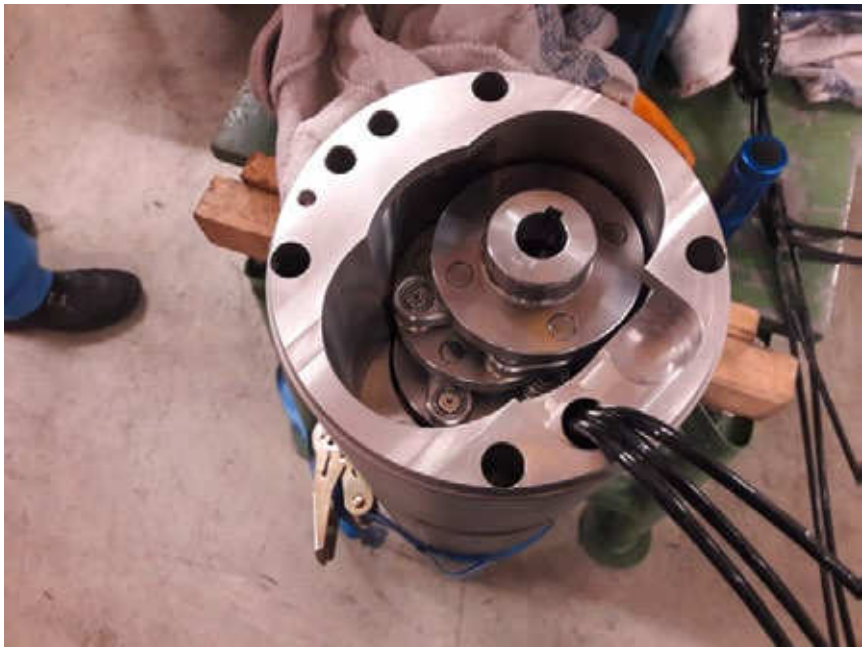


Abb. 3: Kupplung zum Ausgleich des Wellenversatzes

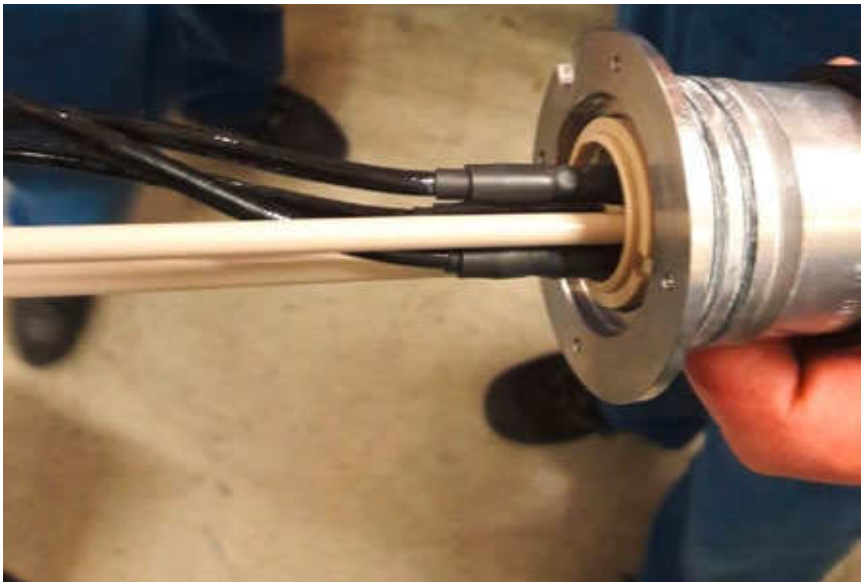


Abb. 4: Montage des Hybrid-Steckverbinders von GISMA zur Versorgung des MDA

Der MDA wurde in umfangreichen Langzeitversuchen erprobt. Nach Abschluss einer definierten Testphase von 1000 Betriebsstunden wurde das Downholeaggregat zerlegt und eingehend inspiziert. Die folgenden Bilder zeigen die Hauptkomponenten während dieser Untersuchung.

Abb. 5: Inspektion des MDA nach 1000 Betriebsstunden

Die Analyse wie auch die Bilder oben zeigen, dass sich die Maschine hinsichtlich Verschleißes in einwandfreiem Zustand befindet. Auffällig waren Kalkablagerungen an der gesamten äußeren Oberfläche des MDA sowie im Bereich der Gleitringdichtungen. Die Ablagerung führten zu eingeschränkter Beweglichkeit der befederten stationären Ringe. Der Bildung von Ablagerungen im Dichtungsbereich wurde mit einer veränderten Führung des kühlenden Produktstroms unter Vermeidung von Toträumen begegnet. Die Gleitring-

dichtungen verrichteten ihren Dienst völlig unauffällig und ohne Schäden, kritische Betriebszustände oder unerwünschte Leckagen. Zur Vereinfachung der Montage wurden die Befederung und die Verdrehsicherung des stationären Teils der Dichtung direkt im Lagergehäuse des MDA platziert.

Die Wälzlager, eine Sonderanfertigung der Firma Schaeffler, wurden nach jeweils 1000 Betriebsstunden vom Hersteller inspiziert. Wegen guter Laufbilder wurden die Lager ohne Veränderungen für den weiteren Betrieb freigegeben. Zur Erhöhung der Lagerlebensdauer wurde der Schmierölkreislauf mit einem Filterelement ergänzt und damit das Überrollen von Schmutzpartikeln vermieden.

Für den Ausgleich des Wellenversatzes zwischen Pumpenmodul und Antrieb kommt eine spezielle Kupplung zum Einsatz. Die Aggregaterprobungen zeigten, dass bei diesem Bauteil der axialen Positionierung eine besondere Bedeutung zukommt. Dies wurde durch konstruktive Maßnahmen sowie eine spezielle Installationsprozedur sichergestellt.

Bezüglich Verschleißschutzes der Förderelemente wurden Förderschrauben mit einer speziellen Beschichtung, welche sich im Laborversuch als wirkungsvolle und kommerziell interessante Maßnahme zur Lebensdauersteigerung von Förderschrauben erwiesen hatte, zur praktischen Erprobung in zwei Varianten in einem venezolanischen Ölfeld betrieben. Ein Förderschraubensatz wurde mit einem ausscheidungshärtenden Chromstahl als Grundwerkstoff ausgestattet und erzielte eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer gegenüber dem ungeschützten Grundwerkstoff in einer anspruchsvollen, korrosiven Mehrphasenanwendung. Bei der zweiten Variante mit Duplex als Grundwerkstoff wurde das Lebensdauerende im Betrachtungszeitraum nicht erreicht.

Abb. 6: Rotor mit kombinierten Korrosions- und Erosionsverschleiß

Bei der werksinternen Erprobung des MDA wurde die Notwendigkeit einer Messung der Prozessparameter in unmittelbarer Nähe des MDA erkannt. Das Screening der verfügbaren bohrlochtauglichen Messtechnik zeigte, dass ab 150°C Produkttemperatur passive Sensoren (d. h. ohne Elektronik) aus Gründen der Verfügbarkeit eingesetzt werden müssen. Optische Sensoren erfüllen diese Voraussetzung. Bei dieser Technik werden Glasfasern mit eingeätzten Messgittern (Braggs) versehen, deren dehnungs- und/oder temperaturbedingte Längenänderung durch Interferenzeffekte gemessen wird.

Abb. 7: Lichtwellenleiter mit Messgitter und spannungsfreie Messgitteraufnah-me zur Temperaturkompensation eines integrierten Drucksensors

Geeignete Lichtquellen und Auswerteeinheiten (Interrogator) sowie Glasfasern (Lichtleiter) und Messgitter sind kommerziell verfügbar, in den MDA integrationsfähige Sensoren für Druck und Temperatur wurden entwickelt. Abb. 7 zeigt im oberen Bereich eine spannungsfreie Messgitteraufnahme für eine Referenzmessstelle, mit der temperaturbedingte Dehnungen aufgenommen werden können. Das Signal kann zur Temperaturmessung sowie zur Temperaturkompensation verwendet werden.

Die finale Erprobung im beschriebenen Projekt war die Installation und Erprobung des MDA in einer Förderbohrung. Hierzu stellte die Firma Wintershall Holding GmbH eine Erdölförderbohrung zur Verfügung.

Zur Verifizierung der Montageabläufe bei der Installation des Aggregates in das Bohrloch wurde in Zusammenarbeit mit der Wintershall ein sogenannter Yard-Test durchgeführt. Dazu wurde in der Werkstatt des Förderbetriebes jeder einzelne Installationsschritt geprobt. Zentrale Bestandteile dieses Tests waren das Handling des knapp 500 kg schweren MDA sowie die Befestigung und der Schutz des am Steigrohr verlaufenden Downhole-Kabels. Zur Kontrolle des einwandfreien Kabelzustandes wurden nach jedem Installationsschritt die Isolationswiderstände gemessen

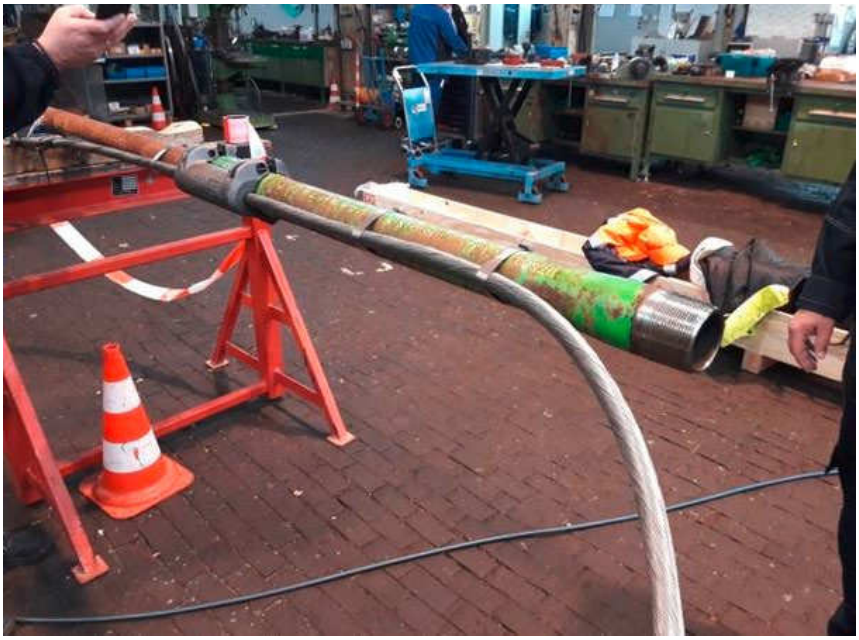


Abb. 8: Yard-Test mit MDA und Zubehör

Abb. 9: Well Head mit Klemmvorrichtung, Dichtungen und Spannsystem

Abb. 10: Vorbereitung der MDA-Installation

Zur Vorbereitung der MDA-Installation wurden der im MDA integrierten Kolbenspeicher und die im Downhole-Kabel integrierten Hydraulikrohrleitungen mittels des obertägigen Versorgungsaggregates mit Öl befüllt.

Abb. 11: Installation des MDA

Nach dem Aufbau der Winde und dem Ziehen des installierten 3 1/2“-Steigrohres begann der Installationsvorgang des MDA.

Abb. 12: betriebsbereite Förderanlage mit Absperreinrichtungen und Tankanlage

Nachdem die Installation auf eine Teufe von 300 m ohne Zwischenfälle verlief, wurden obertägig eine Absperreinrichtung, eine Förderleitung und eine Tankanlage installiert, die das Fördermedium vor dem Abtransport per Tanklastkraftwagen zwischenspeichert.

Das Pumpenaggregat wurde nach Abschluss der Arbeiten und nach positiver Prüfung aller Betriebsparameter gestartet. Der Start verlief reibungslos. Die vom Frequenzumrichter gezeigten Daten der Spannung und der Stromaufnahme am Ausgang des FU lagen im erwarteten Bereich. Begonnen wurde mit der Drehzahl von 300 1/min, die dann sukzessive angehoben wurde bis 3000 1/min. Nach etwa 5 Minuten Förderbetrieb unter Nenndrehzahl zeigten Strömungsgeräusche an den obertägigen Rohrleitungen zu den Tanks, dass die Inbetriebnahme erfolgreich war.

Der Test in der Förderbohrung hat die Einsatzfähigkeit des MDA unter realen Bedingungen beim „Niederbringen“ des Pumpenaggregates nachgewiesen. Im Rahmen umfangreichen Dauerbetriebs im ITT-Bornemann Testfeld und während der Betriebszeit in der Testbohrung wurde grundsätzlich die funktionale Eignung und ein wartungsarmes Design nachgewiesen. Dieses wurde ebenfalls durch die ausführlichen Komponententests bestätigt. Zum Sammeln weiterer Betriebserfahrung im realen Betriebsumfeld wird der Einsatz des MDA im Testfeld der Wintershall nach Projektende weitergeführt.

Das nachfolgende Bild gewährt einen Blick auf das vom MDA geförderte Fluid. Dazu ist anzumerken, dass die Förderung in Pumpenteufe bei einer Temperatur von ca. 20 °C und damit deutlich oberhalb des Stockpunktes erfolgte, während in Abbildung 13 das geförderte Produkt bei wenigen Grad Celsius und damit weit unterhalb des Stockpunktes vom Öls gezeigt wird.

Abb. 13: hochviskoses gefördertes Produkt

UNTERSUCHUNG VERNETZTER MEHRPHASEN-TRANSPORTTECHNIK VON DER LAGERSTÄTTE BIS ZUR ZENTRALEN VERARBEITUNG

Das experimentell ermittelte Förderverhalten des MDA wurde in das Pumpenmodell des Simulationsprogrammes OLGA implementiert. Diese Arbeit schafft die Basis für Simulationsuntersuchungen, bei denen das Förderverhalten der betrachteten Pumpen eine wesentliche Rolle spielt.

Die Förderunterstützung durch in Reihe geschaltetes MDA und obertägig installierte Multiphasenpumpe für stark druckabgesenkte Formationen wurde mittels OLGA-Simulationen untersucht. Dabei wurden sowohl ein deutlicher Anstieg der erzielbaren Förderraten als auch eine deutlich gesteigerte Ausförderrate gezeigt.

Zum Erzielen hoher Differenzdrücke sind Reihenschaltungen von Pumpen erforderlich. Bei Verdrängerpumpen können dabei aufgrund der steifen Kennlinien starke Verschiebungen der Betriebspunkte auftreten. Eine interessante Möglichkeit zur Beherrschung dieser Problematik besteht in der Verwendung von gekoppelten Antrieben. Darunter sind mehrere Antriebe zu verstehen, die von einer gemeinsamen Energiequelle gespeist werden und sich daher entsprechend des Lastzustandes der angekuppelten Arbeitsmaschinen gegenseitig beeinflussen.

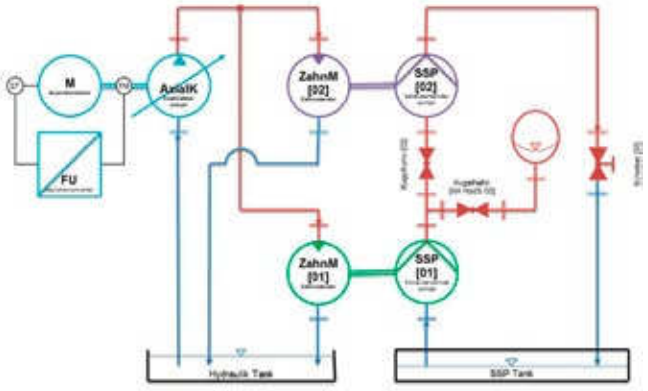


Abb. 14: P&ID des untersuchten vernetzten Antriebssystems

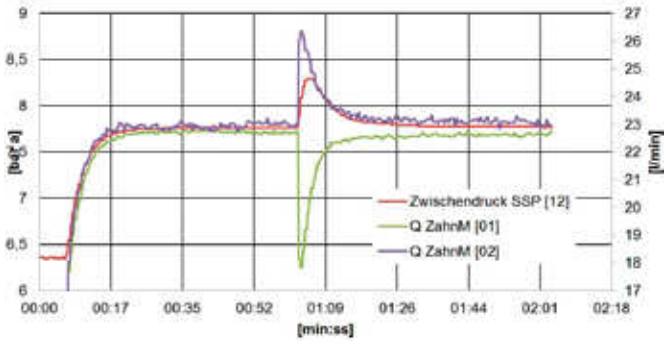


Abb. 15: selbsttätige Ausregelung einer Störung durch ein Zusatzvolumen

Die Experimente zeigen, dass das untersuchte System stabil zu betreiben ist und Störungen selbsttätig ausregelt.

Multiphasenpumpen benötigen für einen sicheren und effizienten Betrieb eine Mindestflüssigkeitszufuhr zur Kühlung und zur Spaltabdichtung. Wegen der besonderen Bedeutung dieser Anforderungen wurden Untersuchungen zum Einfluss des Headerdesign auf Phasenverteilung und Strömungsform durchgeführt.

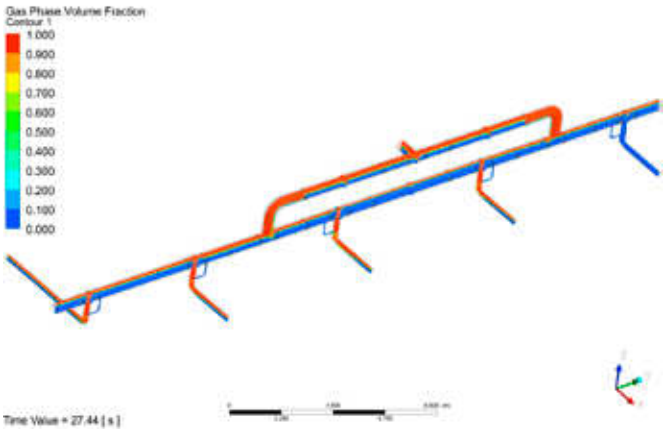


Abb. 16: Strömungsform und Phasenverteilung nach knapp 30 s Gaszuströmung bei Designbedingungen

In Abbildung 16 ist die untersuchte Anordnung dargestellt, einen Header mit symmetrischer Aufteilung des zugeführten Medienstroms und fünf an ein Verteilrohr angeschlossene Multiphasenpumpen. Die Stand-by-Maschine rechts ist abgesperrt.

Der Header verfügt über eingebaute Schwallbleche, die im oberen Bereich eine große Öffnung für den Gasdurchtritt und im unteren Bereich eine kleinere Öffnung zum Flüssigkeitsdurchtritt aufweisen.

Abbildung 16 zeigt den Strömungszustand nach 30 s reiner Gaszuströmung bei Designbedingungen. Deutlich ist zu sehen, dass das Gas in einer Schichtenströmung oberhalb der Flüssigkeit strömt und die Schwallbleche die Flüssigkeit zurückhalten.

Dieses Verhalten ändert sich grundsätzlich, wenn das Gas mit einer so hohen Geschwindigkeit durch den Header strömt, dass sich eine turbulente Strömung ausbildet, die die Flüssigkeitsfüllung aufnimmt und abtransportiert.

LAGERSTÄTTENVERHALTEN BEI MEHRPHASENFÖRDERUNG UND KOMPLEX VERNETZTEN FÖRDERSZENARIEN, SUBSEA, OFF- UND ONSHORE

Die Forderung nach umweltschonender Förderung und Transport von Erdöl und Erdgas in entlegenen Gebieten vor allem Offshore, vom Schelf bis in die großen Wassertiefen der Ozeane, insbesondere auch in rauen und eisbedeckten Seegebieten, lässt sich mit vernetzten Mehrphasen - Förder- und Transportsystemen erfüllen.

Ziel des Teilprojektes war, die erforderlichen Grundlagen für die Entwicklung integrierter vernetzter Mehrphasenfördersysteme bei Einbindung der Komponenten der Mehrphasen-Technologie [1] zu erarbeiten. Anhand von Fallbeispielen von Offshore-Lagerstätten der Regionen im zirkum-Atlantischen Raum und der Nordsee wurden konkrete Öl-

und Gasfelder in verschiedenen Förderszenarien bei Einsatz des neu entwickelten MDA-Downholeaggregates simuliert [2].

Für die Modellerstellung wurden die physikalischen Lagerstätteneigenschaften in geologische 3D-Modelle eingestellt, wie z. Bsp. Porosität und Permeabilität der Reservoirgesteine (Abb. 17).

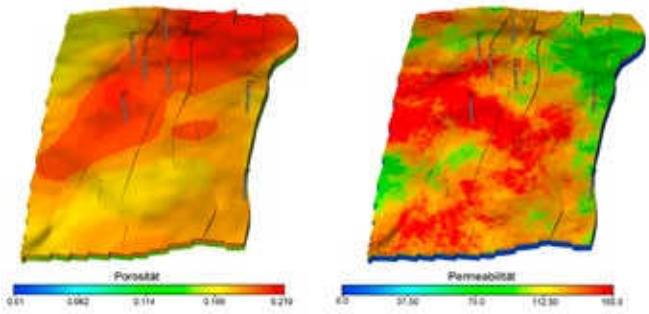


Abb. 17: Porositäts- und Permeabilitätsverteilung einer Öllagerstätte in 400 Meter Wassertiefe

Die Lagerstättenmodelle wurden für die dynamische Simulation des Förderprozesses, der natürlichen Fördermechanismen und für den MDA-Einsatz in IPM-Modellen („integrated production modelling") berechnet [3]. Für die Modellerstellung und die Simulation im Reservoir- und Production Engineering wurde die Software PETREL/ECLIPSE und PETEX (Sponsorship ©Schlumberger Ltd und Petroleum ExpertsTM) benutzt. Ausgewählt aus zahlreichen untersuchten Lagerstätten wird exemplarisch ein Ölfeld aus dem Golf von Mexiko (u. a. [4] und [5]) zur Produktionsoptimierung durch den Einsatz von MDA-Aggregaten an 6 Bohrungen gezeigt (Abb. 18).

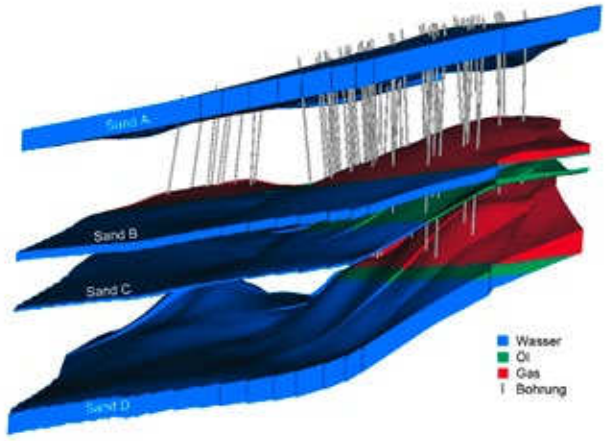


Abb. 18: Das initialisierte Modell (vor Produktionsbeginn) eines Ölfeldes im Golf von Mexiko; 40 Bohrungen, Reservoirfluid-Verteilung [6]

Die Kalibrierung des Modells wurde durch History Matching erreicht, den Vergleich der berichteten Produktionszahlen mit der Simulation, um die Anwendung der MDA-Downhole-Aggregate unter realistischen Bedingungen zu untersuchen (Abb. 19).

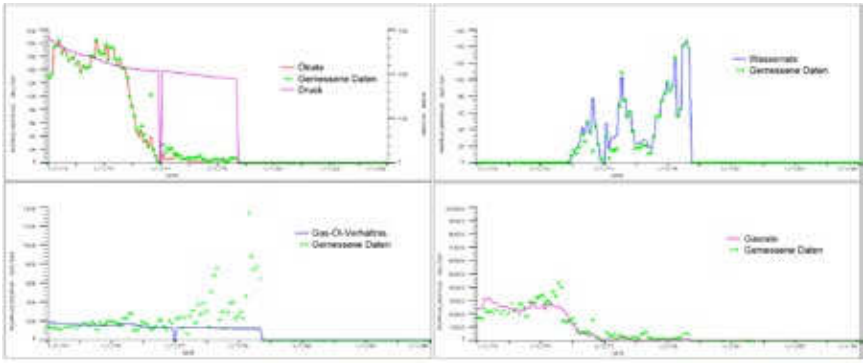


Abb. 19: „History match" einer Bohrung im Ölfeld; Förderrate Öl, Gas, Wasser, Gas-Öl-Verhältnis und Drucke

Durch die Prognose-Simulationen des MDA-Einsatzes konnte im Vergleich zur natürlichen Förderung häufig eine deutliche Verbesserung der Bohrungs- und der Feldes-Performance ([6] und [7]) in der Endausförderung und der Ölausbeute aufgezeigt werden (Abb. 20).

Abb. 20: Beispiel einer Ölproduktionsrate eines Ölfeldes und simulierte Prognose der natürlichen Förderung nach Infill Drilling und gegenüberstellt der Simulation des MDA- Einsatzes

Durch das Teilprojekt wurde die Basis für die Beurteilung der MDA-Applikation in der Förderung von Offshore Lagerstätten geschaffen.

FESTIGKEITSBEWERTUNG AUSGEWÄHLTER KOMPONENTEN VERNETZTER MEHRPHASEN-TRANSPORTSYSTEME BEI VERWENDUNG ALTERNATIVER WERKSTOFFE

Stetig steigende Anforderungen an die Komponenten vernetzter Mehrphasen-Transportsysteme in Sub-Sea und Off-Shore Anwendungen und die Forderung nach dem Nachweis eines zuverlässigen und wartungsfreien Betriebs derartiger Systeme machen die Einbeziehung alternativer Werkstoffe und deren Berücksichtigung in der Festigkeitsnachweisführung notwendig. Da keine ausreichend ausformulierten Nachweise für die in diesem Zusammenhang relevanten Werkstoffgruppen existieren, schafft dieses Teilprojekt, bezogen auf das beschriebene maritime Anwendungsumfeld, eine entsprechende Basis.

Ziel des Teilprojektes war somit die Ermöglichung des Einsatzes alternativer Werkstoffe in Strukturbauteilen von Maschinen aus dem maritimen Umfeld durch die Entwicklung geeigneter Methoden zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit der relevanten Werkstoffgruppen Nickel-Basis, Keramik und Hartmetall.

Hierzu wurde zunächst aus Mehrphasen-Transportsystemen eine Referenzkomponente ausgewählt und in einem detaillierten Finite-Elemente-Simulationsmodell abgebildet. Als dynamisch hochbelastetes Herzstück von Multiphasen-Schraubenspindelpumpen und Downholeaggregaten wurde die Förderschraube als Referenzkomponente für das weitere Vorgehen gewählt. Auf Basis der ganzheitlichen Erkenntnisse zur Beanspruchungssituation wurden nun für die drei alternativen Werkstoffgruppen sowie für einen Referenzedelstahl Ersatz-Geometrie Proben (EGP) abgeleitet. Diese Proben ermöglichen eine vergleichende Bewertung der Tragfähigkeit dieser Komponente für die genannten Werkstoffe unter Beibehaltung der Beanspruchungssituation, jedoch in einem reproduzierbaren und wirtschaftlichen Prüfumfeld.

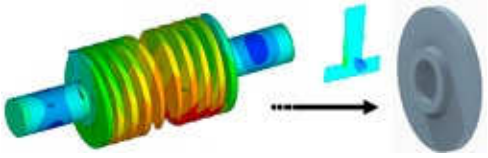


Abb. 21: Ableitung der EGP aus der Referenzkomponente

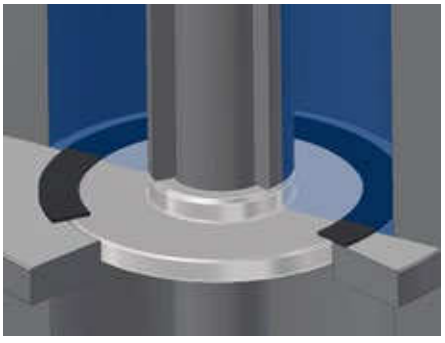


Abb. 22: Die EGP im Prüfaufbau

Für die entwickelten EGP wurde experimentell die jeweilige Ermüdungsfestigkeit der alternativen Werkstoffe für $4x10^6$ Lastwechsel bestimmt und auf den derzeit verwendeten Stahlwerkstoff referenziert.

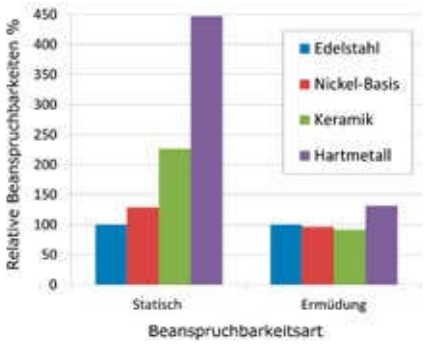


Abb. 23: Experimentell ermittelte Tragfähigkeiten der untersuchten Werkstoffe

Vor dem Hintergrund der korrosiven und abrasiven Leistungsfähigkeit der alternativen Werkstoffe bestätigen die Ergebnisse das vermutete Potential der untersuchten Werkstoffgruppen. Die durchgeführten Versuchsreihen wurden mittels allgemeiner Berechnungsmethoden aus der Literatur (u.a. [8], [9], [10]) bewertet und die Möglichkeiten und Grenzen der Berechnungsmethoden auf diese Weise identifiziert (bspw. [11]).

Abb. 24: EGP aus Nickel-Basis (A), Hartmetall (B), Keramik (C) und Edelstahl (D)

Für den untersuchten Nickel-Basis-Werkstoff wurden zudem die Berechnungsansätze zur Bestimmung der Wechselfestigkeit (u.a. [8], [12]) sowie der Einflüsse von Mittelspannung (u.a. [13]) und Kerbwirkung (bspw. [12], [14]) experimentell verifiziert. Hierzu wurden entsprechende einfache Proben (EP) zur isolierten sowie kombinierten Betrachtung der betreffenden Einflussgrößen entwickelt und anhand von Versuchsreihen jeweils die Ermüdungsfestigkeit für $4x10^6$ Lastwechsel bestimmt. Auf Basis der Versuchsergebnisse konnten nun die gesuchten Einflussfaktoren abgeleitet und in den zuvor für die Festigkeitsbewertung der Referenzkomponente entwickelten Berechnungsablauf integriert werden.

Abb. 25: EP aus Nickel-Basis in scharfer, milder und ungekerbter Ausführung (v.o.n.u.), sowie die relativen Beanspruchbarkeitsamplituden im Kerbgrund

Zur experimentellen Bewertung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse von der EGP auf die Referenzkomponente wurden abschließend Referenzversuche mit Förderschrauben aus dem untersuchen Nickel-Basis-Werkstoff im Prüffeld des Projektpartners ITT Bornemann durchgeführt.

HYBRIDSTECKVERBINDER FÜR DEN BETRIEB VON MEHRPHASEN DOWNHOLE AGGREGATEN

Im Rahmen des Teilprojekts wurde eine kompakte Hybridsteckverbindung für Hochtemperaturanwendungen entwickelt, die den praxistauglichen Betrieb von Mehrphasen Down Hole Aggregaten ermöglicht.

Im Anforderungsprofil wurden alle relevanten Informationen zusammengefasst und leicht zugänglich aufbereitet.

Basierend auf dem Anforderungsprofil und der daraus entwickelten Spezifikation wurde der Isolierkörper als zentrale Steckverbinderbaugruppe entwickelt, konstruiert und gefertigt.

Nachfolgend ist der Erstentwurf des Isolierkörpers für Stecker und Einbaudose abgebildet.

Abb. 26: Iso-Stecker

Abb. 27: Iso-Dose

Im Folgenden wurde die Beschaffung und Erprobung von Dichtelementen für das extrem hohe Temperaturniveau bearbeitet und die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung der Steckverbindung umgesetzt. Nach der Erstellung des Anforderungsprofils sowie der Grundauslegung des Isolierkörpers wurde ein erster Entwurf der Steckverbindung entwickelt, konstruiert und gefertigt.

Danach wurde die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung des Endgehäuses umgesetzt. Dabei war unter anderem die Langzeitdichtigkeit von unter Druck stehenden thermoplastischen Werkstoffen durch eine spezielle Vorspannung sicher zu stellen.

Im Rahmen des folgenden Arbeitspaketes flossen alle einzelnen Arbeitspakete dieses MPNet Teilvorhabens in die Herstellung des kompletten Demonstrators.

Es erfolgte die interne Erprobung der Hybridverbinder und die Auswertung der Versuchsergebnisse.

Daran anschließend erfolgte der gemeinsame Feldversuch unter der Leitung von ITT Bornemann.

Der Demonstrator erfüllte voll die Anforderung, insbesondere erwies sich der Anschluss des Down Hole Pumpen Aggregates mittels einer vorkonfektionierten Steckverbindung als eine signifikante Erleichterung der Arbeiten unter rauen Feldbedingungen.

Die im Rahmen des Teilprojekts definierten Projektziele wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgreich bearbeitet.

Die erarbeiteten Erkenntnisse können als Basis für zukünftige Hochtemperaturanwendungen für im maritimen Umfeld einzusetzende Steckverbinder genutzt werden.

ERWEITERUNG DER BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR MEHRPHASENPUMPEN AUF MDA'S IN LEITUNGSNETZWERKEN ZUR GEWINNUNG VON KOHLENWASSERSTOFFEN SUBSEA, ON- UND OFFSHORE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES BEDARFSGERECHTEN TRANSPORTS

Für die Förderung komplexer Kohlenwasserstoffgemische, wie sie in der Erdöl- und Erdgasförderung vorliegen, ist eine effiziente, sichere und ökologische Technologie zu entwickeln. Dies betrifft insbesondere Förderungen im maritimen Bereich wie in der Tiefsee und in polaren Gebieten. Für die Auslegung maritimer Multiphasentransportnetzwerke ist eine tiefgehende Kenntnis der physikalischen, thermo- und fluiddynamischen Mechanismen der Transportprozesse in mehrphasigen Fluidsystemen in vernetzten Rohrleitungen und in den mehrphasig durchströmten Apparaten und Maschinen notwendig. Da die Topographie am Meeresboden sehr rau und variabel ist, werden die Strömungsformen und Druckverluste von mehrphasig strömenden gesättigten Fluiden in geneigten Rohrleitungen im Technikumsmasstab experimentell und theoretisch untersucht. Berechnungsmodelle für diese liegen nun für spezielle Anwendungen vor. Transiente Vorgänge bei bestimmten Strömungszuständen

führen lokal zur Bildung von Gaspolstern und Rückströmungen, die auf metastabile Zustände hindeuten. Aus den Untersuchungen an Rohrleitungsnetzwerken folgt, dass die Mehrphasenströmung bei sehr einfachen Konfigurationen (glatte Rohrwände, Schichtenströmung eines ungesättigten Fluides) numerisch mit konventionellen Programmen unter Berücksichtigung der vielfältigen Vereinfachungen berechnet werden kann, für mehrphasig gesättigte reale Fluide in technisch rauen Transportnetzwerken mit diversen Komponenten (Flansche, Ventile, etc.) ist die experimentelle Validierung jedoch unabdingbar. Phasenwechsel, hervorgerufen durch lokale Sorptionseffekte, disperse Phasen wie Tropfen, Blasen etc., sehr durchmischte mehrphasige Systeme wie in der Schwallströmung oder starke Wechselwirkungen zwischen den Phasen sind durch numerische Simulationen nicht abbildbar. Daher wird ein theoretisches Modell zur heterogenen Keimbildung entwickelt und in die Berechnungsgrundlagen für MDA´s integriert, um die lokalen Vorgänge während der Sorption in engen Spalten zu berücksichtigen. Dies wird experimentell anhand eines sog. Pumpenmodells und eines MDA-Modells im Technikumsmasstab in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Betriebsparameter sowie Fluideigenschaften validiert. Die Auswirkungen der Änderung des Strömungsgasgehaltes durch Sorptionseffekte auf die azimutale Verteilung von Druck und Temperatur und damit auf die Leistung der MDA werden bestimmt.

WERKSTOFFVERHALTEN IN VERNETZTEN MULTIPHASENTRANSPORT-SYSTEMEN UNTER TRANSIENTEN BEDINGUNGEN („MPNET/WTB“)

Zur Erreichung einer umweltschonenden Multiphasenförderung von Erdöl und Erdgas in schwer zugänglichen Seegebieten ist es notwendig das Werkstoffverhalten bei Korrosionsangriffen zu kennen und vorhersagen zu können. Ziel des Teilprojekts „Werkstoffverhalten in vernetzten Multiphasentransportsystemen unter transienten Bedingungen“ ist die experimentelle und theoretische Ermittlung korrosionskritischer transienter Einflüsse auf das Schadensverhalten anwendungsbezogener Werkstoffe. Dieses Schadensverhalten kann mit dem entwickelten Modell der Risskorrosion mathematisch simuliert werden [15, 16].

Abb. 28 zeigt den Ablauf und die Einflussgrößen des im Arbeitspaket „mathematische Simulation: AP3“ verwendeten Modells. Die Gliederung in einen anodischen und einen kathodischen Anteil der Risskorrosion wurde für die Einteilung der Arbeitspakete übernommen. Im Arbeitspaket „Ermittlung von Repassivierungspotentialen: AP1“ sowie im Arbeitspaket „Ermittlung betriebsbedingter Korrosionsraten durch Sensoren: AP4“ erfolgten die experimentellen Untersuchungen des anodischen Einflussbereichs. Der kathodische Einfluss (Wasserstoffreduktion) auf das Werkstoffverhalten wurde im Arbeitspaket „Einfluss fluktuierender Temperaturen auf die Spannungsrisskorrosion: AP3“ untersucht.

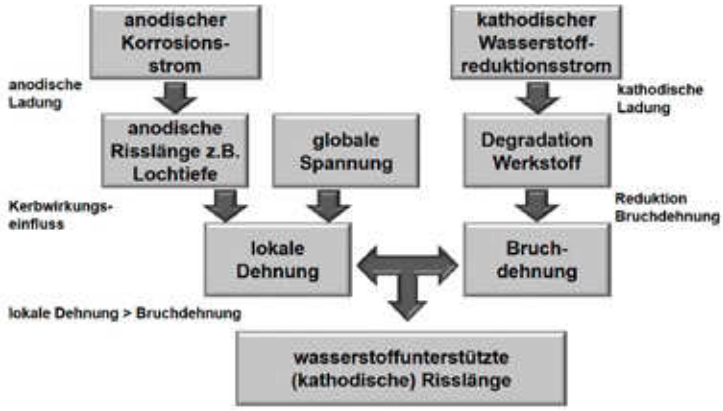


Abb. 28: Schematische Darstellung der Einflussgrößen auf die Risskorrosion nach [15]

ANODISCHER EINFLUSSBEREICH (AP1, AP4):

Eine Oberfläche mit lokalkorrosiven Schäden eines Rohres (Feldversuch) ist in Abb. 29 dargestellt. Diese Schäden konnten durch Korrosionssensoren quantifiziert werden. Die Untersuchungen (Feldversuch und Labor) zeigten, dass ermittelte Ladungsdichten mit den Schäden korrelieren (vgl. Abb. 30). Zudem wurde ein neues Versuchsablaufschema (Schwellenpotentialermittlung) für geschädigte Oberflächen (vgl. Abb. 30) entwickelt.

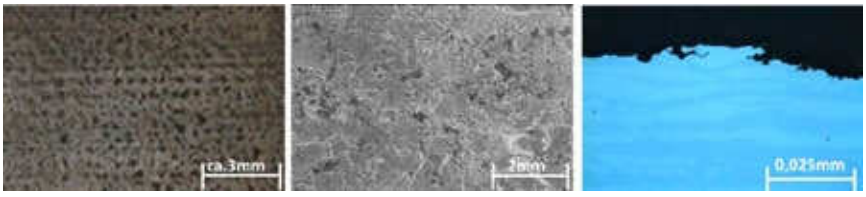


Abb. 29: Anode mit Schäden an den Rohrpositionen 12Uhr a) lichtmikroskopische Aufnahme b) REM-Aufnahme des Schadens c) Schliffbild

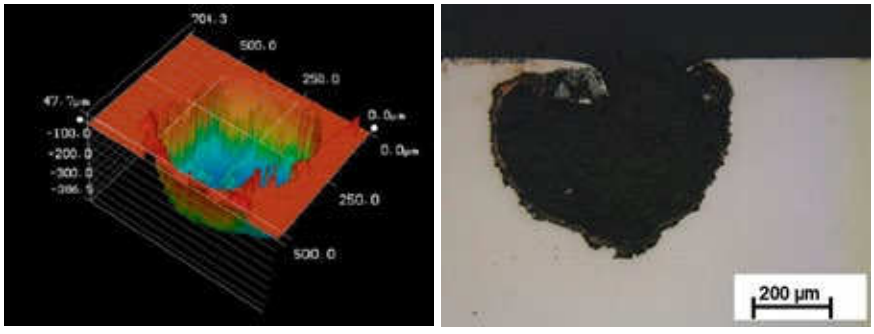


Abb. 30: Korrosionsloch im Stahl 1.4542 nach einer Flächenschädigung von 160 C/cm² a) dreidimensionale Darstellung b) Schliffbild

KATHODISCHER EINFLUSSBEREICH (AP2):

Im Projektzeitraum erfolgte die Untersuchung von den in Tab. 1 aufgeführten Stählen. Untersuchungsschwerpunkt war die Ermittlung der Degradation der mechanischen Eigenschaften durch Wasserstoffeintrag in den Werkstoff.

Tab. 1: Legierungszusammensetzungen und mechanische Eigenschaften der untersuchten Stähle

		Wichtige Legierungselemente in Massen-% (Durchschnittswerte)							Mechanische Eigenschaften		
Stahl	**Gefüge**	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	N	$R_{p0,2}$ in N/mm²	R_m in N/mm²	ε_B
1.4021	Martensit	0,19	13,00	-	-	-	-	-	740	850	0,16
HP2-13CR	Martensit	max. 0,04	13,00	5,00	2,15	-	-	-	780	870	0,20
1.4057	Martensit	0,17	16,00	2,00	-	-	-	-	755	900	0,17
1.4542	Martensit	max. 0,07	16,00	4,00	max. 0,60	4,00	max. 0,45	-	715	920	0,23
1.4016	Ferrit	max. 0,08	17,00	-	-	-	-	-	525	545	0,17
1.4462	Duplex	max. 0,03	22,00	5,50	3,00	-	-	0,17	465	675	0,43
1.3974	Super-Austenit	max. 0,03	22,75	16,75	3,10	-	0,20	0,40	995	1145	0,27

Abb. 31 zeigt exemplarisch die deutliche Reduktion der Bruchdehnung mit zunehmendem Wasserstoffeintrag Q. Die Ergebnisse ermöglichen eine wasserstoffabhängige Klassifikation der Stähle sowie eine umfassende Datenbasis für die Simulationsanwendung.

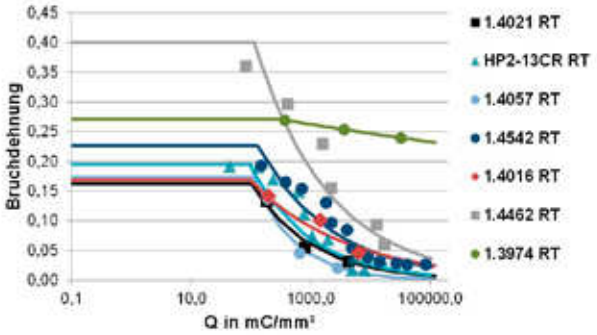


Abb. 31: Zusammenfassende Darstellung der Bruchdehnungen in Abhängigkeit der kathodischen Wasserstoffladung Q für die untersuchten Stähle für Raumtemperatur

Das Ergebnis des Teilprojektes besteht in der erweiterten Kenntnis des transienten anodischen Werkstoffverhaltens und der Bereitstellung bisher unbekannter Werkstoffeigenschaften der wasserstoffunterstützten Rissbildung. Zudem ermöglichen die mathematische Simulation Vorhersagen zum transienten Schadensverhalten sowie Aussagen für eine verbesserte Möglichkeit der Werkstoffauswahl und Betriebsführung bei der vernetzten Multiphasenförderung.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Mehrphasen-Downhole-Aggregat (MDA) wurde hinsichtlich Differenzdruckfähigkeit, Wartungsfreiheit und Lebensdauer weiterentwickelt und den gehobenen Anforderungen des Betriebes untertage angepasst. Ein vorkonfektioniertes Versorgungskabel mit neu entwickelten Hybrid-Steckverbindern erleichterte die Montage unter Feldbedingungen erheblich. Vernetzte Mehrphasen-Transporttechnik von der Lagerstätte bis zur zentralen Verarbeitung wurde unter besonderer Berücksichtigung bedarfsgerechten Betriebes untersucht. Mit Simulationen des Lagerstättenverhaltens wurden erfolgversprechende Installationsbedingungen sowie die zu erwartenden Förderraten ermittelt. Die Berechnungsgrundlagen für Multiphasenpumpen wurden auf die spezielle Geometrie von Bohrlochpumpen erweitert. Die Versagensmechanismen von hochverschleiß- und korrosionsbeständigen Werkstoffen wurden untersucht und eine Festigkeitsbewertung mittels eines Versuchsprogrammes erarbeitet. Das Werkstoffverhalten unter transienten Bedingungen wurde unter besonderer Berücksichtigung von Korrosionsvorgängen ermittelt.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundprojektes, beim Projektträger Jülich für die kompetente Betreuung sowie bei der Wintershall Holding GmbH für die Bereitstellung der Förderbohrung.

LITERATUR

[1] Mueller-Link, D.: Multiphase Boosting in Oil and Gas Production-Recent Applications and Developments. SPE paper 164757-MS, Society of Petroleum Engineers, 2013

[2] Brandt, J. U., Lewerenz, J., Müller-Link, D., Reichwage, M.: Development of a Multiphase Downhole Twin-screw Pump and its Use in Multiphase-operated Transport Networks, Article in Oil Gas European Magazine, 41(3):153-156, September 2015

[3] Ageh, E. A., Hermansen H. and Sylte J.E: Using Integrated Production Modelling (IPM) as an Optimization tool or Field Development Planning and Managemen, Society of Petroleum Engineers. 140625-MS, Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 31 July - 7 August 2010, Tinapa - Calabar, Nigeria

[4] Close, F., McCavitt, R. D., Smith, B.: Deepwater Gulf of Mexico Development Challenges Overview, Society of Petroleum Engineers SPE-113011-MS, SPE Conference Paper, 2008

[5] www.bsee.gov - (BSEE - The Bureau of Safety and Environmental Enforcement, USA), 2015

[6] Alwan, A. A., Dominik, W. R., & Lewerenz, J.: Numerical Simulations on the Applicability of Multiphase Down-Hole Twin-Screw Pumps MDA in Offshore Oilproduction, Society of Petroleum Engineers, SPE paper 183317-MS, 2016

[7] Alhasan, E. M., Buali, M., & Alanazi, R.: Extending Mature Field Production Life Using a Multiphase Twin Screw Pump. BHR Group, 2011

[8] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), 6. Edition, 2012

[9] Usbeck, A. K.: Auslegung von keramischen Strukturbauteilen unter mehraxialer statischer und zyklischer Beanspruchung, Dissertation, TU Hamburg-Harburg 2012

[10] Kindermann, P.: Ermüdungsverhalten von Hartmetallen und Cermets unter zyklisch wechselnder Beanspruchung zwischen 25°C und 900°C, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg 1999

[11] Peschkes, M. et al.: A new approach for the analytical hcf strength assessment of components from nickel-base alloys, Procedia structural integrity 2, 3202-3209, 2016

[12] Hück, M. et al.: Berechnung von Wöhler-Linien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss, synthetische Wöhler-Linien, VDEh-Bericht ABF 11, 1981

[13] Murakami, Y. et al.: Mechanism of fatigue failure in ultralong life regime, Fatigue and fracture of engineering materials and structures 25, 735-746, 2002

[14] TGL, Dauerfestigkeit der Maschinenbauteile, TGL-Standard, TGL19340/03, 1983

[15] HOFFMEISTER, H.: Modeling the Effect of Chloride Content on Hydrogen Sulfide Corrosion of Pure Iron by Coupling of Phase and Polarization Behavior, CORROSION Vol.64 (6), Houston 2008, S.483- 495

[16] HOFFMEISTER, H., BOELLINGHAUS, T.: Modeling of Combined Anodic Dissolution/Hydrogen-Assisted Stress Corrosion Cracking of Low-Alloyed Power Plant Steels in High-Temperature Water Environments, CORROSION Vol.70 (6), Houston 2014, S.563-578

SUGAR III –
SUBMARINE GASHYDRAT-RESERVOIRE

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX381A-H, J-N | 03G0856A-C

DR. MATTHIAS HAECKEL GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

EINLEITUNG

Das SUGAR-Projekt entwickelt Technologien, um Gashydratvorkommen im Meeresboden wirtschaftlich nutzen zu können. Dabei soll zum einen Erdgas aus Gashydraten produziert und zum anderen Kohlendioxid im Meeresboden gespeichert werden. Das Projekt läuft seit dem Jahr 2008 und wird vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel koordiniert. Hier soll über die Ergebnisse der dritten Projektphase berichtet werden, die von Oktober 2014 (BMWi) bzw. Januar 2015 (BMBF) bis Ende März 2018 lief.

Erdgas aus unkonventionellen Vorkommen hat in den letzten Jahren den Weltmarkt grundlegend verändert. Nordamerika ist heute nicht mehr auf den Import von Flüssiggas angewiesen, sondern exportiert Kohlenwasserstoffe aus unkonventionellen Quellen in andere Regionen und Erdteile. Methanhydrate werden weltweit als nächste unkonventionelle Erdgasressource angesehen. Insgesamt wurde in den letzten 15 Jahren ca. eine Milliarde US-Dollar für die Erforschung und Erschließung der Gashydrate ausgegeben. Dabei sind besonders die Südostasiatischen Staaten und weitere Länder aus dem pazifischen Raum aktiv (Japan, Südkorea, China, Indien, Taiwan, Neuseeland), da diese Region auf den Import von teurem Flüssiggas angewiesen ist und aufgrund des starken Wirtschaftswachstums einen ständig steigenden Bedarf an Erdgas hat.

Bisher wurde bei sechs Feldtests Erdgas aus Gashydratvorkommen produziert. Drei dieser Tests wurden an Land in Permafrost Gebieten (Kanada, Alaska) durchgeführt, die unter dem Eis Gashydrate führen und leichter zugänglich sind als der tiefe Meeresboden. Im Jahr 2012 wurde in Prudhoe Bay, Alaska, von Conoco Phillips, dem US-DOE und dem japanischen JOGMEC demonstriert, dass Methangas durch die Injektion von CO_2 aus Gashydraten freigesetzt und produziert werden kann. Das CO_2 reagierte dabei spontan mit den Methanhydraten im Untergrund, verdrängte das Methan aus der Gashydratstruktur und wurde selbst als thermodynamisch stabiles Gashydrat im Untergrund gespeichert. Die Produktionsraten von Methangas lagen bei ca. 1000 Nm3 pro Tag (Nm^3: Normkubikmeter Gas bei 1 atm Druck). Der erste offshore Produktionstest wurde im Frühjahr 2013 vom japanischen Gashydratprogramm MH21 im Nankai Trog in ca. 1.000 m Wassertiefe durchgeführt. Der Lagerstättendruck wurde abgesenkt, um die Gashydrate im Meeresboden in freies Erdgas und Wasser zu zersetzen. Das Erdgas wurde anschließend mit einer Rate von ca. 20.000 Nm^3 d-1 über eine konventionelle Bohrung gefördert. Nach sechs Tagen wurde der Test abgebrochen, da Sand in die Bohrung eindrang. Im Frühjahr 2017 haben

zwei weitere Offshore-Tests stattgefunden, nämlich der 2. Japanische Test im Nankai-Trog und der erste chinesiche Test im Südchinesichen Meer. Bei beiden wurde über mehrere Woche per Druckentlastung Erdgas gefördert. Der Test im Nankai-Trog förderte insgesamt 235.000 Nm^3 Gas, das Problem der Sandproduktion konnte jedoch nicht abschließend behoben werden. Im Shenhu-Gebiet, südlich der Mündung des Pearl-Flusses wurden innerhalb von 60 Tagen insgesamt etwa 300.000 Nm^3 Gas mit Raten von 5.000-35.000 Nm^3 pro Tag gefördert. Sandproduktion trat hierbei nicht auf und es wurde sehr wenig Wasser produziert, was den Verdacht nahelegt, dass vor allem freies Gas unterhalb der Methanhydratlagen produziert wurde.

Die bisherigen Feldtests bestätigen die Vermutung, dass die Produktionsraten zu gering sind, um bei Einsatz konventioneller Technik wirtschaftlich und gewinnbringend Erdgas aus submarinen Gashydratvorkommen zu fördern. SUGAR zielt daher darauf ab, neue und speziell angepasste Technologien zu entwickeln, mit denen Gashydratlagerstätten wesentlich kostengünstiger als bisher erkundet und erschlossen werden können. Nur auf diesem Weg wird es möglich, Gashydrate als neue unkonventionelle Erdgasquelle zu entwickeln.

In der 3. Phase des SUGAR-Projekts wurden die Gashydrat-Schlüsseltechnologien weiterentwickelt, die für die Erdgasproduktion aus marinen Gashydraten unverzichtbar sind und die besten Verwertungschancen für die am SUGAR-Konsortium beteiligten Firmen bieten. Die Arbeiten haben sich auf vier Themen fokussiert: (TP1) Geophysikalische Exploration und Datenauswertung, (TP2) Explorationsbohrtechnik, (TP3) Erdgasproduktion aus Gashydraten und (TP4) Technologien und Strategien zur Umweltüberwachung. In diesen vier Teilprojekten wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Exploration und Charakterisierung der Gashydratvorkommen im Paläo-Donaudelta zur Vorbereitung eines europäischen Feldtests mit SUGAR-Technologien,
- Entwicklung von geophysikalischen Multi-Parameter-Inversionsstrategien für eine verbesserte Abbildungsauflösung von Gashydratstrukturen unter dem Meeresboden,
- Bestimmung geophysikalischer Parameter und geotechnischer Strukturmodelle für eine bessere Quantifizierung der Hydratmengen in potentiellen Lagerstätten,
- Entwicklung von Bohrlochmess- und Steuertechnik für speziell angepasste mobile und möglichst autonome Bohrtechnik (MeBo200) zur kostengünstigen Gashydratexploration,
- Entwicklung einer Autoklav-Transferkammer zur druckerhaltenden Gewinnung von Bohrkernen und deren Überführung in Hochdrucklaboranlagen zur in situ Gashydratcharakterisierung,

› Konzeption einer großtechnischen Hochdruckanlage für geotechnische Untersuchungen von gashydrathaltigen Sedimenten,

› Geomechanische Charakterisierung der Gashydrat-Sediment-Struktur und Entwicklung geotechnischer Modelle zur Risikobewertung der Produktionstechniken sowie von Strategien zur Minimierung der Sandproduktion,

› Quantifizierung der zu erwartenden Gasproduktion für verschiedene Abbaustrategien am Beispiel der Vorkommen im Donau-Tiefseefächer,

› Entwicklung einer Monitoring-Strategie und eines Messprogramms zur Umweltüberwachung der Erdgasproduktion aus submarinen Gashydratlagerstätten

Als verbindendes Element wurden die Gashydratvorkommen im Donautiefseefächer erkundet, an dem die in den Teilprojekten entwickelten Technologien getestet und validiert wurden. Diese Arbeiten hatten bereits in der 2. Projektphase mit der geophysikalischen Vermessung während der M.S.MERIAN-Expeditionen MSM34 und MSM35 begonnen. Den Abschluss bildete dann zum Projektende die METEOR-Expedition M142, auf der mit dem erweiterten MeBo200-System die Gashydratvorkommen im Donautiefseefächer erstmals erbohrt wurden.

WICHTIGSTE PROJEKTERGEBNISSE

In Teilprojekt 1 wurden neue Technologien zur geophysikalischen Datenexploration entwickelt und anhand von Laborexperimenten kalibriert. Im Bereich „Joint Inversion" geophysikalischer Datensätze wurden integrative Arbeitsroutinen zur Konvertierung und Austausch zwischen Softwaremodulen entwickelt. Am Beispiel der Gashydratlagerstätten im Schwarzen Meer wurden die seismische NIP-Tomographie (TEEC) und 3D-CSEM Daten (GEOMAR) mittels optimierter Strukturmodelle (TERRASYS) verknüpft. Die gemeinsame Visualisierung wurde in der Open-Source Software Paraview realisiert. Ein weiterre Fokus lag auf der strukturellen und lithologischen Interpretation von OBS Daten. Hierzu wurden die „Full Wavefield Migration" und „Full Waveform Inversion" Methoden (KIT) adaptiert. Aus der Rekonstruktion von P- und S-Wellengeschwindigkeiten können so Gashydratsättigungen abgeleitet werden. Anhand der im Donau-Paläodelta auf den MSM34 und MSM35 Expeditionen gewonnenen seismischen und elektromagentischen Daten (GEOMAR, BGR) wurden detaillierte strukturelle und lithologische Modelle des Untergrunds entwickelt, die bereits zu einer Reihe wissenschaftlicher Publikationen führten. Die Arbeiten wurden durch Laborexperimente (GFZ) komplementiert, die die Parametrisierungen von P-Wellengeschwindigkeiten und elektrischem Widerstand als Funktion der Gashydratsättigung verbessern. Dies wird insbesondere die Joint Inversion stärken.

In Teilprojekt 2 wurde für das mobile Bohrgerät MeBo200, welches von den SUGAR Partnern MARUM und BAUER entwickelt und gebaut wurde, Bohrloch-Messtechnik für in-situ

Messungen (Antares, MARUM, TUBAF) entwickelt sowie mit Steuertechnik für das automatisierte Bohren in der Tiefsee ausgestattet (BAUER, Hatlapa, MARUM, TUBAF). Beides sind Grundvoraussetzungen, um die MeBo-Technologie für den industriellen Markt attraktiv zu gestalten und für einen kommerziellen Einsatz vorzubereiten. Zudem wurde die in SUGAR-I entwickelte Druckkernbohrtechnik für die Nutzung mit MeBo200 angepasst (Corsyde, MARUM), um Gashydratgehalte quantitativ zu erfassen und somit die Bohrlochmessungen validieren zu können. Auf mehreren MeBo200-Expeditionen wurden die entwickelten Komponenten erfolgreich getestet.

In Teilprojekt 3 wurden Erschließungs- und Produktionstechniken für marine Gashydratvorkommen entwickelt und untersucht. Der Fokus lag hierbei auf den konkreten Lagerstättengegebenheiten des Donaupaläodeltas im Schwarzen Meer, welches in TP1 geophysikalisch exploriert wurde und in TP3 schließlich auf der Expedition M142 mit MeBo200 erbohrt wurde (MARUM, GEOMAR). GEOMAR und Schlumberger haben ein geologisches Modell dieser Lagerstätte entwickelt und deren Bildung über die geologische Vergangenheit mittels des in SUGAR entwickelten Gashydratmoduls von PetroMod simuliert. Somit wurde dieses SUGAR-Produkt erfolgreich an einer realen Gashydratlagerstätte validiert. Parallel hierzu hat UMSICHT Erdgas-Produktionsszenarien für diese Methanhydratvorkommen simuliert. Neben den Kennzahlen für wirtschaftliche Produktionsraten stand auch die Identifizierung von Sicherheitsfaktoren, wie z. B. für Bohrlochstabilität, Verstopfung durch sekundäre Hydratbildung, im Vordergrund. Die Partner GEOMAR, GFZ, GZG und TUBAF haben zudem Hochdruckexperimente durchgeführt, um die Mikrostruktur der Sediment-Gashydrat-Verbünde und damit deren geomechanisches Verhalten, insbesondere in Bezug auf das in den Feldtests aufgetretene Problem der unkontrollierten Sandproduktion, besser zu verstehen. APS Wille und GEOMAR haben hierzu eine neuartige geotechnische Prüfanlage entwickelt und gebaut, die erstmalig die Untersuchung gekoppelter geomechanischer, thermischer und chemischer Prozesse unter fluiddynamischer Kontrolle erlaubt. GFZ und GEOMAR haben das makroskopische geomechanische Verhalten von Gashydraten in Sedimenten bei deren Bildung und Dissoziation unter statischen und dynamischen Bedingungen untersucht. In Ergänzung hierzu hat GZG die Mikrostruktur von Gashydrat in den Porenräumen des Sediments mittels Synchrotron-Röntgen-Mikrotomographie untersucht. Die entdeckten Erkenntnisse erfordern eine Neuinterpretation grundlegender geomechanischer und geophysikalischer Daten. TUBAF hat verschiedene Well-Test-Modelle in bezug auf die Sandproduktionsproblematik analysiert. Eine Lösung durch Einsatz von Multiphasenpumpen wird derzeit von TUBAF präferiert.

In Teilprojekt 4 wurde eine speziell angepasste Überwachungsstrategie entwickelt, die darauf abzielt, mögliche Methanleckagen sowie Deformationen des Meeresbodens bei der Erdgasproduktion aus Gashydraten frühzeitig und flächendeckend zu detektieren und zu quantifizieren. Wärtsilä ELAC Nautik hat die Funktionalität seiner Multibeam-Echolot-Systeme entsprechend verbessert, um Gasblasenaustritte besser zu lokalisieren und automatisch in den erhobenen Wassersäulendaten zu indetifizieren. Kongsberg Maritime haben ihre chemischen CH_4- und CO_2-Sensoren sowie ihr Singlebeam-Echolot optimiert. Zudem hat Kongsberg den Schiffseinsatz seiner Lander vereinfacht und die Datenlogger-

Kommunikation standardisiert. Somit ist ein erster Schritt zur Entwicklung bedienerfreundlicher Umweltmonitoringsysteme erfolgt.

INTERNATIONALE KOOPERATION

Die internationale Gashydratforschung ist stark auf den südostasiatischen Raum fokussiert. SUGAR kooperiert daher eng mit den nationalen Gashydratprojekten in Japan, Südkorea, Indien, China, Taiwan und Neuseeland. In SUGAR haben mit allen internationalen Akteuren viele gemeinsame Workshops und wechselseitige Besuche stattgefunden und es gab zahlreiche Expeditionen von SUGAR-Partnern, auf denen weltweit Gashydratvorkommen mit SUGAR-Technologien erkundet wurden. Hier sind insbesondere die intensiven Kollaborationen mit Neuseeland, Taiwan, Norwegen, Bulgarien, Rumänien, Türkei und China zu nennen. Die Europäischen Aktivitäten werden seit 3 Jahren im Rahmen der COST Action MIGRATE durch GEOMAR koordiniert.

Die SUGAR-Partner haben zudem ihre Ergebnisse in zahlreichen internationalen Konferenzen vorgestellt. Hervorzuheben sind hier die alle drei Jahre stattfindenden International Conference on Gas Hydrates (ICGH), auf der SUGAR im internationalen Vergleich immer überproportional mit Vorträgen vertreten war, was die herausragende Qualität und den international führenden Stand der SUGAR-Arbeiten unterstreicht.

WIRTSCHAFTLICHE VERWERTUNG UND TECHNOLOGIETRANSFER

Gashydrate werden bisher nicht wirtschaftlich genutzt. Es gibt also noch keinen Markt für Technologien und Geräte zur Erschließung und Ausbeutung von Gashydraten. Es gibt jedoch weiterhin ein steigendes Interesse an Gashydraten als zukünftige Erdgasquelle, vor allem im asiatischen Bereich (Japan, China, Südkorea, Indien, Taiwan, Neuseeland). Hiervon konnten aus dem SUGAR Konsortium z. B. die Firmen Schlumberger, Kongsberg und Wärtsilä profitieren, deren Produkte im Rahmen der Gashydratexploration dieser Länder sowie bei den japanischen und chinesischen Produktionstests eingesetzt wurden.

Die an SUGAR beteiligten Firmen haben zudem Technologien entwickelt, die nicht nur für die Nutzung der Gashydratvorkommen relevant sind, sondern viele weitere Anwendungsfelder haben. Sie stärken daher mit dem SUGAR-Projekt ihre Position auf den Märkten, auf denen sie heute schon aktiv sind. Weil Gashydrat im Wesentlichen gefrorenes Erdgas ist, können viele der in SUGAR entwickelten Technologien auf dem größten heute existierendem Markt für meerestechnische Produkte, nämlich dem Offshore Erdöl- und Erdgasbereich, genutzt und erfolgreich angeboten werden. Viele der entwickelten Technologien sind zudem auch im Bereich der Exploration und des Umweltmonitoring von Tiefseebergbau einsetzbar, so dass sich hier ein weiteres Geschäftsfeld eröffnen wird.

Im SUGAR-Konsortium hat sich eine enge Kooperation zwischen den beteiligten Firmen und akademischen Partnern entwickelt, auf deren Grundlage ein intensiver Wissens- und Technologietransfer stattfindet. Sowohl der akademische Sektor als auch die Firmen profitieren von diesem Austausch. Der Technologietransfer hat in vielen Fällen zu einer

deutlichen Verbesserung von Produkten und Stärkung der Firmen geführt. Als Beispiele seien die folgenden Entwicklungen genannt:

› Die entwickelten Algorithmen zur automatischen Objekterkennung haben die Einsatzmöglichkeiten der SeaBeam-Fächerecholote der Firma Wärtsilä ELAC Nautik deutlich erweitert. ELAC-Systeme sind auf fast allen chinesischen Forschungsschiffen installiert.

› Kongsberg Maritime hat kann im Bereich Umweltmonitoring eine Systemlösung mit verschiedenen Plattformen und Sensoren anbieten. Diese neu gewonnene Expertise hat ihnen bereits Aufträge im Rahmen des japanischen und des chinesischen Gashydratproduktionstests gebracht.

› Das von GEOMAR entwickelte Modul zur Simulation der Gashydratbildung hat das Softwarepaket PetroMod der Firma Schlumberger signifikant gestärkt und bereits neue Kunden gewinnen lassen.

› Die seegängigen Geräte der Firmen BAUER Maschinen, Kongsberg Maritime und Wärtsilä ELAC Nautik wurden auf zahlreichen Ausfahrten mit Forschungsschiffen erfolgreich getestet, die von den akademischen Partnern MARUM, GEOMAR und BGR durchgeführt wurden.

› Die von Antares entwickelten Bohrlochsonden sind auf mobile Bohrgeräte, wie MeBo70 und MeBo200 von BAUER als auch das Rockdrill des British Geological Survey, zugeschnitten. Dieser Typ Bohrgerät ist flexibler und viel kostengünstiger und gewinnt durch das Vorhandensein der Standard-Logging-Tools das Interesse der Industrie.

› Die von den Firmen TEEC und Terrasys weiterentwickelte Joint Inversion hat die Auswertung und Interpretation geophysikalischer Daten deutlich verbessert.

› Die von APS Wille und GEOMAR gebaute geotechnische Prüfanalage ist richtungsweisend, da sie erstmalig die Untersuchung gekoppelter geomechanischer, thermischer, chemischer und fluiddynamischer Prozesse erlaubt, die ebenfalls im Bereich Untergrundnutzung (Geothermie, Endlagerung, CO_2-Speicherung) und Schiefergasförderung (Fracking) von Bedeutung sind, vor allem um deren Umweltrisiken zu untersuchen.

.

INTER-THRUST –
UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER DYNAMISCHEN LASTEN UND WECHSELWIRKUNGEN AUF DAS BETRIEBSVERHALTEN VON SCHIFFSANTRIEBEN (VERBUNDVORHABEN IN MARTEC ERA-NET CALL 2014)

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX395A-C

PROF.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSOUD	Technische Universität Hamburg
DIPL.-ING. MAXIM BRADE	JASTRAM (Hamburg)
DR.-ING. JÖRN HINNENTHAL	JASTRAM (Hamburg)
DIPL.-ING. MICHAEL PALM	Voith Turbo (Heidenheim)
DIPL.-ING. PATRICK SCHILLER	Technische Universität Hamburg
DIPL.-ING. KEQI WANG	Technische Universität Hamburg

DynThrust–Ermittlung der dynamischen Lasten an einem Voith-Radial-Propeller (03SX395C)

Inter-SimPLex–Effiziente numerische Simulation des Verhaltens von Schiffsantrieben unter extremen Betriebszuständen (03SX395B)

Inter-DaPOTT–Entwurf und Optimierung der Leistungsfähigkeit von Querstrahlanlagen (03SX395A)

Laufzeit der deutschen Teilprojekte: 01.07.2015 bis 30.06.2018

MOTIVATION

Der Fokus im deutsch-norwegischen Verbundprojekt Inter-Thrust liegt auf den Lasten an Haupt- und Hilfsantrieben, die nicht durch die Nennlastbetrachtung abgebildet werden. Dies können Belastungen durch Umwelteinflüsse sein, z. B. Seegang, oder sie werden durch spezifische Einbaubedingungen, die im Entwurfsprozess noch nicht berücksichtigt sind, erzeugt. Diese meist instationären Lasten werden im Projekt unter dem Namen „off-design loads" zusammengefasst. Ziel des Projektes ist es, den vorhandenen Wissensstand um Erkenntnisse über diese Lasten zu erweitern und für den Entwurfsprozess zugänglich zu machen. Darüber hinaus werden Kennwerte erarbeitet, die die Prognose des Leistungsvermögens verbessern und eine erste Einschätzung zum Geräusch- und Vibrationseintrag erbringen.

Im vorliegenden Dokument werden einzelne Schwerpunkte des Forschungsprojekts vorgestellt, die von den deutschen Forschungspartnern bearbeitet wurden, um einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und Modellierungsansätze zu geben. Eine aus-

führliche Analyse und Bewertung der Ergebnisse findet sich in den referenzierten Abschlussberichten und Veröffentlichungen zum Vorhaben.

PARTNER DES VERBUNDPROJEKTS

Am Projekt Inter-Thrust sind 5 Partner beteiligt:

- SINTEF Ocean, Trondheim, Norwegen, Forschungsanstalt
- Havyard Group ASA, Fosnavag, Norwegen, Schiffsdesign und Werft
- Technische Universität Hamburg, Deutschland, Universität
- Voith Turbo, Heidenheim, Deutschland, Zulieferer im Schiffbau
- Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, Zulieferer im Schiffbau

Mit der Zusammensetzung des Konsortiums aus Universität, Forschungsanstalt, je einem Zulieferer für Haupt- und Hilfsantriebe und einer Werft mit umfassenden eigenen Entwurfs- und Forschungsaktivitäten ist eine breite Abdeckung der verschiedensten Kompetenzfelder in der Produktentwicklung und Anwendung gegeben.

THEMENSCHWERPUNKTE

In den folgenden Kapiteln werden einzelne Themenschwerpunkte behandelt, die in den deutschen Forschungsprojekten untersucht wurden. Darüber hinaus wurden im norwegischen Teilprojekt umfassende Studien zu folgenden Themen durchgeführt:

- Numerisches Setup für transiente Berechnung der Umströmung von Schiffsantrieben mit bewegten Gittern;
- CFD-Simulationen mit freier Oberfläche für die Untersuchung des Seegangseinflusses auf die hydrodynamischen Eigenschaften des Voith-Radial-Propellers;
- Transiente Simulation der Umströmung des Voith-Radial-Propellers beim Ruderlegen;
- Einfluss von Betriebsparametern wie z. B. der Spantgeometrie, Strömungsrichtung und Anordnung bei einfachen und bei Doppelquerstrahlanlagen.

UNTERSUCHUNGEN AN AZIMUTPROPELLERN (DYNTHRUST)

Im Rahmen des Teilvorhabens „DynThrust“ wurden an Azimuthpropellern Untersuchungen zu Lasten, die jenseits der Auslegungsbedingungen liegen, durchgeführt. Dabei wurden unterschiedlichste Betriebssituationen beleuchtet.

Bei entsprechender Anordnung der Propulsoren kann es im Betrieb zu unterschiedlichen Interaktionen kommen. Ein Effekt, der einen erheblichen Einfluss zum einen auf die mittleren Propellerkräfte und zum anderen auf die dynamischen Schwankungsamplituden aufweist, tritt in dem Fall auf, wenn ein Propeller im Nachstrom eines Nachbarpropellers arbeitet.

Ein Themenkomplex befasste sich daher mit der Bestimmung von Kräften auf Azimuthpropeller infolge der Anströmung durch einen benachbarten Propeller. Exemplarisch zeigt Abbildung 1 Auszüge aus einer Parametervariation, bei der der Azimuthwinkel des stromaufwärts liegenden Propellers variiert wurde. Ausgewertet wurden für den angestrahlten Propeller sämtliche Kräfte und Momente, um zum einen ein Maß für die vorliegende Lastsituation zu bekommen und zum anderen Aussagen darüber treffen zu können, wie sich die Schubeffizienz des stromabwärts liegenden Propellers in Abhängigkeit von den Anströmbedingungen verhält. Für einige Konfigurationen konnten Messwerte aus der Literatur herangezogen werden. In Abbildung 2 ist ein Vergleich des relativen Schubs des angeströmten Propellers in Abhängigkeit vom Azimuthwinkel des stromaufwärts liegenden Propellers aufgetragen. Die blaue Kurve zeigt Messwerte einer entsprechenden Testserie.

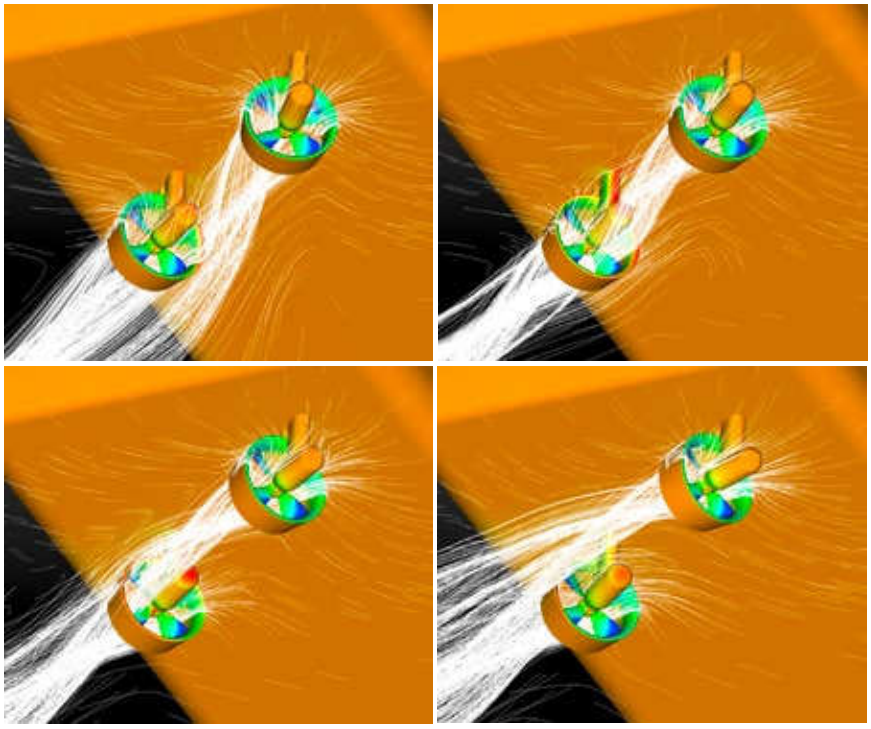


Abb. 1: Variation des Azimuthwinkels des stromaufwärts liegenden Propellers

Weitere Themenschwerpunkte lagen in der Aufbereitung von vollparametrischen Modellen des Azimuthpropellers, um diesen mit numerischen Methoden effizient untersuchen zu können. Weiterhin wurden im Vorfeld umfangreiche Validierungen der Simulationsmethode für die Propellerkräfte und –momente sowie die Geschwindigkeitsverteilung im Nachstrom durchgeführt. In systematischen CFD-Untersuchungen zur Schräganströmung wurden Kraftamplituden bestimmt und mit Messwerten verglichen. Ein weiterer Aspekt befasste sich mit der Optimierung der Gehäuseform im Hinblick auf ihre Versperrungswirkung vor dem Propeller. Ergebnisse dazu sind [2] zu entnehmen.

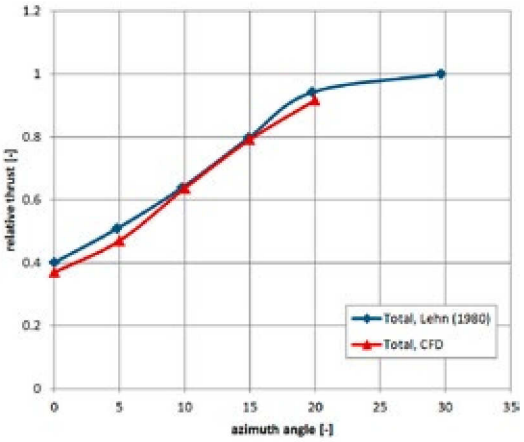


Abb. 2: Vergleich zwischen Messung und Simulation für Thruster-Thruster-Interaktion Einheit der x-Achse.

UNTERSUCHUNGEN AN QUERSTRAHLERN (INTER-DAPOTT)

Das Betriebsverhalten eines Querstrahlers wird maßgeblich durch den Zustrom zum Propeller beeinflusst. Anders als bei Hauptantrieben sind die Zustrom verbessernden Maßnahmen bei Querstrahlern aber nur ansatzweise ausgebildet. Dies ist ausreichend, solange ein Querstrahler nur als gelegentlich genutzter Manövrierantrieb betrieben wird. Mit den Anforderungen als Dauerantrieb zur dynamischen Positionierung oder mit besonderen Anforderungen in Nischenmärkten, die zunehmend an Bedeutung gewinnen, fallen Leistungsvermögen und Betriebsverhalten jedoch vermehrt ins Gewicht.

Neben dem Leistungsvermögen der Anlage, der Umsetzung von mechanischer oder elektrischer Leistung in Schubkraft, spielt das Vibrations- und Geräuschverhalten, d. h. der Eintrag von Schwingungen in die Schiffsstruktur, zunehmend eine Rolle.

Ähnlich wie ein Düsenpropeller erzeugt der Querstrahler einen Teil des Schubs am Propeller und an der umgebenden Schiffsstruktur (Analogie: Düse = Tunnel + Konus + Schiffsaußenhaut). Bei optimalen Einbaubedingungen, gut ausgebildetem Konus, geraden Schiffsseitenwänden und kurzem Tunnel, kann der Schub, der an der Schiffsstruktur erzeugt wird, 40 - 50% des Gesamtschubs ausmachen. Dieser Wert wird von den Herstellern von Querstrahlanlagen als Nennschub der Anlage angegeben.

Bei der Ansaugung des Propellerzustroms über das Getriebegehäuse entstehen hinter dem Getriebehals und hinter den mit Anoden besetzten Stützblechen ein Nachstrom und Ablösungen, die zu einer Asymmetrie im Propellerzustrom führen. Die Folgen sind eine vermehrte unstetige Kavitationsausbildung sowie Schub- und Drehmomentenpulse, typischerweise in der Blattfrequenz oder einem Vielfachen der Blattfrequenz.

Bei vermeintlich freier Zuströmung zum Propeller sind die Gestaltung des Tunneleinlaufs und die Neigung der Bordwand an der Einlaufstelle von großer Bedeutung. Bei nicht ausreichend ausgebildetem Einlaufkonus oder bei starkem Spantausfall können hier, auch

ganz ohne Vorwärtsgeschwindigkeit im Schiff, Einlaufwirbel entstehen, die sich vor allem bei kurzen Tunneln erheblich auf die Energieumsetzung am Propeller auswirken. Geräuschentwicklung und Leistungsvermögen können hierbei weit stärker negativ beeinflusst werden als bei der Zuströmung über das Getriebegehäuse. Abbildung 3 zeigt einen Einlaufwirbel bei „freier" Propellerzuströmung. Über dem Bereich der verzögerten und verwirbelten Strömung bildet sich beschleunigte Strömung aus; der Propellerzustrom im unteren Bereich des Tunnels ist somit massiv gestört.

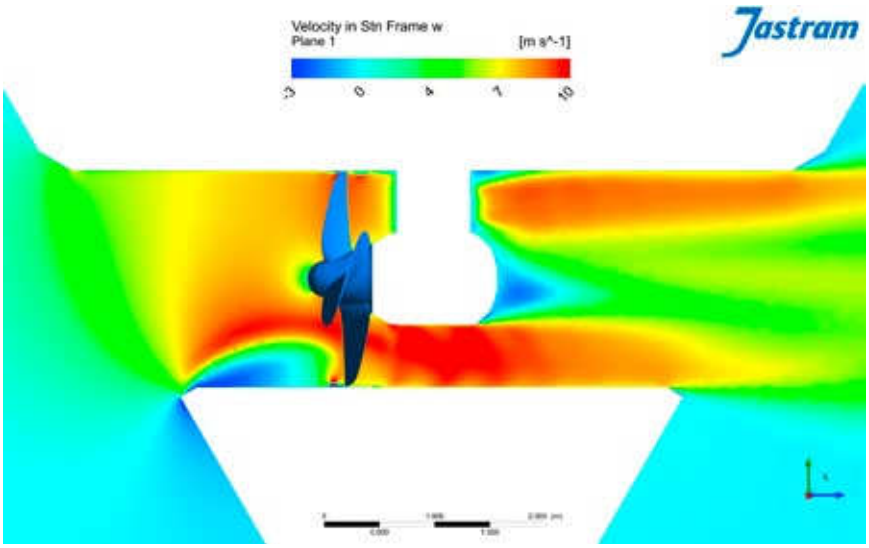


Abb. 3: Einlaufwirbel bei freier Propelleranströmung und 120° Spantwinkel, 30° Spantausfall

Die Untersuchungen hinsichtlich des Anlagenverhaltens zeigen, dass bei konstanter Drehzahl eines Festpropellers sich der Gesamtschub der Anlage bei einer Modifikation der Zuströmung, z. B. durch die Erhöhung des Spantausfalls am Tunneleinlauf, nur wenig verändert. Allerdings wird die Schuberzeugung mehr auf die Propellerseite verlagert, das Schiff leistet einen geringeren Schubbeitrag. Das Drehmoment des Propellers und damit die Leistungsaufnahme wachsen proportional zum Propellerschubanteil.

Daraus resultieren eine Erhöhung des Geräusch- und Vibrationseintrags in das Schiff und eine Verminderung des Leistungsvermögens der Querstrahlanlage. Da im Entwurfspunkt eine Leistungsaufnahme vereinbart ist, muss dieses Verhalten im Propellerentwurf berücksichtigt werden, oder die Drehzahl ist entsprechend zu korrigieren. In jedem Fall bleibt aber eine erhöhte Lärmentwicklung der Anlage bei schlechterem Schub/Leistungs-Verhältnis. Abbildung 4 zeigt die Beiträge von Propeller, Tunnelwänden incl. Einlaufkonus und Schiffsaußenhaut zum Gesamtschub in Abhängigkeit vom Spantausfall bei konstanter Tunnellänge. Der linke Teil der Abbildung gibt die Schubamplituden bezogen auf den gemittelten Schub als Beiwert wieder. Der überproportionale Anstieg der dynamischen Lasten bei zunehmendem Spantausfall ist deutlich zu erkennen.

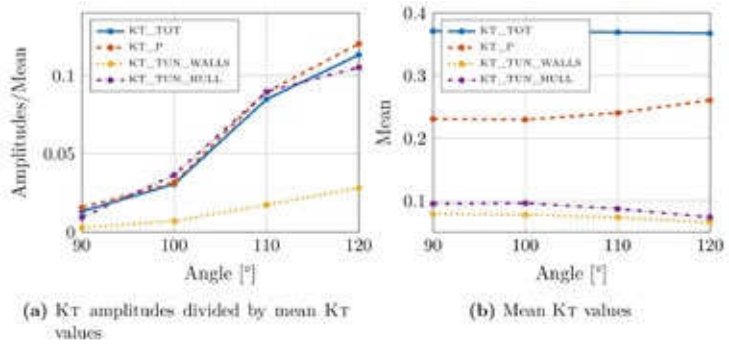


Abb. 4: Spantwinkelvariation, Schubbeiträge, Schubamplituden und Mittelwerte als Schubbeiwert

Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse basieren auf numerischen Simulationen für viskose Umströmung der Anlage, die mithilfe des ANSYS-CFX-RANSE-Lösers durchgeführt wurden. Dabei wurde das SST-Turbulenzmodell verwendet. Die Strömung wurde als einphasig und instationär betrachtet. Der verwendete Zeitschritt entspricht 4° Propellerdrehung. Das Kavitationsverhalten wird bei diesem Modellierungsansatz nicht abgebildet. Das Geräuschverhalten der Anlage wir daher nur im niederfrequenten Bereich (erste harmonische Propellerblattfrequenz) untersucht.

Abbildung 5 zeigt den Schub am Propeller während einer Propellerumdrehung in Abhängigkeit vom Spantwinkel bei konstanter Tunnellänge. Der Propeller arbeitet in freier Anströmung (pull condition). Die unterschiedlich starke Ausprägung der Schubamplituden ist auf den zunehmenden Einschlagwirbel bei größer werdendem Spantausfall zurückzuführen.

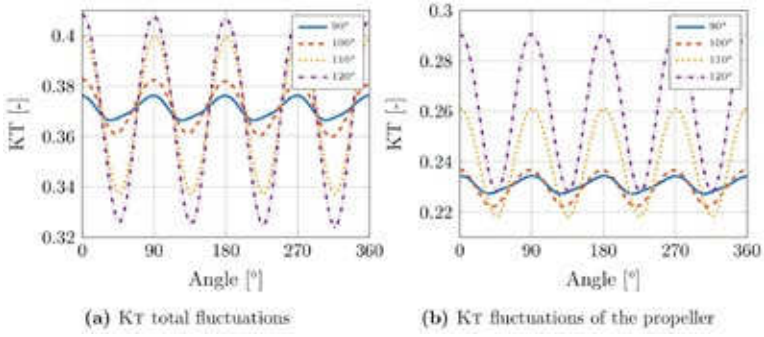


Abb. 5: Spantwinkelvariation, Schubschwankungen während einer Propellerumdrehung

Im Rahmen des Teilprojekts Inter-DaPOTT wurden Betriebsparameter, geometrische Eigenschaften und Ausstattungsmerkmale einer Querstrahlanlage systematisch variiert, um den Einfluss der Variation auf das Betriebsverhalten zu untersuchen:

› Tunnellänge: 2,5 bis 5-facher Propellerdurchmesser

› Spantausfall: senkrechte Bordwand (90° zur Tunnelachse) bis 30° Spantausfall (120°)

› Einlaufgeometrie: Einlaufkonus, zwei Rundungstypen, Einlauf ohne Konus

› Einlaufgitter: 8 verschiedene Gittervarianten

› Propeller: 4 und 5-Flügler, 3 Varianten mit verschiedenem Skew

› Strömungsrichtung: Zustrom über das Getriebe (push condition) und freier Zustrom (pull condition)

› Propellersteigung: Schubgleichheit bei verschiedenen KQ-Werten für 4 Propeller

Die Ergebnisse der Studien sind im Abschlussbericht des Projekts [3, Fkz.: 03SX395A] und in einer Serie von Technical Statements [4a-f] zusammengefasst.

SIMULATION VON SCHIFFSMANÖVERN UNTER EINBEZIEHUNG DES QUERSTRAHLRUDERS (INTER-SIMPLEX)

Im Rahmen des Teilvorhabens Inter-SimPLex wurde ein Rechenverfahren zur Simulation von Schiffsmanövern unter Einbeziehung der Einflüsse des Querstrahlers und des Hauptantriebs entwickelt. Das Verfahren ist in der Lage, bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten u. a. Drehkreismanöver mit und ohne Querstahlruder zu berechnen. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen Schiffsrumpf und Propeller in der Simulation berücksichtigt.

Im Allgemeinen kann das Manövrierverhalten von Schiffen mithilfe verschiedener Verfahren bestimmt werden wie experimentelle Untersuchungen, Nutzung empirischer Datenbanken, hydrodynamische koeffizientenbasierte oder RANS-Verfahren. Letztere können eingesetzt werden, um mithilfe der berechneten Umströmungskräfte direkte Simulationen eines Schiffsmanövers durchzuführen oder um die hydrodynamischen Koeffizienten zu berechnen, die anschließend zur Simulation von Manövern des untersuchten Schiffes verwendet werden.

Die direkte Simulation eines Schiffsmanövers mittels CFD stellt jedoch sehr hohe Anforderungen an das verwendete Rechenverfahren für Schiffsumströmung, da neben der Schiffsbewegung die Wirkungen des Propellers, des Ruders und deren Wechselwirkung möglichst genau berechnet werden müssen, was eine erhebliche Steigerung der erforderlichen Rechenkapazität mit sich bringt. Außerdem muss für jedes Manöver eine neue, gesonderte Simulation durchgeführt werden.

Das koeffizientenbasierte Verfahren bietet hingegen eine größere Flexibilität durch die Möglichkeit, beliebige Schiffsmanöver zu simulieren. Jedoch müssen die auf das Schiff infolge der Schiffsbewegung wirkenden Strömungskräfte mithilfe von Koeffizienten vor

Beginn der Simulation bestimmt werden. Dies kann experimentell oder numerisch erfolgen. Dabei können zwei Techniken eingesetzt werden:

Bei der einen Technik wird das Modell frei gefahren, gleichzeitig werden Propellerschub und Ruderkraft sowie die Trajektoriendaten bestimmt. Anschließend kann eine Systemidentifikationsmethode eingesetzt werden, um mithilfe der ermittelten Daten die Manövrierkoeffizienten zu bestimmen.

Bei der anderen Technik vollführt der Schiffsrumpf bestimmte Bewegungen, gleichzeitig werden die Strömungskräfte, die auf den Rumpf wirken, sowie Propellerschub und Ruderquerkraft experimentell oder numerisch ermittelt. Die vorgegebenen Bewegungen für den Schiffsrumpf sind zumeist periodisch, und sie sind so gewählt, dass eine genaue Trennung der Manövrierkoeffizienten erfolgen kann.

Für die Umsetzung der Bewegungen in den Modellversuchen wird meistens ein Planar-Motion-Mechanism (PMM) verwendet. Ebenso können dieselben Bewegungen numerisch abgebildet werden. Dabei werden die auf den Schiffsrumpf wirkenden Kräfte aufgrund der erzwungenen Bewegungen mit einem RANS-Verfahren bestimmt. In der Simulation kann die Wirkung der Steuerungsorgane wie Ruder oder Querstrahler auf die Schiffsumströmung durch die Einbindung von vereinfachten Modellen berücksichtigt oder die Geometrie der Steuerungsorgane vollständig modelliert und deren Umströmung einbezogen werden.

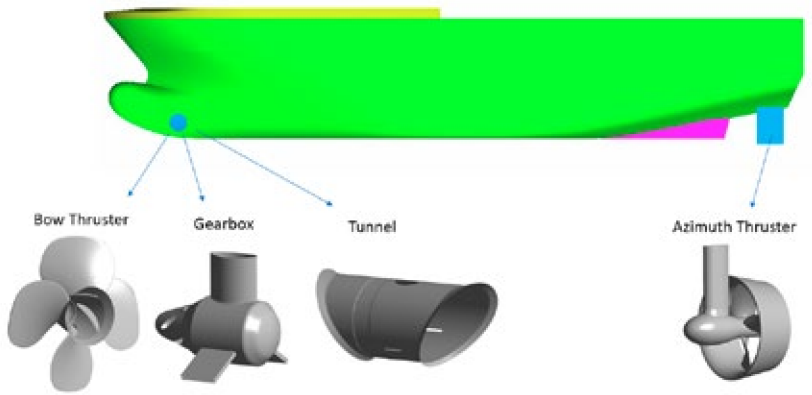


Abb. 6: Untersuchtes Offshore-Versorger-Schiff inklusive Querstrahler und Hauptantrieb.

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde ein Offshore-Supply-Versorger-Schiff untersucht, siehe Abbildung 6. Das Schiff ist 74,4m lang und verfügt über einen Querstrahler und einen Azimuththruster als Hauptantrieb mit einem Propellerdurchmesser von 4,2m.

Da der Bugstrahler nur bei geringer Schiffsgeschwindigkeit einsetzbar ist, können Tauch-, Stampf- und Rollbewegungen des Schiffes vernachlässigt werden. Durch die Wirkung des Tunnelthruster-Strahls entstehen asymmetrische hydrodynamische Kräfte und Momente, die

bei der Anwendung der Taylorreihenentwicklung berücksichtigt werden müssen. Dadurch unterscheidet sich das verwendete Koeffizientenmodell von dem von Abkowitz vorgeschlagenen Ansatz für symmetrische Schiffe. Die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Schiffsrumpf, Bugstrahler und dessen Propellerstrahl führt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Druckverteilung nicht nur im Bugstrahlerbereich, sondern auch auf dem gesamten Schiffsrumpf (siehe Abbildung 7). Durch das induzierte Unterdruckgebiet entsteht eine Querkraft, welche die Wirkung des Querstrahlers unterstützt.

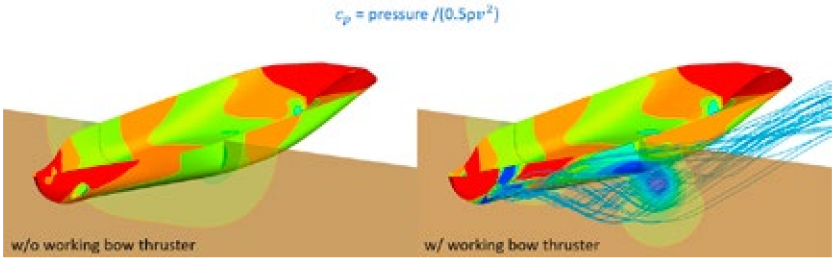


Abb. 7: Druckverteilung auf dem Rumpf ohne (links) und mit (rechts) arbeitendem Querstrahler

Die Berechnung der hydrodynamischen Koeffizienten erfolgt mithilfe des ANSYS-CFX-RANSE-Lösers. Dabei werden stationäre und instationäre Simulationen für viskose Strömung durchgeführt. In den stationären Simulationen werden die Dämpfungsterme berechnet. Für die Berechnung der Beschleunigungsterme werden instationäre Simulationen zur Abbildung der reinen Längs-, Quer- und Gierbewegungen sowie der kombinierten Quer-Gierbewegungen durchgeführt. Das Schiff führt hierzu eine erzwungene harmonische Bewegung aus. Die Zeitverläufe der Kräfte entlang der Längs- und Querachse (X, Y) und des Moments um die vertikale Achse (N) des Schiffes werden mithilfe der Fourierreihenentwicklung in eine Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen zerlegt. Mittels eines Koeffizientenvergleichs mit der umgewandelten Taylorreihe werden die hydrodynamischen Koeffizienten bestimmt.

Abbildung 8 zeigt die Zeitverläufe der dimensionslosen Kräfte und Momente während der Bewegungen über eine Periode bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 2 m/s. Die Längskraft X, die Querkraft Y und das Giermoment N wurden mit Schiffslänge und Geschwindigkeit dimensionslos gemacht. Durch die Wirkung des arbeitenden Burgstrahlers sind die Mittelwerte der dimensionslosen Y' und N' von Null verschieden. Da der Bugstrahler bei jeder Umdrehung eine gewisse Fluktuation der Kräfte verursacht, zeigen die entsprechenden Kurven in jedem Zeitpunkt einen minimalen und einen maximalen Wert.

Bei der Entwicklung des Manövriermodells wurden die hydrodynamischen Koeffizienten für den Rumpf ohne den Bugstrahler entwickelt, und anschließend wurde der Einfluss des Querstrahlers mithilfe von Interaktionskoeffizienten bestimmt, die hauptsächlich die Drehkreisparameter wie Längsweg und taktischen Durchmesser beeinflussen.

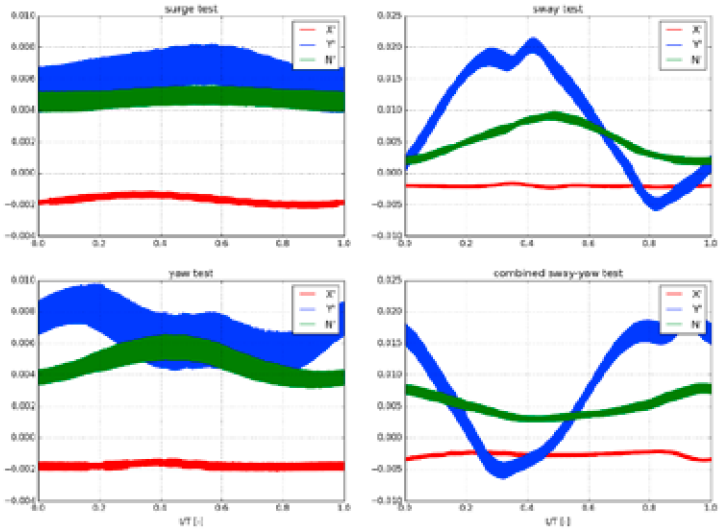


Abb. 8: Berechneter Verlauf der Kräfte und der Momente bei der Bestimmung der Manövrierkoeffizienten

In Abbildung 9 sind die Trajektorien von zwei Drehkreismanövern zu sehen. Die schwarze Kurve zeigt die Simulationsergebnisse mit arbeitendem Bugstrahler unter Berücksichtigung der Wechselwirkung des Querstrahlers mit dem Rumpf, und die blaue Kurve zeigt den deutlich abweichenden Bahnverlauf für das Drehkreismanöver, das ohne Berücksichtigung der Interaktionskoeffizienten berechnet wurde, was zu einem unrealistischen Bahnverlauf führt.

Bei den Simulationen ist die Berücksichtigung des Einflusses der kombinierten Kräfte, die durch den arbeitenden Hauptantrieb und den Bugstrahler erzeugt werden, auf die Manövriereigenschaften von besonderem Interesse.

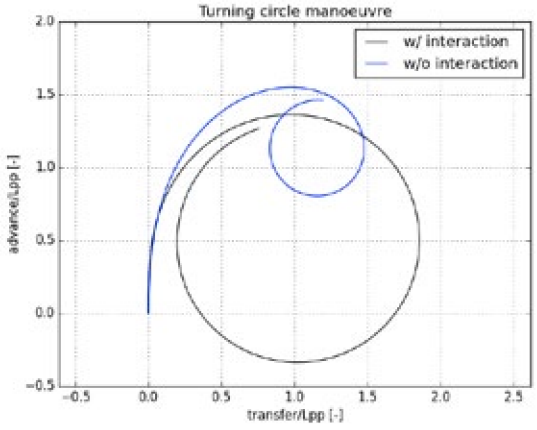


Abb. 9: Berechnetes Drehkreismanöver mit und ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Propellerstrahl und Rumpf

Zur Überprüfung des numerischen Modells wurden verschiedene Drehkreismanöver simuliert. Dabei wurden die Drehzahlen des Querstahlerpropellers und des Azimuththrusters beibehalten. Bei allen simulierten Manövern erzeugt der Querstrahler eine Kraft, die nach Steuerbord gerichtet ist. Der Azimuthwinkel (ψ) wurde in 5 Schritten von -20° bis 20° variiert, wobei bei einem negativen Winkel die Querkraft des Azimuththrusters die Drehung des Schiffes unterstützt, während sie bei einem positiven Winkel dagegen wirkt. Die Simulationen wurden bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 2m/s durchgeführt. Wie in Abbildung 10 dargestellt, wächst der Durchmesser des Drehkreismanövers von ψ = -20° bis +20°. Weil zudem bei positivem ψ-Winkel die Querkräfte durch den Querstrahler und den Hauptantrieb in die gleiche Richtung (nach Steuerbord) zeigen, entsteht eine zusätzliche Verschiebung des Drehkreises in Querrichtung. Die maximale Differenz des taktischen Durchmessers zwischen den Manövern mit ψ = -20° bis +20° beträgt etwa 40%.

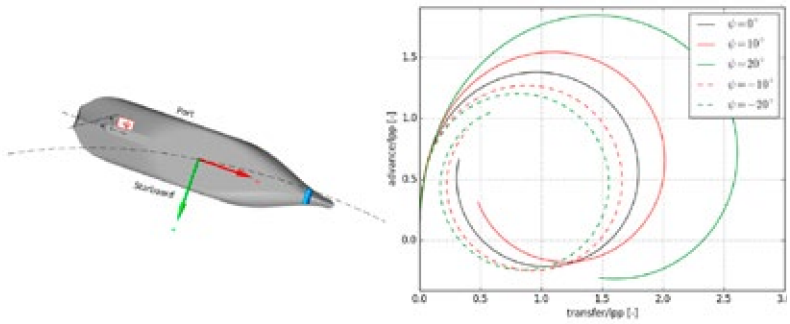


Abb. 10: Berechnetes Drehkreismanöver mit unterschiedlichen Azimuthwinkeln

Im Rahmen des Teilprojekts Inter-SimPLex wurde ein Rechenverfahren zur Simulation von Drehkreismanövern unter Einbeziehung der Einflüsse des Querstrahlers und des Hauptantriebs entwickelt. Das Verfahren erlaubt die Untersuchung der Auswirkungen folgender Betriebsbedingungen auf die Parameter des Drehkreismanövers: Steuerwinkel des Hauptantriebs, Anzahl an Bugstrahlern, Schiffsgeschwindigkeit und Drehzahl des Querstrahlers.

Die Ergebnisse des Teilprojekts Inter-SimPLex sind im Abschlussbericht [1] und in den Veröffentlichungen [6] und [7] zusammengefasst.

Durch den Einfluss der Querstahler spielen die nichtlinearen Koeffizienten eine wichtige Rolle bei der Simulation von Schiffsmanövern. Deshalb ist eine genaue Bestimmung dieser Koeffizienten notwendig. Daher sind bei der Auswahl der Bewegungsparameter für die Durchführung der numerischen Simulationen große Amplituden zu bevorzugen.

Bei der Bestimmung der Manövrierkoeffizienten ist es erforderlich, die Wechselwirkung zwischen dem Propellerstrahl der Querstahler und dem Rumpf genau zu berücksichtigen. Deshalb können die Ergebnisse der periodischen Bewegung nur in die Auswertung einbezogen werden, wenn der Propellerstrahl voll ausgebildet ist.

Wenn das Schiff in die Drehbewegung startet, ändern sich die Zuströmung zum Querstahler sowie der Verlauf des Propellerstahls. Diese Änderungen sind stark von der Gestaltung des Vorschiffs (Wasserlinienwinkel), der Bugform und der aktuellen Gierwinkel abhängig. Da die Strömung sehr sensibel auf o. g. Parameter reagiert, kann die Entwicklung des Propellerstrahls unterschiedlich ausfallen, selbst unter sehr ähnlichen Betriebsbedingungen. Dies kann die Genauigkeit der Simulation negativ beeinflussen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im maschinenbaulichen Entwurf und in der Klassifizierung von Schiffsantrieben werden die Nennlasten um Sicherheitsfaktoren erhöht, um den Auswirkungen dynamischer Lasten auf die Bauteiltragfähigkeit gerecht zu werden. Damit sind die Anlagen dann in der Regel hinsichtlich statischer Belastung und in Bezug auf Ermüdungsbelastung betriebssicher ausgelegt. Der Versuch, mit Hilfe der Nennlasten oder eines Nennschubes das Betriebsverhalten des Antriebes oder das Manövrierverhalten des Schiffes oder einer schwimmenden Struktur abzubilden, greift jedoch bei Weitem zu kurz. Die Auswirkungen von Einbausituation, Umweltbedingungen und Fahrzustand auf das Antriebsorgan müssen berücksichtigt werden. Sie haben einen deutlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und auf die dynamischen Eigenschaften des Antriebes selbst. Schubverluste und Vibrationserregung unter diesen „off-design conditions" rücken im Entwurf mehr und mehr in den Fokus und müssen im Entwurfsprozess berücksichtigt werden.

Um in diesem Themenbereich dynamische Lasten und Systemantworten zu bestimmen, wurden umfängliche CFD-Untersuchungen an Neben- und Hauptantrieben von Schiffen in instationären Betriebsbedingungen durchgeführt.

Exemplarisch wird hier gezeigt, wie Interaktionsphänomene in verschiedenen Betriebssituationen von Azimuthantrieben die Schubeffizienz, Kräfte und Momente des stromabwärts liegenden Propellers in Abhängigkeit von den Anströmbedingungen beeinflussen.

Für Querstrahlanlagen wird der Einfluss von geometrischen Parametern wie dem Spantwinkel am Einbauort und der Strahlertunnellänge auf das Betriebsverhalten im Hinblick auf Schwankungen in Schub, Drehmoment und Druck an definierten Stellen entlang des Tunnels und des Getriebegehäuses untersucht.

Die Ergebnisse der dynamischen Simulationen werden in einem Rechenverfahren zur Simulation von Schiffsmanövern unter Einbeziehung der Einflüsse des Querstrahlers und des Hauptantriebs genutzt. Das Verfahren erlaubt die Untersuchung der Auswirkungen folgender Betriebsbedingungen auf die Parameter des Drehkreismanövers: Steuerwinkel des Hauptantriebs, Anzahl an Bugstrahlern, Schiffsgeschwindigkeit und Drehzahl des Querstrahlers. Erste Vergleiche machen deutlich, dass eine Berücksichtigung der dynamischen Lasten und Betriebsbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Vorhersage der Manövrierfähigkeit haben und daher nicht vernachlässigt werden sollten.

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt unseren norwegischen Forschungspartnern:

› Vladimir Krasilnikov und Kourosh Koushan bei der SINTEF Ocean, die mit großem Engagement numerische Untersuchungen, Auswertung und Bewertung, Umsetzung in Entwurfswerkzeuge und nicht zuletzt auch die Projektkoordination übernahmen.

› Kristian Steinsvik und Arve Nedreberg von Havyard, die kritisch und mit wachem Verstand auf die Anwendbarkeit der gewonnenen Ergebnisse achteten und das Projekt mit Daten aus Versuchen und realistischen Schiffsgeometrien unterstützten.

Nicht zuletzt gilt unser Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des PtJ, die uns stets umfassend und zuvorkommend mit Rat und Tat zur Verfügung standen, und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für seine finanzielle Unterstützung.

LITERATUR

[1] M. Abdel-Maksoud, K. Wang, P. Schiller: Inter-SimPLex, Efficient numerical simulation of the behaviour of marine propulsion systems under extreme operating conditions, TUHH-FDS Technical report, Hamburg, Deutschland, 2018, Abschlussbericht, Fkz.: 03SX395B

[2] M. Palm: DynThrust, Ermittlung dynamischer Lasten an einem Voith-Radial-Propeller, Voith Turbo GmbH & Co. KG, Heidenheim, Deutschland, 2018, Abschlussbericht, Fkz.: 03SX395C

[3] M.Brade, J. Hinnenthal: InterDaPOTT, Design and Performance Optimization of Transverse Thrusters, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018, Abschlussbericht, Fkz.: 03SX395A

[4a] M. Brade, G. Erb, J. Hinnenthal, Influence of Frame Angle on Tunnel Thruster Performance, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018

[4b] M. Brade, G. Erb, J. Hinnenthal, Influence of Propeller Design on Tunnel Thruster Performance, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018

[4c] M. Brade, G. Erb, J. Hinnenthal, Influence of Protection Grids on Tunnel Thruster Performance, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018

[4d] M. Brade, G. Erb, J. Hinnenthal, Influence of Tunnel Inlet Design on Thruster Performance, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018

[4f] M. Brade, G. Erb, J. Hinnenthal, Influence of Tunnel Length on Tunnel Thruster Performance, Jastram GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland, 2018

[5] N. Berchiche, V. Krasilnikov, K. Koushan, Analysis of Dynamic Loads on Azimuthing Ducted Propulsor under Off-Design Operation Conditions, Fifth International Symposium on Marine Propulsors SMP'17, Espoo, Finland, 2017

[6] 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.

[7] 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.

HYMOTT –
HYDRODYNAMISCHE OPTIMIERUNG DER MANÖVRIERFÄHIGKEIT VON OFFSHORE TRANSPORT- UND TRANSFERSYSTEMEN

FÖRDERKENNZEICHEN 03SX390A-C

PROF. DR.-ING. THOMAS RUNG	Technische Universität Hamburg-Harburg
DIPL.-ING. TORBEN MÜHLBACH	Technische Universität Hamburg-Harburg
DR.-ING. JOCHEN MARZI	HSVA
DR.-ING. YAN XING-KAEDING	HSVA
DR.-ING. DIRK JÜRGENS	Voith Turbo
DIPL.-ING. DAVID BENDL	Voith Turbo
DIPL.-ING. MICHAEL PALM	Voith Turbo

KONSORTIUM

› Voith, FKZ 03SX390A
Anwendung der entwickelten Algorithmen am Beispiel des Voith Inline Thrusters

› HSVA, FKZ 03SX390B
Hydrodynamische Optimierung der Seegangs- und Positioniereigenschaften von Offshore-Transportschiffen

› TUHH, FKZ 03SX390C
Modellierung von Offshore-Transportsystemen im Kontext von Overset-Netzen

MOTIVATION

Durch den anwachsenden Lebensstandard und die rasch fortschreitende industrielle Entwicklung von Schwellenländern, wie z. B. Indien oder Brasilien, wird sich der globale Primärenergiebedarf in Zukunft anhaltend erhöhen. Für die kommenden Jahrzehnte wird daher zum einen ein weltweites Wachstum der Offshore Öl- und Gasförderung erwartet, sowie zum anderen – insbesondere in Deutschland und Europa – ein sehr intensiver Ausbau der Energiegewinnung aus erneuerbaren Energien durch Installation von Offshore-Windparks.

Der Trend sämtlicher Offshore-Aktivitäten geht zu größeren Wassertiefen und größeren Distanzen zum Festland. Hiermit sind deutlich schwierigere Umgebungsbedingungen für die sichere und effiziente Installation, Wartung, Versorgung sowie den Rückbau der Anlagen aber auch hohe Geschwindigkeitsforderungen verbunden. Die Offshore-Industrie ist daher auf immer effizientere und leistungsfähigere Transport- und Transfersysteme angewiesen, deren Einsatzgrenzen in Bezug auf Wind, Seegang und Strömung einen möglichst unter rechungsfreien Betrieb ermöglichen sollten. Die Bedeutung der Einsatzgrenzen und des

Risikomanagements von Offshore-Transportsystemen kann an den hohen Charterkosten erkannt werden. Hinzu kommen Kosten für eine verspätete Inbetrieb-nahme der Offshore-Bauwerke. Da die Bauwerke in der Regel einen Wert von mehreren hundert Millionen Euro besitzen und bei Unfällen eine erhebliche Gefahr für die Umwelt darstellen, müssen bei deren Transport und Installation höchste Sicherheitsstandards eingehalten werden.

Die technischen Herausforderungen bestehen in der zuverlässigen Verfügbarkeit von großen, redundant und effizient ausgelegten Schleppleistungen in Kombination mit hochwertigen Systemen zum dynamischen Positionieren, sowohl mit als auch ohne Schlepp- bzw. Schublast. In diesem Zusammenhang gibt es zahlreiche bisher nicht ausreichend erforschte hydrodynamische Aspekte, sowohl auf der Ebene des Gesamtsystems als auch auf Bauteilebene. Die technischen Ziele des Vorhabens waren die Untersuchung dieser Aspekte, sowie die simulationsgestützte Sicherstellung der Leistungsfähigkeit von Offshore-Transportsystemen bzw. den hierfür verantwortlichen Bauteilen unter realen Bedingungen. Hiermit soll das technische und wirtschaftliche Risiko gemindert bzw. das Marktpotenzial gesteigert werden.

THEMENSCHWERPUNKTE DER TEILVORHABEN

Voith Turbo

Anwendung der entwickelten Algorithmen am Beispiel des Voith Inline Thrusters

In dem Forschungsvorhaben wurden Simulationswerkzeuge entwickelt, um genauere Vorhersagen zur Schuberzeugung eines Voith Inline Thrusters (VIT) unter realen Einbaubedingungen treffen zu können.

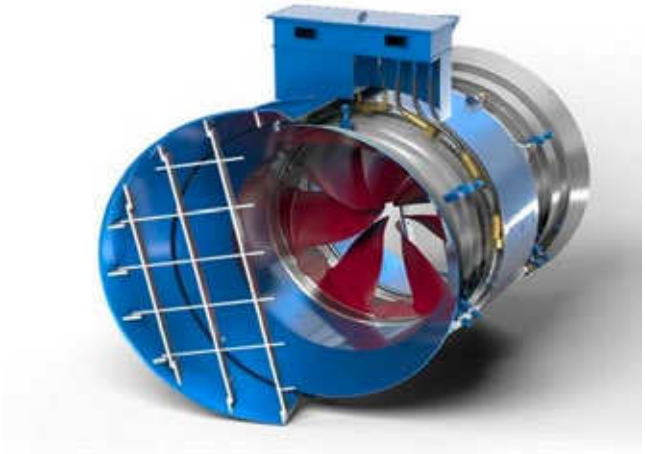


Abb. 1: Aufbau eines Voith Inline Thrusters

Dabei sind vollparametrische Geometriebeschreibungen mit anschliessender automatisierter Vernet-zung implementiert worden, die zum einen für die durchgeführten Parameterstudien genutzt wurden. Zum anderen sorgen sie auch dafür, dass in der täglichen Projektarbeit jede spezifische Einbausituation abgebildet werden kann und genaue Prognosen zur

effektiven Schuberzeugung erfolgen können. Dies ist ein großer Fortschritt in der täglichen Projektarbeit verbunden mit einem Qualitätsgewinn.

Die durchgeführten Parameterstudien zu verschiedenen Einbausituationen haben wertvolle Hinweise auf relevante Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf die Güte der Schuberzeugung gegeben. Die etablierte Optimierungskette hat verbesserte Parameterkombinationen für die Gestaltung der Flowparts des Voith Inline Thrusters geliefert. Mit diesem Werkzeug werden nun Schritt für Schritt alle weiteren Komponenten des Propulsors in Bezug auf eine Verbesserung der Effizienz der Schuberzeugung hin untersucht.

Exemplarisch sind im Folgenden die Ergebnisse für einer Parameterstudie gezeigt. Bei zwei nebeneinander platzierten VIT wurde der Abstand der Rotationsachsen variiert. Die Werte betrugen 1.48D, 2.22D und 2.96D. Für den kleinsten Abstand wurde zusätzlich ein Thruster deaktiviert, um den Bezug zu einem einzelnen Thruster herstellen zu können. Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit des Gütegrades vom Abstand bezogen auf den Gütegrad eines einzeln betriebenen Thrusters. Es zeigt sich, dass mit abnehmendem Abstand der Wirkungsgrad leicht sinkt. Allerdings fällt der Unterschied von ca. 1.2 % für den geringsten Abstand eher gering aus. Abb. 2 zeigt die Geschwindigkeitsverteilungen in einer horizontalen Ebene durch die Rotationsachsen. Beim Teilbild oben links ist der zweite Thruster inaktiv, um einen Referenzwert für den Einzelbetrieb zu erhalten.

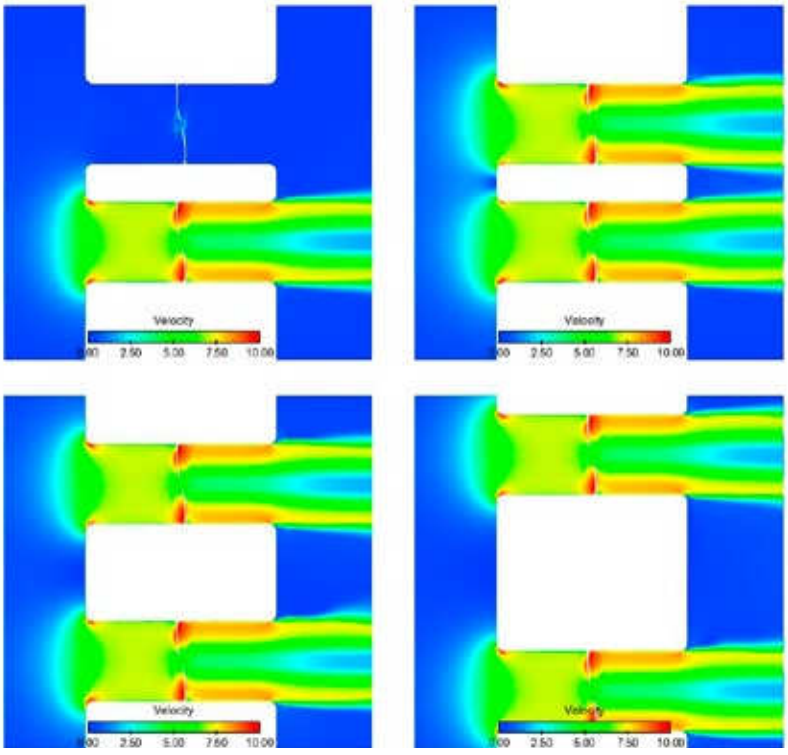


Abb. 2: Geschwindigkeitsverteilung für zwei benachbarte VIT (oben links nur ein VIT aktiv)

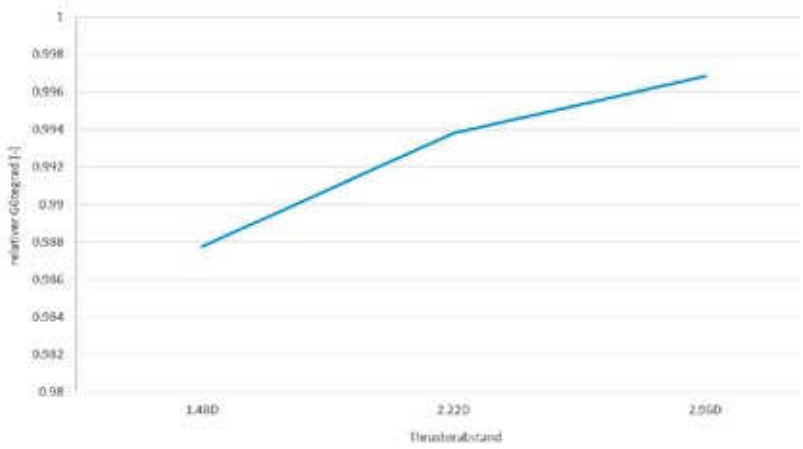


Abb. 3: Prozentualer Gütegradabfall bei Betrieb benachbarter VIT

HSVA

Hydrodynamische Optimierung der Seegangs- und Positioniereigenschaften von Offshore-Transportschiffen

Im dem von der HSVA bearbeiteten Teilvorhaben wurde die Weiterentwicklung und Anwendung numerischer Methoden zur Analyse der hydrodynamischen Wechselwirkungen von Manövrierorganen untereinander und mit der Umwelt, im speziellen mit Wellen im Seegang, durchgeführt. Dabei waren nicht nur die Einflüsse des Seegangs auf die Manövriereigenschaften von Interesse, sondern auch der Beitrag der Manövrierorgane zum Seegangszusatzwiderstand und damit die erzielbare Schiffsgeschwindigkeit im Seegang. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der Auslegung und Anordnung von Manövrierorganen berücksichtigt werden und genauere Leistungsprognosen für die Fahrt im Seegang ermöglichen.

Ein Beispiel zeigt eine umfangreiche Untersuchung für ein Kreuzfahrtschiff, mit dem im BMWi-Vorhaben PerSee ausführliche Modellversuche durchgeführt wurden. Dort wurden zwei verschie¬dene Bugformen untersucht. Abb. 4 zeigt ein Beispiel von verwendeten Oberflächen-Netzen für die beiden Bugformen. Abb. 5 zeigt Beispiele berechneter Verformungen der freien Oberfläche für Schrägwellen bei 150° und Wellen von der Seite bei 90°. Der Vergleich der Zusatzwiderstandsbeiwerte CAW und die Übertragungsfunktion (RAO) der Wellenamplitude hinter dem Schiff als Funktion des λ/LPP Verhältnisses bei beiden Bugformen zwischen Messungen und CFD Ergebnisse ist in Abb. 6 zu entnehmen. Generell ist es zu erkennen, dass die Ergebnisse zwischen Messungen und CFD sehr gute Übereinstimmungen bei allen berechneten λ/LPP Verhältnisse zeigen. Bei der zweiten Bugform ohne Bugwulst zeigt sich in den Messungen ein deutlich geringerer Widerstandsbeiwert bei kürzeren Wellen. Dieser Trend wird in den CFD-Ergebnissen qualitativ bestätigt. Die gleiche Tendenz ist auch in der Übertragungsfunktion (RAO) der Wellenamplitude hinter dem Schiff zu erkennen.

Ein zweites Beispiel zeigt die Untersuchung des Seegangszusatzwiderstandes eines VWT-Modells von VOITH. Der Schlepper fährt mit einer Geschwindigkeit von 12 Knoten (FN=0,32) voraus in ankommenden Wellen von vorne. Abb. 7 zeigt das Oberflächennetz für das Schiff (links) und die berechnete freie Oberflächen-Verformung für Wellen von vorne bei λ/LPP =1 (rechts).

Der Vergleich der Zusatzwiderstandsbeiwerte CAW und die Übertragungsfunktion der Schiffsbewegungen zwischen Messungen und CFD-Ergebnissen als Funktion des λ/LPP (Abb. 8) zeigt gute Übereinstimmungen.

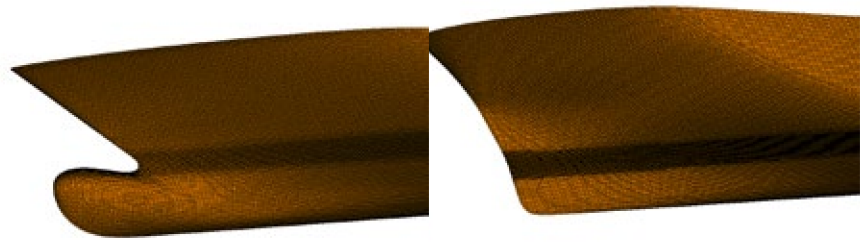


Abb. 4: Oberflächennetz für das Kreuzfahrtschiff: Form I mit Bugwulst (links) und Form II ohne Bugwulst (rechts)

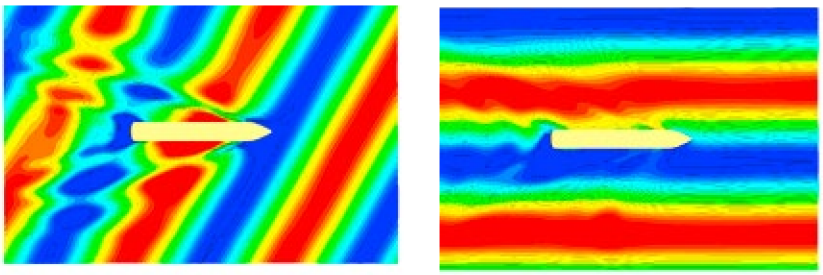


Abb. 5: Berechnete freie Oberflächen-Verformung für Schrägwellen von vorne bei 150° (links) und 90° (rechts)

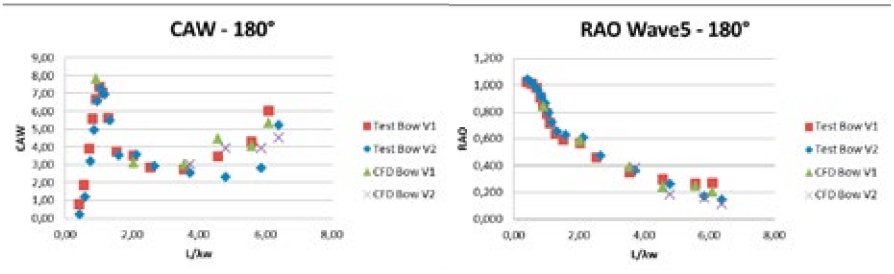


Abb. 6: Vergleich der Zusatzwiderstandsbeiwerte CAW (links), die Übertragungsfunktion (RAO) der Wellen¬amplitude hinter dem Schiff (rechts) als Funktion des λ/LPP - Verhältnisses zwischen Messungen und CFD-Ergebnissen bei Wellen von vorne.

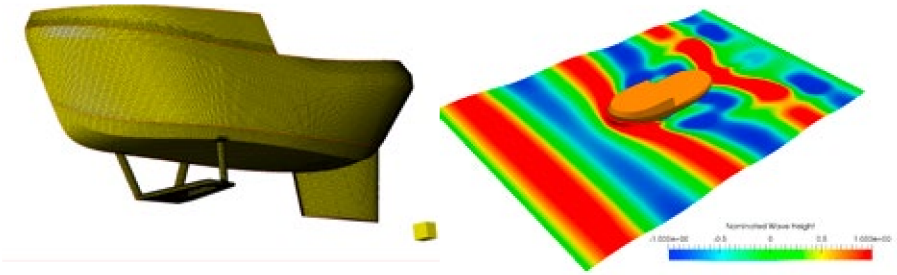


Abb. 7: Oberflächennetz für das VWT (links) und berechnete freie Oberflächen-Verformung für Wellen von vorne bei λ/LPP =1 (rechts).

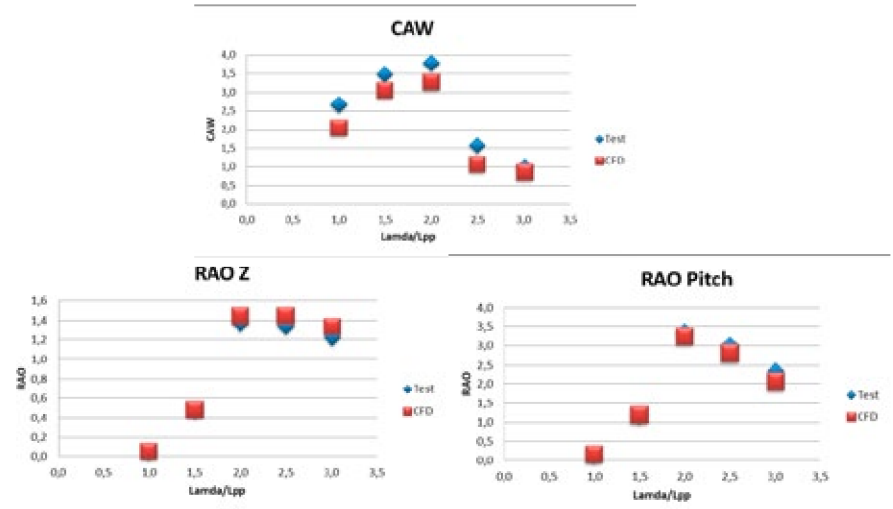


Abb. 8: Vergleich der Zusatzwiderstandsbeiwerte CAW (oben), RAO Tauchen (links) und RAO Stampfen (rechts) zwischen Messungen und CFD-Ergebnisse als Funktion des λ/LPP.

Die im Rahmen des HyMOTT-Teilprojektes HOTSPOT durchgeführten Arbeiten stellen einen signifikanten Fortschritt bei der quantitativen Bestimmung des Einflusses der Schiffsform sowie von Manövrierorganen wie Bugstrahlrudern auf den Seegangszusatzwiderstand eines Schiffes dar. Damit werden die Grundlagen für eine echte Optimierung des Leistungsbedarfes von Schiffen im Seegang gelegt.

TUHH

Modellierung von Offshore-Transportsystemen im Kontext von Overset-Netzen

Ziel dieses Teilvorhabens war die Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur hydrodynamischen Analyse und Optimierung von Hochseeschleppern zum Transport und zur Installation von Offshore-Bauwerken. Hierfür musste initial die Funktionalität der vorhandenen Finite-Volumen Simulations-umgebung FreSCo+ erweitert werden, um damit anschließend geeignete Werkzeuge zur Verfügung stellen zu können.

Überlappende Gitter:

Für alle weiteren Untersuchungen wurde die Methode der überlappenden Gitter für das Zusammen-spiel mehrerer hydrodynamisch interagierender Körper, die durch Berührung oder extreme Nähe zueinander nicht durch die für eine Kopplung normalerweise erforderliche Fluidschicht getrennt sind, erweitert. Diese Zellen werden mithilfe künstlicher Randbedingungen behandelt.

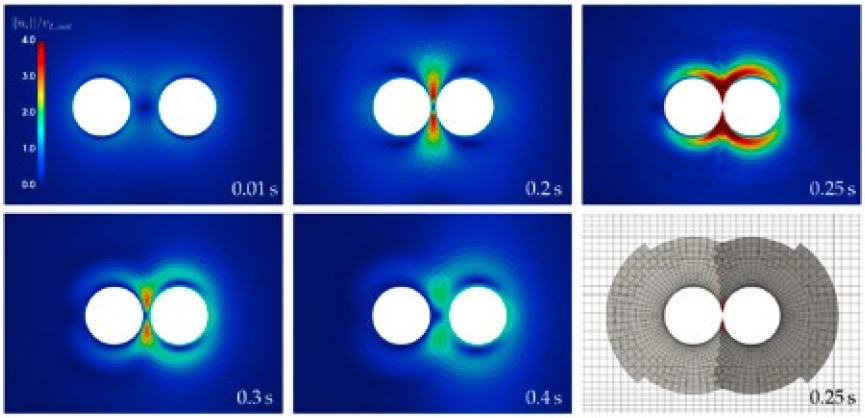


Abb 9: Kollision zweier Zylinder. Unten rechts sind die drei überlappenden Gitter zum Kollisions-zeitpunkt dargestellt. Die mit künstlicher Randbedingung behandelten Zellen sind rot markiert.

Neben starken Verbesserungen der Paralleleffizienz wurden Effekte einer nicht konservativen Trennflächenbehandlung analysiert und Massenerhaltungsstrategien eingeführt, die zu einer substantiellen Verbesserung für die Simulation von Einphasenströmungen führen.

Mehrkörpersysteme:

Für die Simulation komplexer Mehrkörpersysteme wurden realistische numerische Trossen- und Fendermodelle entwickelt und als Kraftmodule in das existierende Mehrkörpermodul integriert. Hierzu wurde die Simulationsumgebung um diverse Kopplungselemente wie steife oder elastische Seile, Fender etc. erweitert.

Zur Validierung der zuvor entwickelten mechanischen Elementarmodelle für die Untersuchung von Seegangseinflüssen wurde ein Schlepper untersucht und die Ergebnisse mit experimentellen Daten der SVA Potsdam (2013) verglichen. Nach der Implementierung von Führungsseilen zur Lagerung des Modells in Schrägsee wurden die numerischen Ergebnisse erfolgreich mit den Übertragungsfunktionen aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben PerSee verglichen.

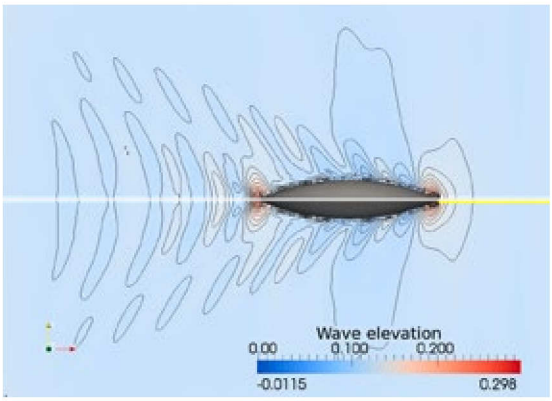


Abb. 10: Wellenbilder eines Widerstandsversuches mit einem fixierten Schiff (oben) und einem durch ein Seil gehaltenem Schiff (unten).

DETAILANALYSE & MODELLIERUNG THRUSTER

Für dieses Arbeitspaket wurde die tangentiale und radiale Schubverteilung eines Voith Inline Thrusters mithilfe einer aufgelösten RANS Simulation untersucht. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Volumenkraftmodell abgeleitet und dem Projektpartner zur Verfügung gestellt. Dieses Modell umfasst sowohl die axialen als auch die tangentialen Schubkomponenten.

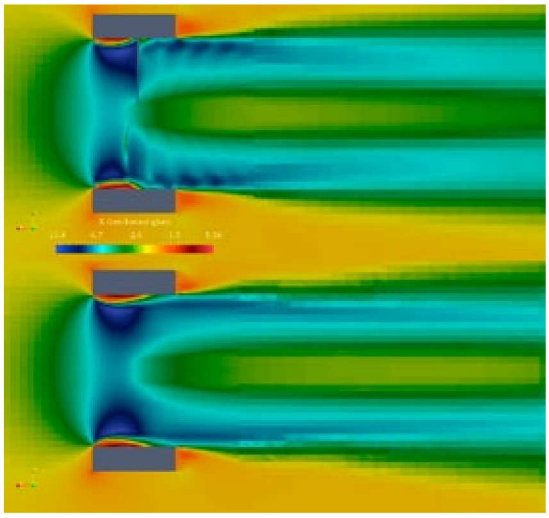


Abb. 11: Vergleich der resultierenden Axialgeschwindigkeiten des Volumenkraftmodells (unten) im Vergleich zur aufgelösten Referenzsimulation (oben).

WECHSELWIRKUNG VON MANÖVRIERORGANEN

Mithilfe des Volumenkraftmodells wurden Parameterstudien zum Einfluss der Vorausfahrt wie auch der Anordnung in einer generischen Vorschiffsgeometrie durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigen, unter welchen Bedingungen das Querstrahlruder keinen zufriedenstellenden Schub mehr liefert.

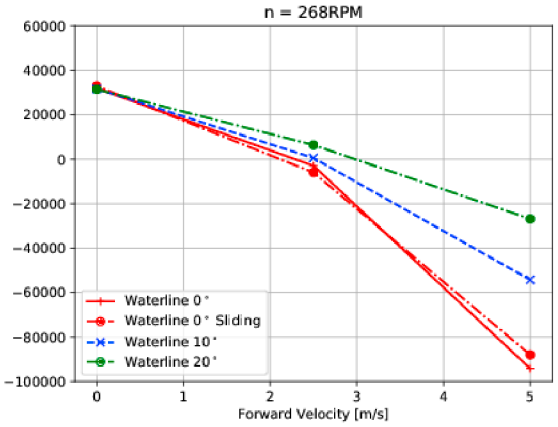


Abb. 12: Querstrahlruder-Schub in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit und dem Winkel der Wasserlinien am Einbauort. Die durchgezogene Linie zeigt eine aufgelöste Referenzsimulation.

ANWENDUNGEN:

Als Anwendungsbeispiel für die entwickelten Werkzeuge wurden komplexe Szenarien völliger Schiffe simuliert. Dazu wurde die Manövrierfähigkeit eines Verbunds aus Schlepper und Tanker und darüber hinaus das Anlandemanöver eines Plattformversorgers an eine Offshoreanlage untersucht.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Strahlertunneln auf den Seegangszusatzwiderstand analysiert.

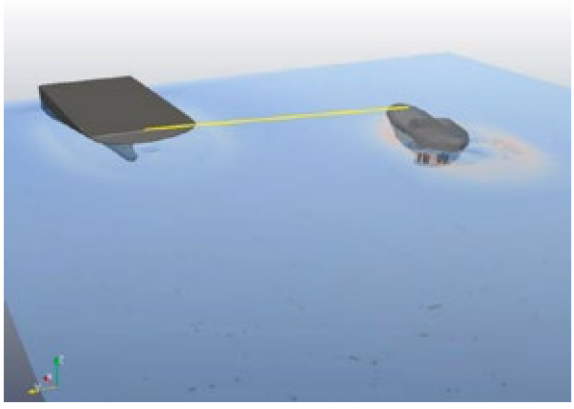


Abb. 13: Simulation der Interaktion von Schlepper und Schiff während eines Escort-Manövers beim indirekten Schleppen.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt befasste sich mit der Entwicklung und Anwendung von Werkzeugen zur Analyse und Optimierung von Manövrier- und Propulsionsorganen für Offshore-Schiffe im Seegang.

Der Schwerpunkt der Anwendungen lag auf den Manövrier- und Propulsionsorganen von extrem leistungsfähigen Hochseeschleppern, deren wesentliche Aufgaben der Transport und die Installation von Offshore–Strukturen sind. Die Schiffe sind häufig mit mehreren Querstrahlern an Bug und Heck ausgestattet. Die Leistungsfähigkeit der Strahler ist für die dynamische Positionierungsfähigkeit (DP) der Schiffe - und damit die zentrale Aufgabe des Schiffes - wichtig. Die Strahler interagieren stark mit den Propulsoren sowie den Strömungsbedingungen am Rumpf und beteiligen sich an der hydrodynamischen Interaktion zwischen mehreren Körpern bzw. Körpern und Gebietsbegrenzungen. Der Einfluss der genannten Wechselwirkungen auf die durch den Strahler induzierten Rumpfkräfte ist bislang weitestgehend unverstanden. Daraus leitet sich ein technisches und wirtschaftliches Risiko für den Betrieb des Schiffes bzw. dessen Marktakzeptanz ab. Die aus einem größeren Einsatzradius resultierenden höheren Geschwindigkeiten führen darüber hinaus zur Notwendigkeit geringer Seegangszusatzwiderstände.

Die manövriertechnischen Fragestellungen lassen sich aufgrund von Maßstabseffekten nur schwer im Modellmaßstab experimentell bearbeiten. Experimentelle Untersuchungen geometrischer Parameter, z. B. der Querstrahltunnelpositionen, sind sehr aufwändig. Die experimentelle Analyse des Zusatzwiderstands im Seegang ist ebenfalls mit erheblichem Aufwand verbunden und in der Regel auf die Wirkung langkämmigen Seegangs beschränkt. Die durchgeführten Untersuchungen befassten sich daher mit der Entwicklung eines im Entwurfs- und Zulassungsprozess einsetzbaren Simulationsverfahrens.

Hierzu wurden Methoden der numerischen Strömungssimulation für turbulent strömende, viskose Medien eingesetzt. Das Verfahren sollte u.a. die Prognose vollständiger Schiffsmanöver ermöglichen. Im Unterschied zu bisherigen Arbeiten wurde in diesem Vorhaben die Wirkung des Querstrahlers unter Fahrt, insbesondere die Wechselwirkung zwischen Querstrahler und Schiffsrumpf und Propeller in der Großausführung, d. h. ohne den Einfluss von Maßstabseffekten, berücksichtigt. Ein weiteres Ziel des Vorhabens war die parametrische Untersuchung der Interaktion von Querstrahler und Schiff, wobei auch benachbarte Körper berücksichtigt werden sollten. Zudem war die Widerstandszunahme durch Welleneinwirkungen mit modernen numerischen Methoden zu erfassen, um eine bessere Vorhersage der benötigten Antriebsleistung zu ermöglichen. Im Fokus der Untersuchungen stand dabei der Einfluss von Querstrahlern auf den seegangsbedingten Zusatzwiderstand.

Aus den durchgeführten Arbeiten sollten Gestaltungsempfehlungen für den Entwurf und die Integration von Querstrahlern abgeleitet werden. Die Realisierung der genannten Ziele war anspruchsvoll und verlangte die gemeinsame Bearbeitung durch Industrieunternehmen, Schiffbauversuchsanstalt und universitärem Schiffbauinstitut.

DANKSAGUNG

Das Konsortium dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung sowie dem Projektträger Jülich für die konstruktive Begleitung des Forschungsvorhabens.

SCHRIFTENREIHE PROJEKTTRÄGER JÜLICH

1. Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie
   Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung
   hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten
   ISBN: 978-3-89336-624-8

2. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
   Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten
   ISBN: 978-3-89336-677-4

3. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
   Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten
   ISBN: 978-3-89336-745-0

4. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK
   Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten
   ISBN: 978-3-89336-832-7

5. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
   Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten
   ISBN: 978-3-89336-922-5

6. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
   Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten
   ISBN: 978-3-95806-006-7

7. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
   Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten
   ISBN: 978-3-95806-104-0

8. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
   Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten
   ISBN: 978-3-95806-187-3

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