

Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2013

Schriftenreihe Projektträger Jülich

Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2013

Schriftenreihe Projektträger Jülich

Grußwort

Die maritime Wirtschaft muss sich in einem starken internationalen Wettbewerb behaupten. Mit geeigneter Forschung und Entwicklung können deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen in diesem Wettbewerb neue Akzente setzen und so wertvolle Arbeitsplätze in Deutschland sichern.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) stellt für das Forschungsprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ jährlich über 30 Mio. Euro zur Verfügung.

Auf der Statustagung „Maritime Technologien“ werden auch in 2013 interessante Ergebnisse einiger dieser Projekte vorgestellt. Die Themenvielfalt ist wieder groß:

Neben unterschiedlichen Leichtbaukonzepten und Schweißverfahren geht es um die Verbesserung der Leckstabilität von Schiffen und das zerstörungsfreie Prüfen von Propellerwerkstoffen. Mit Vorhaben zur Umstellung auf LNG als Schiffskraftstoff und zur Abgasbehandlung von Schiffsdieselmotoren werden umweltrelevante Themen adressiert. Piraterie- und Terrorabwehr, das dynamische Positionieren im Eis und das Manövrieren in Gefahrensituationen werden aus dem Bereich der Schifffahrt präsentiert. In der Meerestechnik sind interessante Forschungsergebnisse zu autonomen Unterwassergreifern, druckneutralen Systemen für die Tiefsee und neuartiger Sensorik zu erwarten. Das vielfältige Programm der diesjährigen Statustagung und ein sicher wieder intensiver Dialog der Teilnehmer aus Wirtschaft und Wissenschaft wird das Netzwerk der maritimen Branche stärken.

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



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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

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

Für den Inhalt der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (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

Dieter Laufenberg, Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck

Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Bildnachweis

Laser Zentrum Hannover e. V. (Fotograf: Stefan Kaierle)

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-89336-922-5

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

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

Inhaltsverzeichnis

MESCHLAS – Fügen großformatiger Metallschaumsandwiches in der Schiffskonstruktion mittels LASER-Schweißen

Dieter Gimperlein, Wolfgang Sichermann (ThyssenKrupp Marine Systems GmbH);
Stefan Kaierle (Laser Zentrum Hannover e.V.). 9

FSW-Ship – Rührreibgeschweißte Leichtbaustrukturen für Schiffsaufbauten

Ralf Boywitt (GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Berlin-Brandenburg). 21

Verbundvorhaben ELKOS: Verbesserung der Kollisionsicherheit durch Integration struktureller Maßnahmen in die Leckstabilitäts- berechnung moderner RoRo-Fahrgastschiffe

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fricke; Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger;
Dr.-Ing. Hendrik Dankowski; Dipl.Ing.(FH) Karsten Werner 37

BunGas – Bunkering gas as fuel for ships

Johannes Beuse, MEYER Werft, Peter Hoffmann, DNV, Benjamin Scholz, GL. 57

Plasma-katalytische Abgasbehandlung für Schiffsdieselmotoren PBCT

M. Schmidt, R. Basner, R. Brandenburg, Leibniz-Institut für Plasmaforschung
und Technologie 71

PITAS – Piraterie- und Terrorabwehr auf Seeschiffen

Dr. Christoph Zebermann, Dr. Thomas Lehmann (Raytheon Anschutz, Kiel),
Prof. Dr. Boris Culik (F³: Forschung . Fakten . Fantasie, Heikendorf) 85

Situationsadaptierte Handlungsempfehlung für Person-über-Bord Unfälle

M. Baldauf, K. Benedict, V. Köhler, D. Meißner, E. Wilske 97

SeeGrip – Ein Greifersystem mit Tastgefühl für die Tiefsee

Peter Kampmann, Frank Kirchner 115

Druckneutrale Systeme Tiefsee

Gerhard Körner (ENITECH GmbH), Rudolf Bannasch (EvoLogics GmbH),
Heinz Lehr (TUB), Siegfried Krüger (IOW), Karsten Breddermann URO,
Joanna Waniek (IOW) 125

**HISEM – Ein „High Sensitive Deep Sea Methane Monitoring“
System für Unterwasser-Leckagemessungen**

Daniel Esser (CONTROS Systems & Solutions GmbH Kiel), Mark Schmidt,
Peter Linke (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel) 145

DYPIC – Dynamic Positioning in Ice

Andrea Haase und Peter Jochmann, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt
(HSVA) 157

**ProRepaSII – Entwicklung und Validierung von Methoden zur
zerstörungsfreien Prüfung von Propellerwerkstoffen mit Ultraschall**

M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer, S. Hubel, D. Dobrovolskij; Fraunhofer-Institut für
Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern. 173

MESCHLAS – Fügen großformatiger Metallschaum-Sandwiches in der Schiffskonstruktion mittels LASER-Schweißen

Dieter Gimperlein, Wolfgang Sichermann (ThyssenKrupp Marine Systems GmbH); Stefan Kaieler (Laser Zentrum Hannover e.V.); Carsten Lies (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik)

Einleitung

In vielen Bereichen des Spezialschiffbaus kommt dem Leichtbau eine wachsende Bedeutung zu, insbesondere wenn hohe Geschwindigkeiten gefordert sind. Dies gilt nicht nur für die tragende Struktur des Schiffskörpers, sondern auch für bewegliche Teile wie Türen, Luken, Rampen oder Ähnliches. Oft wird in diesem Zusammenhang auch an die Verwendung von Sandwich-Strukturen gedacht. Verschiedene Arten von Sandwich-Halbzeugen kamen fallweise auch schon zum Einsatz, z. B. auf Passagierschiffen. Sie werden allerdings ausschließlich in niedrig beanspruchten Bereichen des Schiffkörpers verwendet – hauptsächlich, weil die Fügetechnologie im Hinblick auf die hohen Betriebsfestigkeitsanforderungen der dynamisch beanspruchten Schiffsstruktur noch nicht weit genug entwickelt ist.

Ein vielversprechender Ansatz, der fallweise auch schon im Fahrzeugbau verfolgt wurde, ist die Verwendung von Metallschaum-Sandwiches. Diese versprechen nicht nur Gewichtseinsparungen, hohe Struktursteifigkeit und gute Dämpfungseigenschaften, sondern durch die Möglichkeit des Ausschäumens von Hohlräumen auch Flexibilität bei der Formgebung. Letzteres ist für den Schiffbau, der es vielfach mit gekrümmten Oberflächen zu tun hat, besonders attraktiv und lässt sogar Fertigungsvereinfachungen erwarten. Trotzdem sind Sandwich-Strukturen aus Metallschäumen mit metallischen Deckblechen bisher im Schiffbau noch nicht zum Einsatz gekommen. Vornehmlich für den Bereich der Marinetchnik wurden zwar von Giamei [1] Anwendungsmöglichkeiten von zellularen Metallen als Plattformen der Flugzeugfahrstühle auf Flugzeugträgern, als gepanzerte Türen und pyrotechnische Abschirmungen sowie zum Ausschäumen von Doppelhüllenstrukturen aufgezeigt. Eine Umsetzung dieser Vorschläge ist bis heute aber nicht bekannt.

Offensichtlich bieten konventionelle schiffbauliche Strukturen aus Blechen und Walzprofilen kein nennenswertes weiteres Gewichtseinsparpotential mehr. Daher verdienen in Zukunft alternative Materialien und Halbzeuge – insbesondere Sandwich-Strukturen – größere Aufmerksamkeit. Nicht nur das Gewicht, sondern auch Schwingungsdämpfung, Geräuschkinderung und Fertigungskosten sind Kriterien, denen bei der Entwicklung alternativer, zu-

kunftsweisender schiffbaulicher Strukturen eine wichtige Rolle zukommt.

Ziel des Verbundprojekts MESCHLAS (Fügen großformatiger Metallschaum-Sandwiches in der Schiffskonstruktion mittels Laser-Schweißen) war die Erschließung von Halbzeugen aus Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches für das Anwendungsfeld des Schiffbaus. Dabei wurde ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der sich nicht allein auf die Entwicklung einer Sandwich-Leichtbauweise konzentriert, sondern auch die dafür benötigte Fertigungstechnologie zur Verfügung stellt. Für das Schneiden und Fügen der Sandwiches wurde vor allem an eine Weiterentwicklung der Laser-Technologie gedacht, die auch heute schon in großem Umfang im Schiffbau etabliert ist und Vorteile besonders im Dünoblechbereich bietet.

Das Verbundvorhaben MESCHLAS wurde von vier Projektpartnern bearbeitet:

- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz
- Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)
- Precitec Optronik GmbH, Rodgau
- ThyssenKrupp Marine Systems GmbH (TKMS), Emden

Während sich das IWU vornehmlich mit der Herstellung neuartiger Halbzeuge aus Aluminiumschaum-Sandwiches und der Ermittlung ihrer Eigenschaften befasste, wurden am LZH in Zusammenarbeit mit der Precitec Optronic lasergestützte Trenn- und Fügeverfahren zur Bearbeitung der Sandwich-Paneele entwickelt. TKMS untersuchte die Einsatzpotentiale des Werkstoffs im Schiffbau und entwickelte in Zusammenarbeit mit dem IWU alternative Konstruktionen, mit denen sich die vorteilhaften Eigenschaften der Sandwich-Halbzeuge ausnutzen lassen. Zu den Aufgaben von TKMS gehörte gleichfalls der Bau originalgroßer schiffbaulicher Teilstrukturen aus Aluminiumschaum-Sandwiches, sogenannter Demonstratoren, deren Eigenschaften anschließend versuchsstechnisch zu untersuchen waren. Im Unterauftrag von LZH stellte die Firma Laser-on-demand GmbH, Hannover, die Laser-Schweißtechnik zur Verfügung – darunter einen mobilen 5 kW-Diodenlaser und eine 6-Achs-Schweißroboteranlage mit Linearverfahrachse.

Herstellung von Stahl-Aluminiumschaum-Verbundhalbzeugen

Die zum Bau einer konventionellen Stahlschiffsstruktur verwendeten Halbzeuge beschränken sich nahezu ausschließlich auf Bleche und Walzprofile. Abgesehen von der Außenhautstruktur und verschiedenen Anhängen wer-

den die Bleche in ebenem Zustand verbaut. Für einen möglichst vielseitigen Einsatz von Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen kommt es also vor allem auf die Herstellung von ebenen Sandwich-Platten an. Darüber hinaus kann an das Ausschäumen von Hohlprofilen oder enger, unzugänglicher Zellen gedacht werden.

Das Herstellungsprinzip ist immer dasselbe. Ob Zwischenraum zwischen den Deckblechen einer Sandwichplatte oder beliebig geformter Hohlraum: sie werden mit Aluminium ausgeschäumt. Dabei entsteht eine belastbare metallurgische Verbindung zwischen den Deckblechen und dem Aluminiumschaum, die einer Lötverbindung gleichkommt. Im Vorhaben kam ein sogenanntes pulvermetallurgisches Verfahren zur Anwendung. Dabei wird Aluminiumpulver mit einem Treibmittel (TiH_2) vermischt, in verdichteter Form stückweise im Schäumhohlraum verteilt und im Ofen auf über $650\text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt. Das dabei vom Treibmittel freigesetzte Gas (H_2) schäumt das bei dieser Temperatur flüssig werdende Aluminium auf. Damit der Schaum feinblasig bleibt, wird der Vorgang durch Abkühlen mit Druckluft kontrolliert abgeschlossen.

Die naheliegende und zugleich flexibelste Methode zur Herstellung gekrümmter Sandwich-Platten wäre ein Verformen fertiger, ebener Sandwich-Halbzeuge analog zum werftüblichen Kaltverformen konventioneller Bleche. Entsprechende Walzversuche mit Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches führten jedoch schon bei geringen Krümmungen zur Zerstörung des Deckblech-Aluminiumschaum-Verbundes, und zwar hauptsächlich durch das Beulen des inneren Deckblechs. Die Herstellung gekrümmter Aluminiumschaum-Sandwich-Platten ist deshalb nur durch das vorherige Verformen der Deckbleche und anschließende Ausschäumen möglich. Diese Methode hat sich im Vorhaben bewährt.

Laserstrahlschweißen von Stahl-Aluminium-Sandwichstrukturen

Das Laserstrahlschweißen findet aufgrund seiner Vorteile wie der lokalisierten Energieeinbringung und des daraus resultierenden geringen Verzugs, der hohen Schweißgeschwindigkeiten und der hervorragenden Flexibilität und Automatisierbarkeit in vielen Industriebereichen Anwendung. Fügetechnisch bestand die Herausforderung beim Schweißen der Stahl-Aluminium-Sandwichstrukturen u. a. darin, eine Vermischung des Aluminiums (innere Schaumstruktur) und des Stahls (Deckblech) zu vermeiden, um einer Bildung von spröden intermetallischen Phasen vorzubeugen. Diese würden bei vermehrtem Auftreten für ein frühzeitiges Versagen der Schweißnaht unter mechanischer Belastung sorgen. Des Weiteren setzt die hohe Steifigkeit der Sandwichstrukturen speziell angepasste Spannkonzeppte voraus, mit denen entsprechend hohe Spannkkräfte aufgebracht werden können, ohne dabei jedoch die Schaumstruktur zu schädigen. Durch ein beidseitiges Schweißen der Blechlagen unter vorangegangener Entfernung des Aluminiumschaums

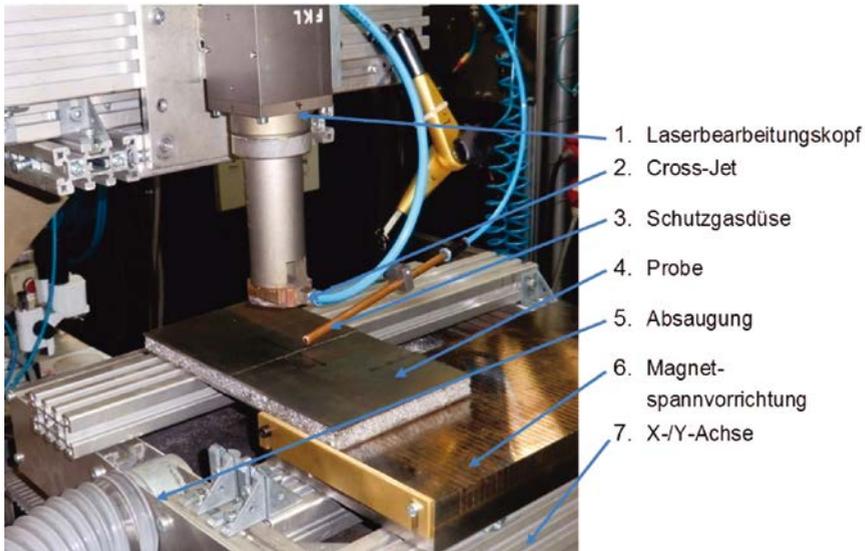


Abb. 1. Versuchsaufbau für das Laserstrahlschweißen im Stumpfstoß

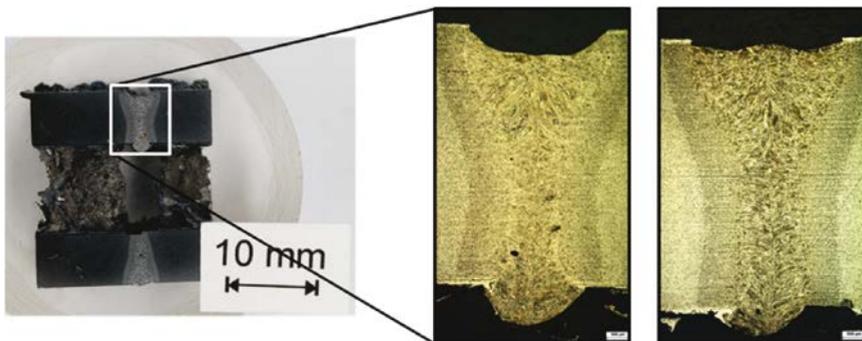


Abb. 2. Querschliff eines Nachtausschnittes einer Sandwichstruktur mit 5 mm dicken Deckblechen

(Abb. 1 und Abb. 2) im direkten Fügebereich konnte dieses erfolgreich durchgeführt werden [2].

Alternative Konstruktionen aus Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen

Die Vielseitigkeit späterer Anwendungsmöglichkeiten von Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen wurde im Vorhaben MESCHLAS dadurch offen gehalten, dass für zwei grundsätzlich unterschiedliche Gruppen von Bauteilen repräsentative Strukturbereiche eines Schiffes exemplarisch untersucht wurden. Die erzielten Ergebnisse lassen sich auf alle verwandten Strukturbereiche

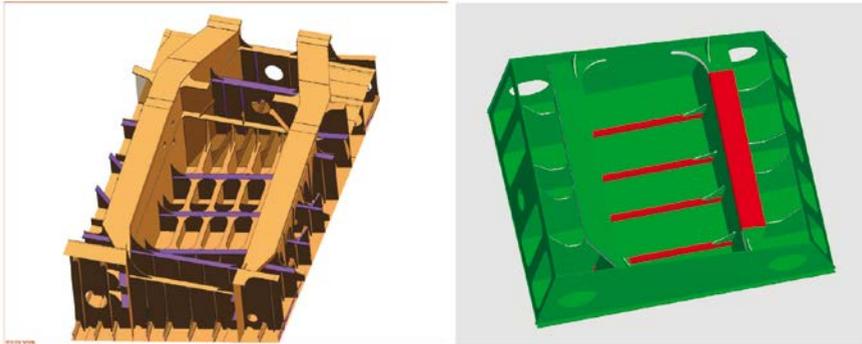


Abb. 3. Konventionelles Getriebefundament eines Marineschiffes (links) und alternative Struktur aus Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen (rechts)

übertragen. Bei den beiden Bauteilgruppen handelt es sich zum einen um Strukturen, die aus ebenen, vorgefertigten Aluminiumschaum-Sandwiches zusammengesetzt sind, zum anderen um beliebig geformte Hohlstrukturen mit engen Zellen, die mit Aluminium ausgeschäumt werden.

Stellvertretend für den Typ eines aus ebenen Sandwich-Platten zusammengesetzten Bauteils wurde ein in den Schiffsverband integriertes Getriebefundament eines Marineschiffes ausgewählt (Abb. 3). Dieses Fundament ist besonders anspruchsvoll sowohl in Bezug auf die Vielfalt der eingesetzten Konstruktionselemente und Materialstärken als auch hinsichtlich seiner Belastungen und Ansprüche an Schwingungsverhalten und Akustik. Alle anderen aus ebenen Platten zusammengesetzten Strukturen eines Schiffes müssen in der Regel nur einem Teil dieser Ansprüche genügen, so dass die im Vorhaben erarbeiteten Lösungen in den meisten Fällen übertragbar sein werden.

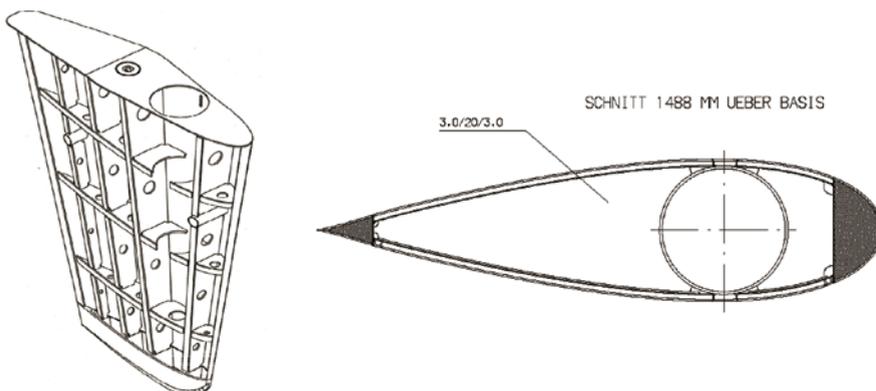


Abb. 4. Konventionelles Ruder (links) und Horizontalschnitt durch eine alternative Struktur aus Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen (rechts)

Die zweite Bauteilgruppe – im Vorhaben repräsentiert durch das Ruder eines Marineschiffes (Abb. 4) – setzt auf die Möglichkeit des Ausschäumens unzugänglicher und gegebenenfalls kompliziert geformter Hohlräume. Solche Zellen kommen im Schiffbau an den stark geformten Schiffsenden (Steven), an Rudern, Flossen, Schlingerkielen oder auch an Masthäusern mit ihren Konsolen und Rahen vor. Die konventionelle Fertigung dieser Bereiche ist extrem kostspielig. Metallschaumunterstützte Plattenfelder können einen Großteil der bislang erforderlichen Rippen und Stege überflüssig machen und so die Strukturen erheblich vereinfachen. Die Vorderkante (Profilnase) und die Hinterkante des entwickelten alternativen Ruders bestehen aus gebauten Hohlprofilen, die mit Aluminium ausgeschäumt wurden. Die seitliche Außenhaut und die wenigen inneren Stege bestehen aus Stahl-Aluminiumschaum-Sandwich-Platten. Das alternative Strukturkonzept des Ruders musste besondere Rücksicht auf Möglichkeiten und Grenzen der Halbzeugherstellung nehmen, insbesondere hinsichtlich der gekrümmten Außenhautplatten und des Volumens der ausgeschäumten Hohlprofile.

Die alternative Sandwich-Bauweise verlangte in beiden Fällen eine tiefgreifende konstruktive Neugestaltung. Im Vordergrund stand dabei die Ausnutzung der bei gleichem Flächengewicht höheren Biegesteifigkeit der Sandwiches im Vergleich zu einfachen Stahlblechen. In Verbindung mit einer beanspruchungsgerechten Dimensionierung unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften der Stahl-Aluminiumschaum-Verbunde ermöglicht dies eine wesentliche Vergrößerung der Aussteifungsabstände und somit eine Reduktion der Anzahl der Einzelteile. Weitere Vorteile – vor allem Gewichtseinsparungen – ergeben sich durch den Einsatz sehr dicker Sandwiches oder ausgeschäumter Hohlprofile als Ersatz für sehr dicke massive Bleche z. B. bei Fundamenttopplatten, deren Stärken in der Regel nicht allein aus Gründen der Festigkeit, sondern auch des Schwingungsverhaltens und der Akustik gewählt werden. Großen Einfluss auf die konstruktive Gestaltung hatte auch die Fügetechnologie. Für die Konstrukteure war es dabei eine besondere Herausforderung, gewohnte Lösungsmuster zu verlassen und die funktionalen und gestalterischen Möglichkeiten der neuen Sandwich-Halbzeuge auszunutzen. Selbst im CAD-Modell und bei der zeichnerischen Darstellung in den Bauunterlagen musste besondere Rücksicht auf die unkonventionellen Materialabmessungen und Fügekonzepte der Sandwich-Halbzeuge genommen werden.

Die gefundenen alternativen Strukturkonzepte beweisen, dass der Einsatz von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches große Einsparpotentiale birgt [3]. Die Gewichtseinsparungen für das Fundament und das Ruder betragen gleichermaßen etwa 20 %. Ein Indikator für den Konstruktions- und Fertigungsaufwand ist die Anzahl der Einzelteile einer Struktur. Die alternativen Strukturen kommen im Fall des Getriebefundaments mit etwa 60 % weniger Einzelteilen aus, im Fall des Ruders mit etwa 50 %.

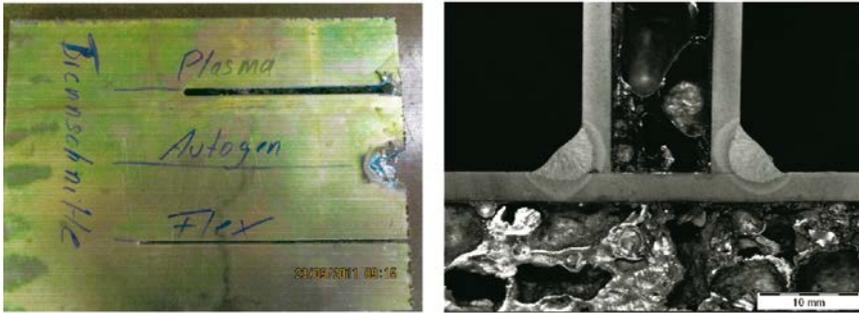


Abb. 5. Trenn- und Schweißproben aus Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches

Fertigung von Bauteilen aus Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen

Im Anschluss an die Konstruktionsphase sah das Vorhaben MESCHLAS den Bau von Versuchskörpern der exemplarisch ausgewählten Strukturen, sogenannter Demonstratoren, unter Wertbedingungen vor. Die Absicht war sowohl ein Durchspielen des gesamten Fertigungsprozesses unter Verwendung von Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeugen als auch die anschließende Verfügbarkeit von Bauteilen für eine versuchstechnische Analyse.

Der eigentlichen Fertigung der Demonstratoren gingen Trenn- und Schweißversuche mit den Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches voran (Abb. 5). Als eine gravierende Einschränkung werftüblicher Fertigungsmethoden stellte sich leider heraus, dass das autogene Brennschneiden auch bei geringen Ansprüchen an die Schnittqualität nicht möglich ist. Vor allem das obere Deckblech und der Aluminiumschaumkern schmolzen großflächig auf. Gute Ergebnisse wurden jedoch mit dem Plasmaschneiden erzielt. Die Trenntechnik im Rahmen des Vorhabens wurde mit ebenfalls guten Ergebnissen auf das Schneiden mit einer Trennscheibe und das Laser-Schneiden beschränkt.

Die Schweißversuche ergaben praktisch keine Einschränkungen. Die Sandwiches sind uneingeschränkt mit allen konventionellen Verfahren schweiß-

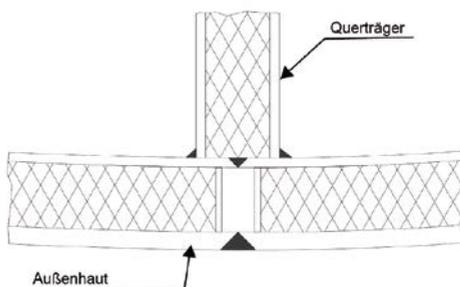


Abb. 6. Dreiblechnaht zwischen Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches mit vorher geschweißter Stumpfnah



Abb. 7. Endmontage des Fundament- und Ruderdemonstrators

bar. Nur bei Stumpfnähten ist eine besondere Nahtvorbereitung nötig, die einer Mischphasenbildung zwischen Stahl und Aluminium vorbeugt. Verschweißt werden dabei nur die Deckbleche. Auch komplizierte Stoßformen sind möglich (Abb. 6). Das ebenfalls angewendete Laser-Schweißen ohne Zusatzdraht war unter Werkbedingungen jedoch problematisch wegen der hohen erforderlichen Passgenauigkeiten. Alle Kanten mussten vorher mechanisch bearbeitet werden. Trotzdem konnte etwa ein Drittel der Nahtlängen der Demonstratoren mit dem Laser verschweißt werden.

Die Endmontage der Demonstratoren folgte weitgehend dem Prozess einer üblichen schiffbaulichen Sektionsfertigung (Abb. 7). Beim Fundamentdemonstrator diente ein zuvor per Laser-Schweißung zusammengesetztes Sandwich-Paneel als Bauebene, die übrigen Einzelteile wurden nacheinander aufgesetzt und verschweißt. Beim Ruderdemonstrator wurde eine Sandwich-Außenhautseite in eine Baulehre eingelegt, mit den inneren Stegen und den ausgeschäumten Hohlprofilen bestückt und dann mit der anderen Außenhautseite aufgedeckt. Bemerkenswert ist noch die bei diesen Arbeiten gemachte Erfahrung, dass das Heben von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches mit Hilfe von Magneten, wie sie in der schiffbaulichen Vormontage üblich sind, nicht möglich ist.

Der Ruderdemonstrator wird vom LZH dauerhaft auf dem eigenen Firmengelände in Hannover ausgestellt. Ferner sind Proben mit Konstruktionsdetails und Schweißverbindungen der alternativen Sandwich-Bauweise sowie Teile, die aus dem Fundamentdemonstrator herausgeschnitten wurden, bei TKMS und IWU verfügbar.

Eigenschaften von Bauteilen aus Stahl-Aluminiumschaum-Halbzügen

Die messtechnischen Untersuchungen beschränkten sich auf eine akustische Vermessung der Demonstratoren. Andere Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Schwingungsverhalten konnten vom Vorhabenspartner

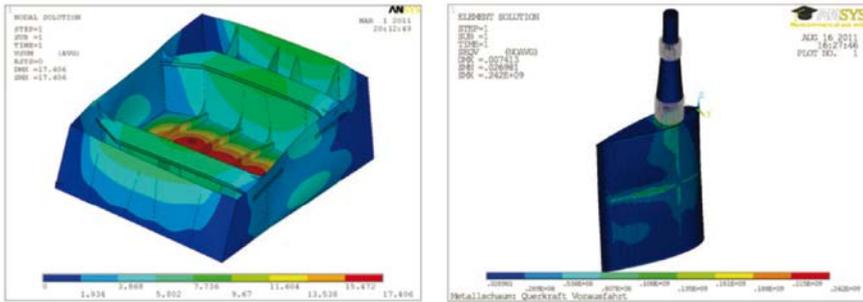


Abb. 8. Rechenmodelle des Fundament- und Ruderdemonstrators

IWU mit ausreichender Genauigkeit durch rechnerische Simulation ermittelt werden [4], Abb. 8. Akustische Eigenschaften lassen sich rechnerisch jedoch nur schwer fassen. Ziel der akustischen Vermessung war vor allen Dingen die Ermittlung der Dämpfungseigenschaften des alternativen Sandwich-Fundaments im Vergleich zu einem konventionellen Fundament. Die Frage der Dämpfung von Körperschall und Unterwasserschallabstrahlung hat im Marineschiffbau eine besonders hohe Bedeutung.

Nicht nur der Fundamentdemonstrator aus Aluminiumschaum-Sandwiches wurde akustisch vermessen (Abb. 9), sondern zum Vergleich auch das konventionell gebaute Getriebefundament an Bord einer Korvette, das dem Demonstrator als Vorbild diente. Um akustisch relevante Schwingungen zu unterdrücken, ist das Korvettenfundament mit zusätzlich aufgeklebten, 2 mm starken Blechplatten, sogenannten Entdröhnungsblechen versehen. Die eigentliche dämpfende Wirkung entsteht beim Schwingen der Struktur durch wechselnde Scherkräfte in der elastischen Klebeschicht.

Die versuchstechnisch ermittelten Dämpfungseigenschaften hinsichtlich mechanischer Schwingungen und Akustik sind vielversprechend (Abb. 10).



Abb. 9. Meßstellen auf der Topplatte des Fundamentdemonstrators, Schwingungsanregung mit einem Shaker

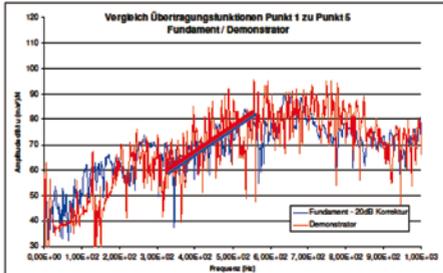
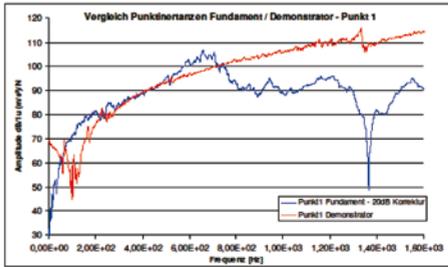


Abb. 10. Akustischer Vergleich zwischen gedämpftem konventionellen Fundament (blau) und Sandwich-Fundament (rot). Punktbeschleunigungen (oben) und Übertragungsfunktionen für Körperschall (unten)

Das Sandwich-Fundament erreicht ohne weitere Maßnahmen die akustischen Eigenschaften des konventionellen Fundaments, das mit aufwändigen Zusatzmaßnahmen (aufgeklebte Entdröhnungsbleche) akustisch gedämpft wird [4].

Die guten Schwingungseigenschaften der Stahl-Aluminiumschaum-Halbzeuge sind auf die hohen Steifigkeiten der Sandwiches und die dämpfende Wirkung des Aluminiumschaums zurückzuführen. Auf weitere wichtige Eigenschaften von Strukturen aus diesen Halbzeugen, nämlich auf das Einsparpotential bei Gewicht sowie Konstruktions- und Fertigungsaufwand, wurde bereits hingewiesen, ebenso wie auf Besonderheiten der Verarbeitung. Zu Brandschutzverhalten und Wärmeisolierung von Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches wurden im Rahmen des Vorhabens keine Untersuchungen angestellt. Schließlich sei noch auf eines von vermutlich vielen Detailproblemen hingewiesen, die vor einem praktischen Einsatz der neuen Halbzeuge zu lösen wären. Der an den Schnittkanten der Sandwich-Platten offen liegende Aluminiumschaum wird im Schiffsbetrieb häufig Flüssigkeiten oder zumindest Feuchtigkeit ausgesetzt sein. Hier wäre eine geeignete Konservierung der Schnittkante nötig. Im Vorhaben wurde jedoch auch dafür noch keine Lösung entwickelt.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens MESCHLAS wurden Anwendungsfelder im Schiffbau für großformatige Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches erschlossen, welche sich durch ihre hervorragenden Leichtbau- und Dämpfungseigenschaften auszeichnen. Ausgewählte schiffbauliche Teilstrukturen wurden in alternativer Sandwich-Bauweise konstruiert und ihr Festigkeits- und Schwingungsverhalten rechnerisch analysiert. Auch die zugehörige Fertigungstechnologie unter Einbeziehung der Laser-Technologie wurde entwickelt, und es wurden originalgroße Demonstratoren der Teilstrukturen weitgehend unter werftüblichen Bedingungen gebaut. Mit den Demonstratoren wurden schließlich Versuche zur Ermittlung vor allem des Schwingungs- und Dämpfungsverhaltens durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit dem Verhalten konventioneller Strukturen verglichen.

An den Beispielen des Getriebefundaments und des Ruders eines gebauten Marineschiffes wurden Konstruktion, Berechnung und Herstellung entsprechender Teilstrukturen aus Aluminiumschaum-Sandwiches erprobt. In Verbindung mit der im Schiffbau bereits etablierten Laser-Schweißtechnik konnten alternative schiffbauliche Leichtbaustrukturen realisiert werden. Die Gewichtseinsparungen für das Fundament und das Ruder betragen gleichermaßen etwa 20 %. Ein Indikator für den Fertigungsaufwand ist die Anzahl der Einzelteile einer Struktur. Die alternativen Strukturen kommen im Fall des Getriebefundaments mit etwa 60 % weniger Einzelteilen aus, im Fall des Ruders mit etwa 50 %.

Beim Fügen der Teile per Laser-Schweißung sind Passgenauigkeiten einzuhalten, die weit über das im Schiffbau übliche hinausgehen. Trotzdem konnte etwa ein Drittel der Nahtlängen der Demonstratoren mit dem Laser verschweißt werden. Die entwickelten alternativen Sandwich-Strukturen sind jedoch uneingeschränkt auch konventionell schweißbar.

Die versuchstechnisch ermittelten Dämpfungseigenschaften hinsichtlich mechanischer Schwingungen und Akustik sind vielversprechend. Das Sandwich-Fundament erreicht ohne weitere Maßnahmen die akustischen Eigenschaften eines konventionellen Fundaments, das mit aufwändigen Zusatzmaßnahmen (aufgeklebte Entdröhnungsbleche) akustisch gedämpft wird.

Literatur

- [1] A. Giamei: Aero-Engine and Naval Applications for Ultra-Lightweight Metals. In: J. Banhart, H. Eifert (Hrsg.): Metal Foams. Proceedings of Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, Stanton, USA, 7. und 8.10.1997, S. 63-78
- [2] D. Kracht, S. Kaierle, M. Hustedt, M. Schimek: Prozessentwicklung für das Laserstrahlschweißen von Metallschaumsandwiches unter besonderer Berücksichtigung der Randbedingungen des Schiffbaus. Abschlussbericht eines Teilvorhabens des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundvorhabens MESCHLAS – Fügen großformatiger Metallschaum-Sandwiches in der Schiffskonstruktion mittels Laser-Schweißen. Laser Zentrum Hannover e. V., Hannover, November 2012
- [3] R. Koopmann, F. Tiedemann, D. Gimperlein: Leichtbau hoch belasteter Schiffsstrukturbauerteile mittels Stahl-Aluminiumschaum-Sandwiches. Abschlussbericht eines Teilvorhabens des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundvorhabens MESCHLAS – Fügen großformatiger Metallschaum-Sandwiches in der Schiffskonstruktion mittels Laser-Schweißen. Blohm + Voss Naval GmbH, Emden, November 2012
- [4] T. Hipke, C. Lies: Gestaltung und Fertigungstechnologie großformatiger ebener und gekrümmter Metallschaum-Sandwichsysteme für den Schiffbau. Abschlussbericht eines Teilvorhabens des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundvorhabens MESCHLAS – Fügen großformatiger Metallschaum-Sandwiches in der Schiffskonstruktion mittels Laser-Schweißen. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, November 2012

FSW-Ship

Rührreibgeschweißte Leichtbaustrukturen für Schiffsaufbauten

Förderkennzeichen: 03SX302C

Ralf Boywitt (GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Berlin-Brandenburg)

Abstract

In 1991, friction stir welding (FSW) was introduced to the public by TWI (England), it belongs to the pressure welding process and represents a specialized form of friction welding. As typical for this method, friction heat is produced by pressure and movement and the material is transferred in a plasticized, non molten state. In general the resilience of such compounds is excellent and besides different material combinations are possible. Due to this characteristic, a lot of innovative constructions for aerospace, vehicle construction and shipbuilding were realized. The aim of this project was increase of product quality while simultaneously reducing production process when manufacturing of lightweight structures for superstructures and their integration in the body of the ship, by development of friction stir welded lightweight structures. For that purpose samples of different aluminum alloy and aluminum/ steel connections were produced. For determination of operational stability they were technically examined and the results were provided for the project partner to do additional evaluations. The focus was on manufacturing of aluminum/ steel connections. This type of connection would develop an important field of work which is considered to be critical due to corrosion problems especially of shipbuilding. In the course of test, some good progress has been achieved. As completion of work, connections have been welded on different sheets from which a mock-up was issued by a different partner. As a result the excellent suitability of FSW for aluminum connections was evidenced. Even first possibilities for the use of aluminum/ steel connections are conceived. Furthermore, an agreement with Germanischer Lloyd has been reached in which the standard DIN EN ISO 25239 (FSW-standard) is recognized.

Aufgabenstellung des Projektes

Ziel dieses Vorhabens war die Erhöhung der Produktqualität bei gleichzeitiger Senkung des Fertigungsaufwandes bei der Herstellung von Leichtbaustrukturen für Schiffsaufbauten und deren Integration in den Schiffskörper durch die Entwicklung rührreibgeschweißter Leichtbaustrukturen. Über die Betrachtung typischer Anwendungsbereiche sollten die technische

Machbarkeit und die wirtschaftliche Nutzbarkeit nachgewiesen werden. Dies betraf sowohl die konstruktive Gestaltung, als auch die Fertigung dieser Strukturen, deren Integration (Montage) auf dem Schiff sowie deren Betriebsverhalten. Weiterhin wurde die Übertragbarkeit bestehender Klassevorschriften auf rührreibgeschweißte Hybridverbindungen analysiert und der Entwicklungsbedarf der Klassevorschriften im Sinne neuer Verbindungstechniken und deren Berechnung dargestellt. Unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten wurden konstruktive Typlösungen nach zuvor ermittelten Verbesserungspotentialen in Bezug auf Konstruktion und Fertigung rührreibgeschweißter Hybridverbindungen entwickelt. Als Endergebnis sollte ein Designkatalog für ausgewählte Leichtbaustrukturen stehen, welcher u.a. innerhalb des Verbundprojektes als Grundlage für die Anfertigung von Labor- und Mock-Ups diente.

Voraussetzungen

Das Forschungsvorhaben lief über einen Zeitraum von zwei Jahren und ist in einem Verbund bearbeitet worden. Zu diesem Verbund gehörte die Werft Abeking & Rasmussen in Lemwerder, die Neptun Ship Design GmbH aus Rostock sowie die Forschungseinrichtungen GSI SLV Berlin-Brandenburg und das HZG Geesthacht. Das Vorhaben gliederte sich in vier Teilprojekte, ein Teilprojekt pro Partner. Die Abarbeitung der Teilprojekte oblag den jeweiligen Partnern. In regelmäßigen Projektmeetings wurden die erzielten Ergebnisse präsentiert und neue Zielvorgaben für spätere Meetings verfasst.

Teilvorhaben der Projektpartner

Die Werft Abeking & Rasmussen bearbeitete in Ihrem Teilvorhaben die Identifikation und Bewertung potenzieller Leichtbaulösungen in Aufbauten für Yachten / Mega-Yachten bzw. Kreuzfahrtschiffen für den Einsatz rührreibgeschweißter Strukturen. Das hieß im Einzelnen die Analyse von Schiffsaufbauten (Megayacht) bezüglich des Einsatzes von Leichtbaustrukturen, die Ermittlung der gegenwärtigen Produkteigenschaften von Leichtbaustrukturen, die Bestimmung des aktuellen Fertigungs- und Montageaufwandes ausgewählter Strukturen, eine Definition von Anwendungsbereichen für rührreibgeschweißte Strukturen, die Überprüfung der Übertragbarkeit auf Cruiser und Yachten und eine Abschätzung der Potenziale hinsichtlich Verbesserung der Produktqualität in Verbindung mit einer Senkung des Fertigungs- und Montageaufwandes.

Ein weiterer Punkt des Teilvorhabens von Abeking & Rasmussen war die Bestimmung der Integrationsanforderungen für die Fertigung und Montage rührreibgeschweißter Leichtbaustrukturen auf Werften und die Untersuchung der Entwicklung der Produktqualität und der Produktivität. Dazu gehörten die Arbeitspunkte: Erstellung des Anforderungsprofils an die Integration von

rührreibgeschweißten Leichtbaustrukturen in das Schiff, die Erstellung eines Anforderungsprofil an die Integration von rührreibgeschweißten Leichtbaustrukturen in den schiffbaulichen Fertigungs- und Montageprozess, die Ermittlung möglicher Produktivitätseffekte und Verbesserungspotenziale bezüglich der Produktqualität. Desweiteren Festlegungen von Optimierungsmaßnahmen (Konstruktion, Fertigung) und die Integration eines Mock-ups mit den entsprechenden Untersuchungen zum Betriebsverhalten dieses Mock-ups.

Die Neptun Ship Design GmbH beschäftigte sich zum einen mit der fertigungsgerechten Konstruktion rührreibgeschweißter Leichtbaustrukturen und zum anderen mit Berechnungsmodellen und Klassevorschriften für rührreibgeschweißte Leichtbaustrukturen. Zum ersten Paket gehörten die Untersuchungen ausgewählter Hybridverbindungen hinsichtlich des Verbesserungspotentials durch den Einsatz des Rührreißschweißens, eine Analyse und Bewertung der Ergebnisse von Abeking & Rasmussen, daraus ableitend die Entwicklung von konstruktiven Typlösungen für Hybridverbindungen mittels Rührreißschweißens in Zusammenhang mit der Ermittlung von wirtschaftlich und technisch sinnvollen Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens für Leichtbaustrukturen. Daraus folgten wiederum konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten von ausgewählten rührreibgeschweißten Leichtbaustrukturen, die Analyse der Anforderungen an einzusetzende Halbzeuge und die Erstellung eines Designkataloges für ausgewählte Leichtbaustrukturen und Hybridverbindungen.

Zu dem zweiten Paket gehörten in erster Linie die Recherche von Berechnungsmethoden für herkömmliche Leichtbaustrukturen und eine Analyse von verfügbaren Berechnungsmethoden für Hybridverbindungen mittels Schweißverbindern. Auf Grundlage der von Forschungsinstituten ermittelten Produktparameter erfolgte eine Adaption der Berechnungsmethoden auf ausgewählte rührreibgeschweißte Hybridverbindungen (Aluminium / Stahl). Die Erarbeitung und Bestimmung des Entwicklungsbedarfs von Berechnungsmodellen für rührreibgeschweißte Hybridverbindungen in Verbindung mit der Überprüfung bestehender Klassevorschriften bildeten hier den Abschluss.

Die GSI mbH, NL SLV Berlin-Brandenburg (GSI-SLV) beschäftigte sich hauptsächlich mit den Bau und der Erprobung (werkstoff-technische Untersuchungen) von Labormustern rührreibgeschweißter Leichtbaustrukturen hinsichtlich der Beurteilung der Fertigungsgerechtheit der konstruierten Strukturen, der Gestaltung des Fügeprozesses und der Ermittlung des Fertigungsaufwandes mit entsprechender Anlagenkonfiguration. In Vordergrund standen dabei die Ermittlung der Prozessparameter für die Fertigung ausgewählter Strukturen, die Fertigung von Labormustern (Strukturbereiche) und dessen Erprobung. Weitere Punkte waren die Erarbeitung von Optimierungsvor-

schlägen für die Bauteilkonstruktion, die Erarbeitung des Aufwandes für das Fügen der Strukturen und die Bestimmung der Produktparameter (Qualität). Innerhalb dieser Arbeiten gab es eine enge Zusammenarbeit mit dem HZG in Geesthacht. Diese ergab sich aus den Ähnlichkeiten der Aufgaben im Projekt bzw. einer sinnvollen Arbeitsteilung zur Abarbeitung der einzelnen Arbeitspunkte. Außerdem konnten bereits bestehende Erfahrungen gegenseitig genutzt werden.

Die Arbeitspakete des Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG) lagen in der Anlagen- und Verfahrensentwicklung für rührreibgeschweißte Leichtbaustrukturen und der Definition notwendiger Verfahrens- und Anlagenentwicklungen für den wirtschaftlichen Einsatz des Rührreißschweißens für die Fertigung von Leichtbaustrukturen im Schiffbau. Eine Untergliederung der einzelnen Arbeiten wurde wie folgt vorgenommen: Definition von notwendigen Verfahrensentwicklungen für die effektive Fertigung rührreibgeschweißter Strukturen für Schiffsaufbauten, Ableitung von Anforderungen an die Gestaltung von Fertigungsanlagen für das Rührreißschweißen, Überprüfung der Einsatzfähigkeit verfügbarer Fertigungsanlagen für das Rührreißschweißen, Überprüfung der Integrationsfähigkeit von FSW-Anlagen in bestehende Fertigungslinien der Werften und eine Erstellung von Anforderungsprofilen für Fertigungsanlagen. Auch für diese Arbeiten wurde im Vorfeld eine sinnvolle Arbeitsteilung mit der GSI-SLV Berlin-Brandenburg besprochen und durchgeführt.

Wissenschaftlich und technischer Stand

Das Rührreißschweißen entsprechend der Definition nach DIN EN 14610, ist eine Variante des Reibschweißens, welches 1991 am TWI (The Welding Institute) in Cambridge entwickelt worden ist. Diese Variante des Reibschweißens wird mit FSW-Friction Stir Welding bezeichnet [1,2]. Dieses patentierte Fügeverfahren verbindet den Vorteil des Schweißens in der festen Phase, d.h. unterhalb des Schmelzpunktes der beiden Fügepartner, mit der Möglichkeit, lange Stumpf- oder Überlappstöße herzustellen. Der Werkstoff der Fügepartner wird durch Reibungswärme – erzeugt durch einen rotierenden Rührstift – plastifiziert und über eine entsprechende Schulter des Rührwerkzeuges in den Fügespalt gepresst. Bereits während des Abkühlens bildet das plastifizierte Material eine feste Verbindung zwischen den zu fügenden Teilen. Beim Rührreißschweißen werden die zu verschweißenden Werkstoffe auf eine Grundplatte gespannt, um das Verrutschen sowie das Ausdrücken des plastifizierten Materials aus dem Fügebereich zu verhindern. Eine besondere Nahtvorbereitung ist nicht erforderlich. Es wird ein zylinderförmiges Werkzeug aus einem (profilierten) Stift mit einer abgesetzten, breiteren Schulter eingesetzt. Das rotierende Werkzeug wird zunächst ohne Vorschubbewegung auf die Fügestelle gedrückt. Sobald die Werkstoffe im Bereich des Werkzeuges durch die Reibungswärme, die zwischen der Profilierung des

Pins und den Werkstücken entsteht, in den plastischen Zustand übergehen, taucht der Werkzeugstift in die Fügestelle ein. Durch das Reiben der Werkzeugschulter mit der Werkstückoberfläche entsteht zusätzliche Wärme. Ist ein ausreichender Plastifizierungsgrad des Werkstoffes erreicht, wird das Werkzeug entlang des Schweißstoßes bewegt. Dabei rührt der Werkzeugstift durch seine gewindeartige (oder aber auch anders gearbete) Profilierung das um sich liegende, plastifizierte Material in den Materialverdrängungsraum und von dort in den hinter ihm entstehenden Raum mit Materialmangel (das Material fließt, ähnlich wie beim Strangpressen). Hier bildet es nach seiner Abkühlung eine feste Verbindung. Siehe dazu auch die Beschreibungen in Abbildung 1.

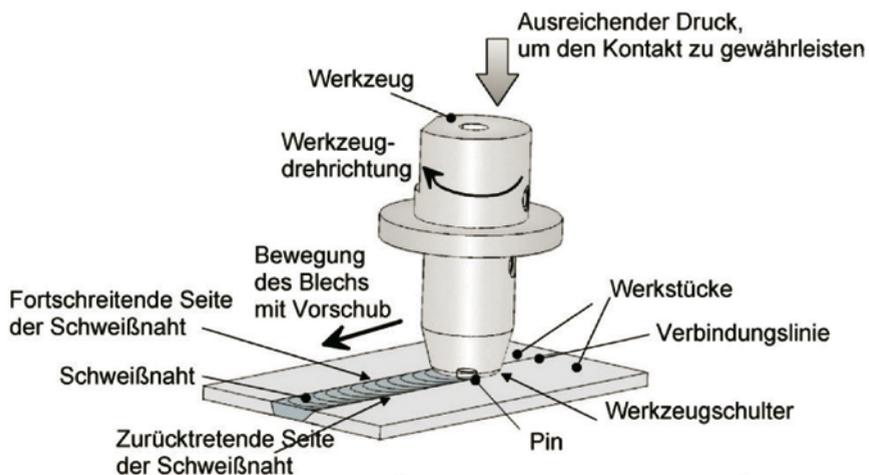


Abbildung 1: Schematische Darstellung des FSW-Prozesses [3]

Der Stand der Technik beim Rührreibschweißen ist im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass in zunehmendem Maße zahlreiche praktische Beispiele zum Verbinden von Aluminium und Aluminiumlegierungen in die Fertigung eingeführt werden. Gegenwärtig liegen Anwendungsfälle hauptsächlich im Schiffbau, in der Offshore- Industrie, im Waggonbau und im Flugzeugbau [4, 5, 6]. Zurzeit wird diese Technologie hauptsächlich von größeren Firmen angewendet. Dabei führen spezialisierte Dienstleister entsprechende Schweißarbeiten aus. Ein Kooperationsverbund bestehend aus Airbus Deutschland GmbH Bremen, EADS Deutschland GmbH München, KUKA Roboter GmbH Augsburg, sowie dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München erarbeitete das Rührreibschweißen von flexiblen 3D-Bauteilen mittels eines Knickarmroboters. Seit seiner Erfindung gab es eine rasante Weiterentwicklung des Verfahrens sowohl auf wissenschaftlicher Ebene, als auch im industriellen Einsatz und erobert sich in zunehmendem Maße seinen Platz neben den etablierten Schweißverfahren,

besonders in Bereichen, in denen diese an ihre Grenzen stoßen, wie zum Beispiel beim Fügen nicht schmelzschweißgeeigneter Werkstoffe. Innerhalb weniger Jahre wurde durch Studien gezeigt, dass neben Aluminiumlegierungen eine Vielzahl weiterer Konstruktionswerkstoffe von Magnesium über Stahl bis hin zu Titan ohne Zusatzwerkstoff schweißbar sind. Einen interessanten Anwendungsbereich stellt die Möglichkeit dar, mittels FSW-Verfahren auch unterschiedliche Werkstoffe mit einander zu verbinden, wie Aluminium mit Kupfer oder auch Stahl mit Kupfer. Weitere Vorteile sind neben der hohen reproduzierbaren Nahtgüte der geringe Verzug, geringe Schweißeigenspannungen, Porenfreiheit, ein geringer Energieverbrauch sowie minimaler Aufwand bei Nahtvorbereitung und Nacharbeit der Nähte. Die durch das Rührreißschweißen entstandene Nahtform führt im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren für Aluminium zusätzlich zu Material- und damit Gewichtseinsparungen. Weiterhin werden die Arbeitsbedingungen für die Schweißer deutlich verbessert. Die erforderlichen Aufwendungen für den Arbeitsschutz (Strahlung, Gase, Lärm) werden erheblich reduziert. Leichtbaustrukturen sind im Schiffbau, insbesondere im Fähr-, Yacht- und Kreuzfahrtschiffbau gefragt und unerlässlich. Die Herstellung zuverlässiger Schweißverbindungen nimmt dabei eine Schlüsselstellung ein. Die FSW-Technologie kann diesen Anspruch erfüllen. Die Vorteile und die damit einhergehenden Einsparpotenziale kann an den folgenden Punkten festgemacht werden:

- Geringe Fehleranfälligkeit – hohe Prozessstabilität
- Bei entsprechender Unterlage entfällt Nacharbeit der Nahtunterseite, die Nahtoberfläche kann eventuell ebenfalls belassen werden
- Fügen von Werkstoffkombinationen (z.B. Al/St) und nicht schmelzschweißgeeigneten Werkstoffen (z.B. AlCu, AlLi)
- Keine spezielle Nahtvorbereitung erforderlich
- Kein Zusatzwerkstoff und keine Hilfsstoffe erforderlich
- Große Wandstärken einlagig schweißbar
- Je nach Bauteilgeometrie ist ein Schweißen mit Fräsmaschinen möglich
- Mehrblechverbindungen möglich
- Keine ausgebildeten Schweißer nötig

Der wirtschaftliche Einsatz des Rührreißschweißens für das Fügen von Leichtbaustrukturen setzt die Identifikation der geeigneten Bereiche im Schiff voraus und erfordert die konstruktive (fertigungsgerechte) Gestaltung dieser Strukturen. Die speziellen Anforderungen dieser Fügetechnologie an die Produkt- und Prozessgestaltung übersteigt die fachliche Kompetenz einzelner Werften. Nur über die Kooperation von Schiffbauern (Werften), Verfahrenstechnikern und Konstrukteuren ist die Entwicklung und Anwendung von rührreibgeschweißten Strukturen im Schiffbau realisierbar. Das klassische Einsatzgebiet des Rührreißschweißens ist gekennzeichnet durch das Verbinden

langer Aluminium-Strangpressprofile zu Paneelen. Diese Paneele kommen bisher im Schiffbau unter dem generellen Aspekt der Masseminimierung zum Einsatz. Insbesondere im Schiffbau und in der Offshore-Industrie sind leichte Strukturen für hoch liegende Aufbauten auch aus Stabilitätsgründen zwingend erforderlich (z.B. komplette Deckstrukturen bei Passagierschiffen).

Durchführung der Arbeiten, Ergebnisse der einzelnen Projektpartner

In Anbetracht des Standes der Technik beim FSW zum Zeitpunkt des Projektes lag der Schwerpunkt beim Fügen von Strangpressmaterialien zu Deckspaneelen. Dieses wurde am ehesten als kurzfristig realisierbar eingeschätzt, weil bei den Forschungsinstituten das notwendige Knowhow vorhanden war. Weitere, zukünftig langfristige Interessen unter anderem auch von Abeking & Rasmussen (A&R), die hier als Referenzwerft fungiert, liegen im Fügen von Sandwichpaneelen sowie dem Herstellen von Stahl/Aluminium-Verbindungen mittels Rührreißschweißen.

Strangpressprofile und Sandwichpaneele werden in Schiffen schon seit geraumer Zeit verbaut. Daher steht die Integrationsfähigkeit nicht zur Disposition. Allerdings sind die Fügeverfahren, mit denen die Bauteile zusammengesetzt werden, zu betrachten.

Strangpressprofile werden in einer Standardbreite von 600mm hergestellt. Die Längskanten sind mit Nut und Feder versehen, die auch als Schweißbadsicherung für das MIG-Schweißen dienen. Um dieses Profil mit dem FSW-Verfahren fügen zu können, muss es abgewandelt werden. Die Längskanten müssen glatt sein, Nut und Feder entfallen somit. Hier waren u.U. konstruktive Änderungen nötig. Bei den Sandwichpaneelen gibt es zwei Verbindungsstellen zur Beachtung. Zum einen die Verbindung von Sandwichpaneel zu Sandwichpaneel und zum anderen die Verbindung von Sandwichpaneel zu „normalen“ Platten.

Bei den Stahl/Aluminium Verbindungen wurden früher Aluminiumaufbauten mit Schrauben mit dem Stahlrumpf verbunden. Die heute standardmäßige Verbindung zwischen Aufbau und Rumpf findet über sog. TRICLAD (Abbildung 2) statt. Diese im Schiffbau umgangssprachlich auch als „sprengplattiertes Material“ benannten Bauteile gibt es als Stangenmaterial oder als Platten.

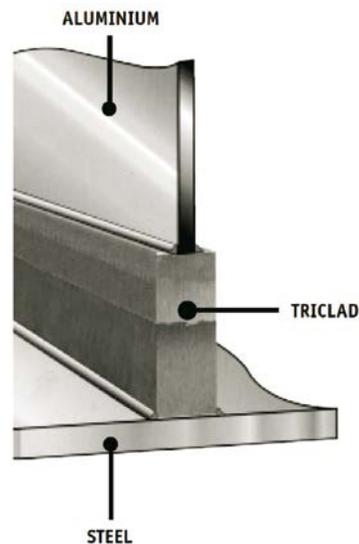


Abbildung 2: Triclad Verbindung

Prozessbedingt können beim MIG-Schweißen Fehler (Poren, Anbindungsfehler, falscher Schweißzusatzwerkstoff usw.) auftreten. Um diese Fehler auf ein Minimum zu reduzieren, werden gemäß Klassevorschriften stichprobenartig Nähte am Schiff geprüft. Wird ein Fehler in der Naht erkannt, wird dieser behoben, indem die Naht ausgeschliffen und eine neue Schweißnaht gelegt wird. Dadurch sind dann eventuell erneut Ausrichtarbeiten erforderlich. Ergo muss zur Kontrolle ein hoher Aufwand betrieben werden und trotzdem kann keine einwandfreie Naht garantiert werden. Außerdem wird beim klassischen MIG-Schweißen eine große Wärmemenge in das Material eingebracht. Diese verändert die Materialeigenschaften nachteilig und zieht Richtarbeiten nach sich. Diese Richtarbeiten bringen zusätzlich Wärme in die Konstruktion. Trotz des Ausrichtens (z. B. der Deckspaneele) bleiben Unebenheiten zurück, die beim Weiterbau der Konstruktion zu Passungenauigkeiten führen. So werden z.B. die Außenbereiche im Überwasserbereich einer Megayacht gespachtelt, um glatte Oberflächen für die Lackierung zu erhalten. Diese zusätzliche Masse an Spachtel wirkt sich nachteilig auf die Stabilität und den Tiefgang des Schiffes aus. Bei der Verbindung der Aluminiumaufbauten mit dem Stahlrumpf wird mangels ökonomischer Alternativen wie schon beschrieben TRICALD verwendet. Dies sorgt für eine Nahtanhäufung, teilweise erhöhte Spachteldicken und hohe Kosten (28 x 28 mm Stangenmaterial ca. 57,00 €/m).

Um die oben genannten Nachteile des Schmelzschweißens nicht auftreten zu lassen, folgen nachstehend einige konstruktive Anmerkungen, die die Notwendigkeit verdeutlichen sollen, das Rührreibschweißverfahren in den Schiffbau noch optimaler einfließen zu lassen.

MIG-geschweißte Paneele aus Strangpressprofilen sind oft durch die Wärmeeinbringung verzogen. Daher ist ein Fügen der Profile mit dem FSW-Verfahren, bei dem eine deutlich geringere Wärme in das Material gebracht wird, sinnvoll. Der Vorteil dieses Verfahrens wurde als so groß angesehen, dass bereits während des Forschungsvorhabens mit dem ersten Schiff begonnen wurde (A&R), dessen Decks jetzt rührreibgeschweißt sind.

Wie man rechts auf der Abbildung 3 sehr gut erkennen kann, ist ein Verzug auf dem rührreibgeschweißten Paneel praktisch nicht vorhanden. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den Sandwichpaneelen zu beobachten.

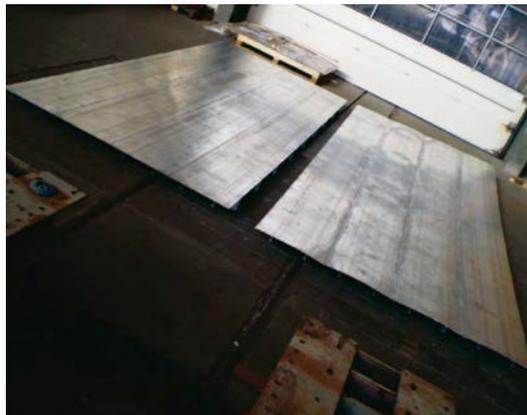


Abbildung 3: FSW und MIG-geschweißtes Deckspaneel

Im Verlauf der Forschungen wurden erste Erfolge bei der Verbindung von Stahl und Aluminium durch das FSW-Verfahren erzielt. Allerdings anfangs nur bei Materialstärken von 4mm, was für die Anwendung im Schiffbau zu gering ist. Dafür werden Verbindungen mit einer Materialstärke von 6-10mm benötigt.

Beispiele aus der Projektbearbeitung

1. Rührreibgeschweißte Fensterrahmen

Bei der Variante der Fensterrahmenkonstruktion dient ein Rundeisen mit dem Durchmesser von 35mm als Verbindungsstück zwischen den Fensterrahmen und der Außenwand. Hier wird derzeit ein standardisiertes Schweißverfahren eingesetzt, welches durch den erhöhten Wärmeeintrag eine starke Verformung der Struktur hervorruft. Zudem ist ein erhöhter Ausbesserungsbedarf durch z.B. Spachtelarbeiten von Nöten, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit dieser Variante auswirkt.

Eine alternative Verfahrensweise mit der konventionellen Schweißung wird auf den folgenden Abbildungen dargestellt. Hier wurde anstelle des Rundeisens ein gerundetes Strangpressprofil verwendet. Die Herstellung und Verformung dieses Profil galt es genauer zu untersuchen.

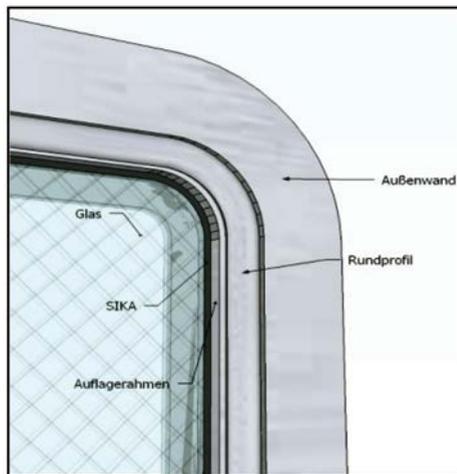


Abbildung 4: Fensterrahmen konventionell

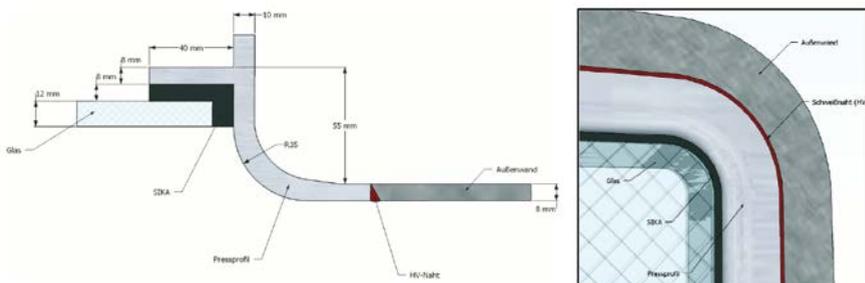


Abbildung 5: Fensterrahmen konventionell, alternativ

Rührreibgeschweißte Alternativen:

Variante 1

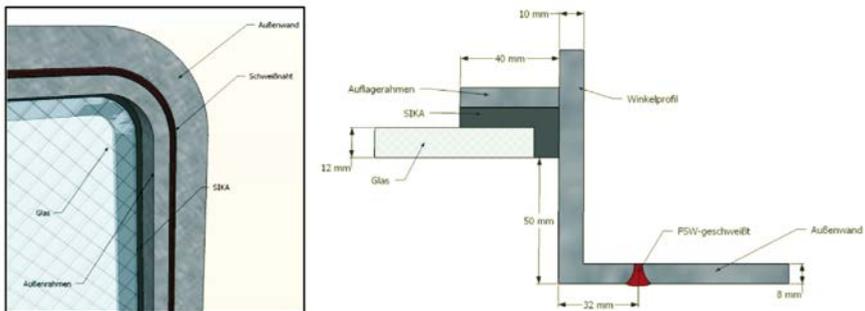


Abbildung 6: Möglicher Einsatz von FSW Variante 1

Durch den Verzicht auf das Rundeisen und den Einsatz eines Winkelprofils wird bei dieser Variante nur eine Rührreibschweißung zwischen dem Profil und der Außenwand benötigt, die den Fertigungsprozess deutlich beschleunigen würde. Diese Variante bedurfte aber einer genauen fertigungstechnischen Untersuchung.

Variante 2

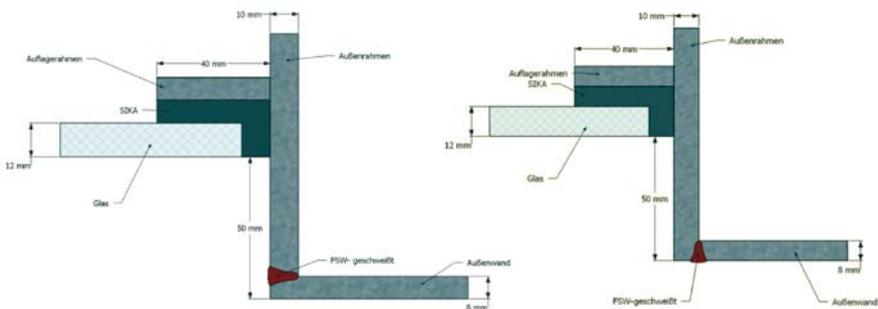


Abbildung 7: Möglicher Einsatz von FSW Variante 2

Ähnlich wie bei Variante 1 wird bei der Variante 2 ein Stumpfstoß als Schweißnaht vorgesehen. Bei dieser Version wird im Vergleich zu Variante 1 auf das Winkelprofil verzichtet und ein Flachstahl gewählt. Fertigungstechnisch ist auch diese Variante genauer zu untersuchen.

Variante 3

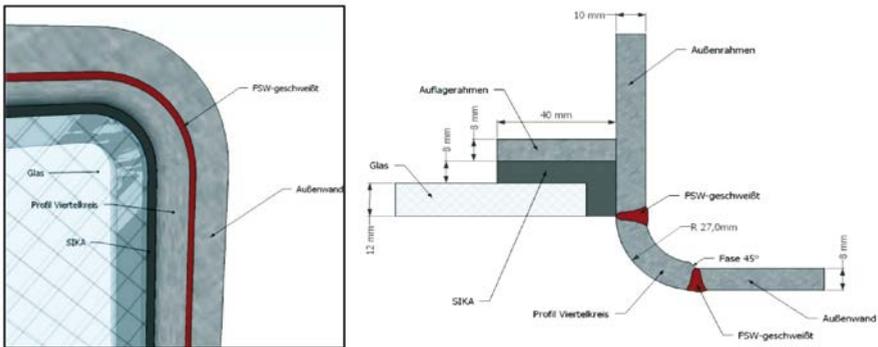


Abbildung 8: Möglicher Einsatz von FSW Variante 3

Variante 3 bringt den Vorteil der gerundeten Kanten wie beim konventionellen Schweißverfahren mit Rundeisen. Hier wird ein Viertelkreisprofil verwendet, welches an seinen Längskanten mit der Außenwand und dem Außenrahmen des Fensters rührreibgeschweißt wird. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig, ist aber der Ästhetik im Yachtbau geschuldet.

Variante 4

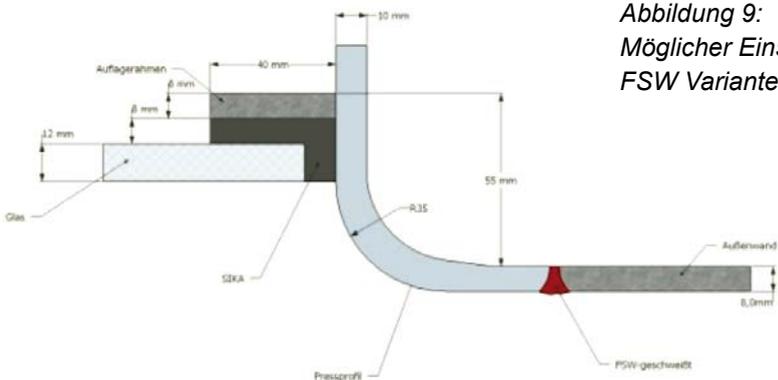


Abbildung 9:
Möglicher Einsatz von
FSW Variante 4

Aufbauend auf die alternative konventionelle Fensterrahmenkonstruktion gestaltet sich Variante 4. Hier wird ein verformtes Profil mit der Außenwand mit dem FSW- Verfahren geschweißt. Hierbei liegen die Vorteile bei dem geringen Fertigungsaufwand sowie dem geringen Wärmeeintrag. Auch der Ästhetik im Yachtbau wird Rechnung getragen.

2. Rührreibgeschweißte „Taylored-Plates“

Im Bereich von (Lagern oder Ecken (z. B. bei Außenluken)) werden lokal verstärkte Platten eingesetzt. Um im Kraftfluss keine Sprünge zu erhalten, müssen die dickeren Bleche angeschärft werden (siehe Abbildung 10). Es bestand immer schon die Möglichkeit beispielsweise 1mm-Bleche mit 2 mm-Blechen mit Rührreibschweißen zu verbinden. Das ist natürlich im Schiffbau keine ausreichende Materialstärke. Es musste daher in der Richtung geforscht werden, ob ein Verrühren von z. B. 6 mm- und 10 mm-Blechen möglich ist. Das HZG in Geestacht hat diese Aufgabe in sehr guter Qualität lösen können (Abbildung 10).

Anschärfung nach LR

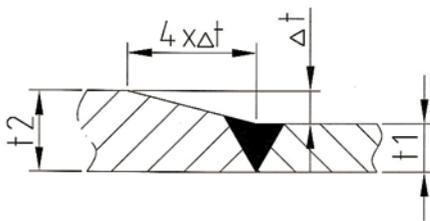


Abbildung 10:
Anschärfung nach Klasse-
vorschriften



Abbildung 11: Makrographischer Querschliff FSW-Schweißung, Taylored-Plates, mit optimierten FSW Parametern, in Schweißrichtung gesehen (6 / 8 mm)

3. Rührreibschweißen von Aluminium/Stahl-Verbindungen

Die GSI SLV Berlin-Brandenburg beschäftigte sich mit dem Rührreibschweißen von Stumpfstoßen an Aluminium/Aluminium- und an Stahl/Aluminium-Verbindungen. Erstere konnten in der dem Prozess innewohnenden guten Qualität den Projektpartner zur Verfügung gestellt werden. Bei den Stahl/Aluminium-Verbindungen ist noch Forschungsbedarf vorhanden. Zwar konnten große Qualitätssprünge getätigt werden, aber für einen Einsatz im Schiffbau muss noch an der fehlerfreien Reproduzierbarkeit gearbeitet werden. Auf dem Schliffbild (Abbildung 12) ist die positive Entwicklung deutlich erkennbar.

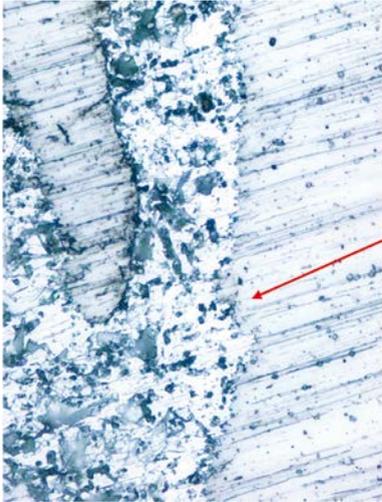


Abbildung 12: Schliff, der helle Bereich ist CrNi-Stahl ($t = 8 \text{ mm}$), keine scharfe Trennungslinie, deutliche Verbindungen bzw. Rührstrukturen sind erkennbar (Pfeil)

Bei den Versuchen wurde auch nach und nach auf eine größere Schweißnahtlänge abgezielt. Damit sollte der Eindruck vermieden werden, dass diese Arbeiten nur unter Laborbedingungen an kurzen Proben möglich ist. Für die Stahl/ Aluminium-Verbindungen wurde letztlich immer eine Schweißnahtlänge von 1000 Millimeter herangezogen. Das war notwendig, um bessere, praxisnahe Bedingungen zu erzeugen. Daraus ließen sich Erkenntnisse und Ergebnisse ableiten, die für einen späteren Einsatz wichtig werden können (Abbildung 13).

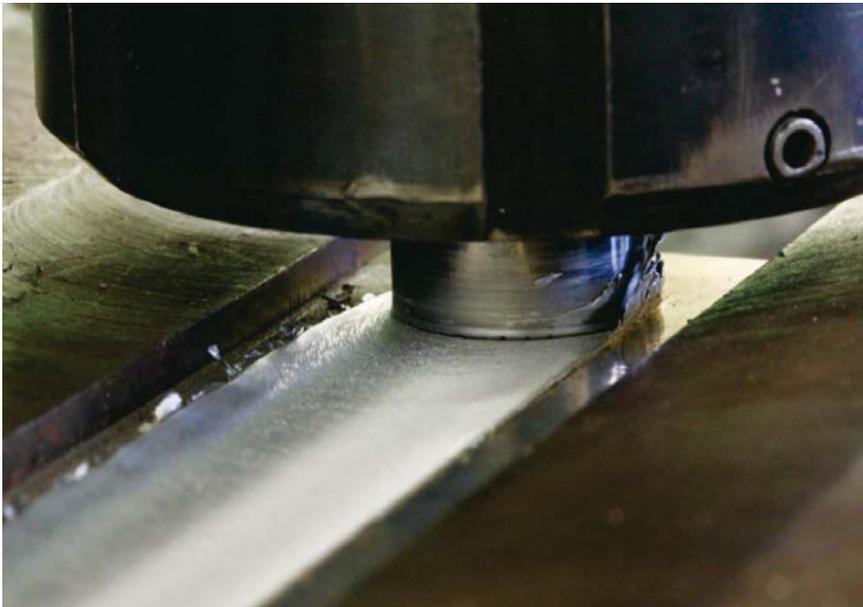


Abbildung 13: Aluminium/Stahl-Verbindung, während des Schweißprozesses

Trotz der sich positiv darstellenden Ergebnissituation muss darauf verwiesen werden, dass die Aluminium/Stahl-Verbindungen noch nicht für den industriellen Großeinsatz geeignet sind. Die Problematik des nicht hundertprozentigen Anbindens bestimmter Bereiche ist nach wie vor gegeben, auch wenn bei unseren Versuchen diese Fehlerart weitestgehend eingeschränkt wurde. Es reichen gewisse Ungängen aus, um eine Kerbwirkung zu erzeugen, die dann zum Versagen der Naht führen kann.

Kurze Zusammenfassung

Abschließen lässt sich sagen, dass das Rührreibschweißen auch schon während des Projektes erfolgreich Einzug in die Produktion des Projektpartners Abeking & Rasmussen gehalten hat. Wegen der positiven Erfahrungen wird es auch hier nach dem Ende des Forschungsvorhabens weitere Anstrengungen geben FSW-Nähte an anderen Stellen in die Konstruktionen einfließen zu lassen. Andere Werften haben ihr Interesse bereits bekundet. Auch sind die ehemaligen Projektpartner weiterhin daran interessiert auf dem Gebiet zu arbeiten. Eine Zusammenarbeit über das Projektende hinaus wurde beschlossen.

In dem Projekt wurden eine Vielzahl von Einzelergebnissen, Materialkennzahlen, Verbindungsalternativen erarbeitet und untersucht. All diese Ergebnisse können auf Grund der Vielzahl nicht erwähnt werden. Bei Interesse können diese aber bei den einzelnen Projektpartnern erfragt werden. Wir sind gerne bereit Ihre Fragen tiefgehend und ausgiebig zu beantworten.

Quellenverzeichnis

[1] Kallee, S.W. und Nicholas, E.D.: Reibrührschweißen: Erfindung, Innovation und Anwendung, TWI Ltd, Granta Park, UK, 2002

[2] Winkel, H.-J.: Friction Stir Welding - Rührreißschweißen von Aluminium – Vorteile gegenüber dem Schmelzschweißen. Vortrag zum DVS-Seminar in der SLV Berlin Brandenburg, DVS- Seminar, 2002

[3] Widmann, J.: Fachdidaktik Metalltechnik – Rührreißschweißen. <http://fdmt.iwb.mw.tumuenchen.de>, eingesehen am 31.03.2008

[4] Faust, B. und Linder, H.: Leichtbau in Aluminium Produktionsnaher Einsatz des FSWVerfahrens.WKW Erbslöh Automative GmbH, Velbert, 2001

[5] O. Blach und F. Senne: Reibrührreißschweißen aus der Sicht eines Anwenders im Schienenfahrzeugbau, Alstom LHB GmbH, Salzgitter, GKSS Workshop, GKSS Forschungszentrum, Geesthacht, 2002

[6] Lohwasser, D.: FSW im Flugzeugbau, Airbus Deutschland GmbH, Bremen, GKSS Workshop 2002

Verbundvorhaben ELKOS: Verbesserung der Kollisionsicherheit durch Integration struktureller Maßnahmen in die Leckstabilitätsberechnung moderner RoRo-Fahrgastschiffe

- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fricke
- Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger
- Dr.-Ing. Hendrik Dankowski
- Dipl.Ing.(FH) Karsten Werner

Förderkennzeichen 03SX284; Laufzeit: 01.08.2009 – 30.09.2013

Heutige, üblicherweise unter Gewichtsaspekten optimierte Schiffsentwürfe, stellen dünnwandige Plattenstrukturen in Leichtbauweise dar. Die innere Raumaufteilung dieser Strukturen wird wesentlich durch die internationale Vorschriftenlage im Bereich der Leckstabilität, welche für Werft- und Schiffseigner bindend sind, bestimmt. Das technisch vorhandene Potential weiterer Freiheitsgrade von Raumvariationen und besserer Raumausnutzungsgrade wird bei vorschriftengerechter Anwendung der SOLAS 2009 (internationale Gültigkeit ab 01.01.2009) und heute üblichen Konstruktionen von Schiffsdoppelhüllen nicht ausgeschöpft. Insbesondere haben RoRo-Fahrgastschiffe, die relativ wenige Passagiere befördern und gleichzeitig einen großen unteren Laderaum aufweisen, durch die vorhandenen Regeln nach SOLAS 2009 sogar ein insgesamt unbefriedigendes Sicherheitsniveau erhalten.

Das Vorhaben erarbeitet Methoden, welche strukturellen Maßnahmen und neuartigen Konstruktionsvarianten, die zur Erhöhung der Kollisionssicherheit in Seiteneindringfällen sorgen, in der Berechnung der Leckstabilität nach SOLAS 2009 angemessen berücksichtigt werden können. Weil diese neue Vorschriftenlage bestimmte unkritische Beschädigungsfälle auch explizit erlaubt, sind hiermit zusätzliche Freiheitsgrade für den Schiffsentwurf denkbar, die bei intelligenter Kopplung von Schiffsentwurf, Leckrechnung und Kollisionsrechnungen zu deutlich wirtschaftlicheren Produkten führen können und zugleich auch eine erhebliche Verbesserung der Schiffssicherheit bedeuten. Das vorgelegte Vorhaben setzt deshalb an der Schnittstelle zwischen Schiffsentwurf, Leckrechnung und Strukturmechanik an.

Die rechnerisch wahrscheinliche Kollisionsmechanik wird im Vorhaben durch realistische Großversuche an exemplarischen Varianten von Seitenhüllenkonstruktionen moderner RoRo-Fahrgastschiffsentwürfe etwa im Maßstab 1:3 nachgewiesen. Da in Kopplung der oben genannten schiffbaulichen Disziplinen große Mengen verschiedener Kollisionssimulationen zu berechnen sind, die nach Stand der Technik heute noch sehr zeitaufwendig sind, wird gleichzeitig anhand dieser Versuche die mögliche drastische Modellvereinfachung nachgewiesen.

Parallel werden die leckrechnungsrelevanten Ergebnisse wahrscheinlichkeitsverteilter realistischer Kollisionssituationen rechnerisch ermittelt, um eine möglichst breite Datenbasis und somit Ausgangsszenario für konstruktive Verbesserungen oder Seitenhüllen-Varianten zu schaffen.

Vorhabensteil I (Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) M10; Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen):

Validierung von Kollisionsberechnungen durch Großversuche an Konstruktionsvarianten von Seitenhüllen

Wesentlicher Bestandteil des Vorhabens war die systematische, versuchstechnische Untersuchung der Sicherheit von Schiffskonstruktionen im Kollisionsfall. Die durchgeführten Versuche legen das zur Bewertung der Kollisionssicherheit von Seeschiffen weitgehend etablierte Kollisionsszenario mit einem Kollisionswinkel von 90° zu Grunde. Die Versuche beschränken sich auf den Bereich der reinen Bugwulstkollision und auf die Abbildung der sogenannten inneren Kollisionsmechanik, also der reinen strukturmechanischen Vorgänge ohne Berücksichtigung der Schiffsbewegungen. Der Untersuchungsbereich ist in Bild 1 am Beispiel der Kollision zweier RoRo-Fährschiffe dargestellt. Das gerammte Schiff besitzt im Untersuchungsbereich eine konventionelle Doppelhüllenkonstruktion.

Die Kollisionsgegner wurden im interessierenden Kollisionsbereich modellhaft dargestellt. Bei einer Skalierung von etwa 1:3 werden die wesentlichen

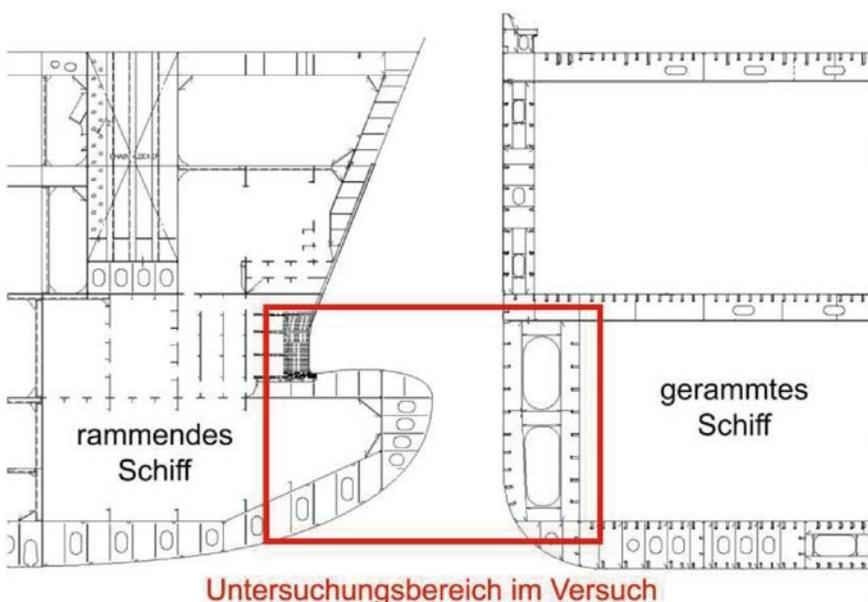


Bild 1: Betrachtetes Kollisionsszenario

		Rammendes Schiff	
		Konventioneller Bugwulst	Kollisionsfreundlicher Bugwulst
Vorversuche gegen starren Gegner		W 1 03.-04.03 2010	W 2 10.06. 2010
Gerammtes Schiff	Konventionelle Konstruktion der Seitenhülle	KV 1 09.-12.08 & 15.09. 2011	KV 2 09.-13.01. 2012
	Kollisionsfreundliche Konstruktion der Seitenhülle	KV 3 11.-14.06. 2012	KV 4 08.-10.01. 2013

Matrix der durchgeführten Versuche im Vorhabenszeitraum

konstruktiven Merkmale der Referenzkonstruktionen wiedergegeben. Grundsätzlich ist der Energieeintrag bei Schiffskollisionen sehr stark massedominiert, d.h. die Kollisionen finden bei verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten statt. Dynamische Effekte, insbesondere der Einfluss der Dehnungsgeschwindigkeit, können daher in der Regel vernachlässigt werden. Dies ermöglicht eine quasi-statische Betrachtung der Kollisionsmechanik im Versuch. Die quasi-statische Versuchsdurchführung bietet den weiteren Vorteil, dass der Versagensprozess sehr detailliert beobachtet und dokumentiert werden kann.

Dem ausgearbeiteten Versuchsprogramm liegt die Zielstellung zu Grunde, eine systematische Variation der Steifigkeiten beider Kollisionsgegner zu erreichen. Es soll dabei sowohl für die Seitenhülle als auch für den Bugwulst eine konventionelle Konstruktion sowie eine Variante mit verbesserten Kollisionseigenschaften – nachfolgend kürzer als „kollisionsfreundlich“ bezeichnet – untersucht werden. Daraus ergibt sich das in Tabelle 1 dargestellte Versuchsprogramm mit vier Kollisionsversuchen (KV). Dieses Programm wird um zwei Vorversuche (VV) ergänzt, die das Kollisionsverhalten von Bugwülsten gegen starren Gegner untersuchen.

Die kollisionsfreundliche Variante des Bugwulstes zielt auf eine konstruktive Lösung ab, die einen progressiven Kollaps mindestens im vorderen Bugwulstbereich begünstigt. Neben der zusätzlichen Energieaufnahme durch Verformung des Bugwulstes selbst, wird damit auch beim gerammten Gegner das Energieabsorptionsvermögen vergrößert, da die Verformung des Bugwulstes insgesamt zu einem stumpferen Eindringvorgang führt. Die kollisionsfreundliche Variante der Seitenhülle ist stahlbaulich nahezu identisch mit der konventionellen Konstruktion. Eine Verbesserung der Kollisionseigenschaften wird hier durch Einbringen eines Leichtgewichtsfüllstoffes aus multizellularen Glashohlkugeln erreicht (Füllstoffbezeichnung: Omega C-XL).

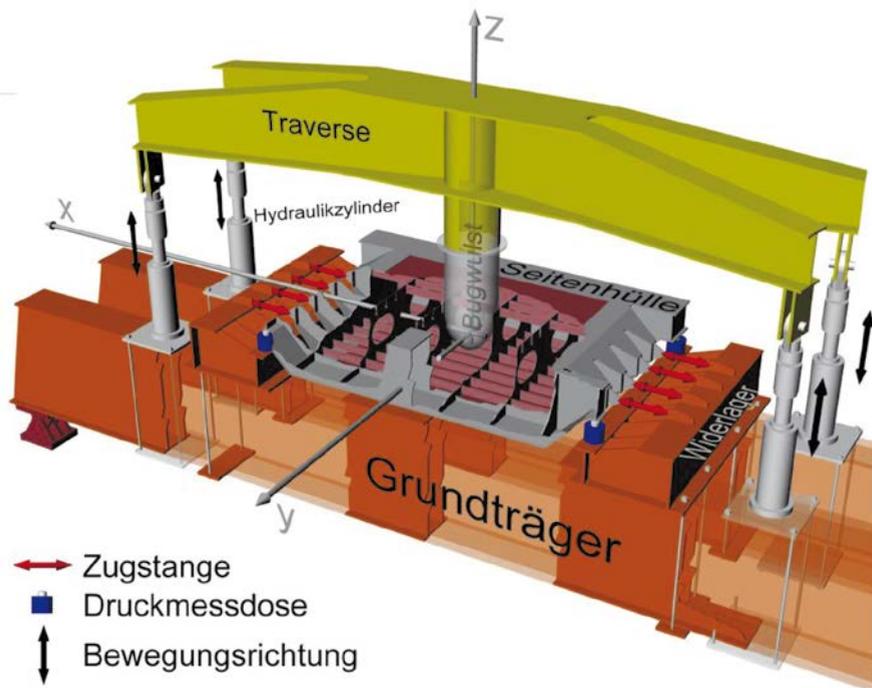


Bild 2: Gesamt-Versuchsaufbau für Kollisionsversuche in der Versuchshalle der TUHH

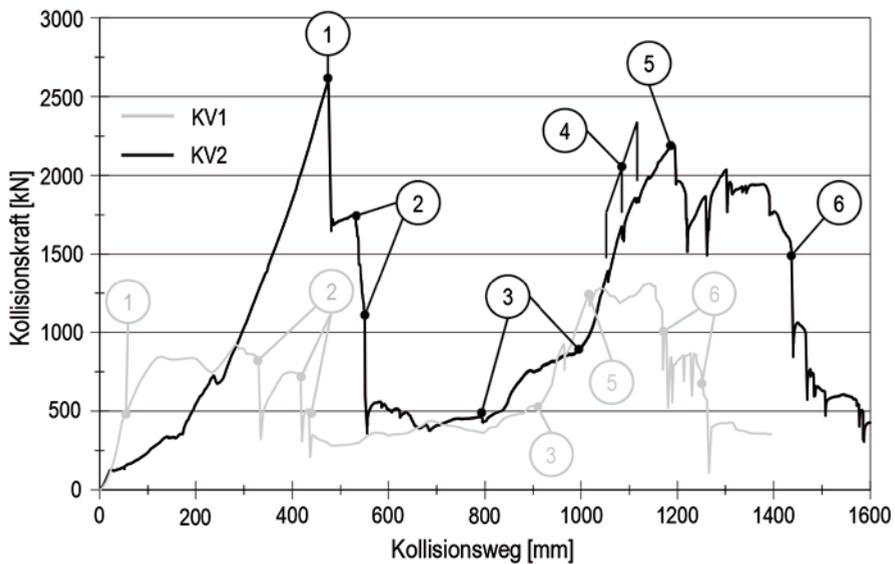


Bild 3: Gemessene Kollisionskraft über – Weg für KV1 und KV2

Bild 2 zeigt den gewählten Versuchsaufbau für die Kollisionsversuche. Der Modellbereich der Seitenhülle (dunkelrot) gibt eine typische schiffbauliche Doppelhüllenstruktur wieder. Er ist in einen sehr steif ausgeführten Stahlrahmen eingeschweißt (grau), der die Randbedingungen der umgebenden Schiffsstruktur abbildet. Die Seitenhülle ist in x-Richtung über je vier instrumentierte Zugstangen mit je einem Widerlager auf beiden Modellseiten verbunden. Diese Widerlager nehmen ebenfalls Kräfte in z Richtung über insgesamt vier Druckmessdosen auf. Die Krafteinleitung erfolgt über insgesamt vier servohydraulisch gesteuerte Hydraulikzylinder die über eine 10 m lange Traverse verbunden wurden. Mit dieser Anordnung können maximale Kollisionskräfte von 4.000 kN aufgebracht werden. Die Traverse wird mit einem rotationsymmetrischen, bugwulstähnlichen Kollisionskörper verbunden. Der beschriebene Versuchsaufbau ist symmetrisch um die y-z- sowie um die x-z-Ebene. Er ist mit zwei parallel angeordneten massiven Grundträgern verbunden, so dass ein geschlossener Kraftfluss innerhalb des Versuchsaufbaus gewährleistet werden kann.

Auszüge aus den Versuchsergebnissen sollen hier anhand von Bild 3 dargestellt werden. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied in den Kollisionskräften bei Verwendung eines verformbaren Bugwulstes (KV 2) gegenüber dem Versuch mit einem starren Bugwulst (KV 1). Nach dem Versagen von Aussenhaut an den Positionen 1 und den Aussenhautlängsspannten an den Positionen 2 kommt es in unmittelbarer Folge zu einem starken Kraftabfall. Erst bei Kontakt zu Bauteilen der Innenhülle kommt es an den Positionen 3 wieder zu einem signifikanten Kraftanstieg bis zum Versagen der Innenhülle an den Positionen 5. Nach dem Versagen der Innenhüllenlängsspannten (Positionen 6) wurden die Versuche abgebrochen. Nach Integration der Kraft Verformungsverläufe erhält man die dissipierte Kollisionsenergie. Durch den Einsatz eines verformbaren Bugwulstes in KV2 ergibt sich bis zum Versagen der Innenhülle etwa doppelt so viel dissipierte Energie im Vergleich zur Verwendung eines starren Wulstes bei KV1. Das Versagen der Innenhülle erfolgt bei KV2 ausserdem bei deutlich vergrößertem Kollisionsweg, so dass in der Großausführung zusätzlich auch oberhalb der Wasserlinie mehr Verformungsarbeit verrichtet werden würde.

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde ein kollisionsfreundlicher Bugwulst entwickelt, der im Wesentlichen aus einer völlig unversteiften Bugwulstkappe besteht, die an ein wasserdichtes Endschott angeschlossen wird. Die Kappe kann dadurch klassifikatorisch als Anhang an die Schiffsstruktur betrachtet werden, was möglichst großen Spielraum für konstruktive Alternativen in diesem Bereich lässt. Erst damit wird die Entfernung des Steifensystems in diesem Bereich auch für die Praxis möglich. Es lässt sich zeigen, dass auch ohne Steifen durch die stark gekrümmte Aussenhautkontur noch ausreichend Schalenstützwirkung vorhanden ist [1]. Dies gilt für Lastfälle wie Slamming oder hydrostatischer Druck, jedoch nicht für Schiffe mit Eisklasse.

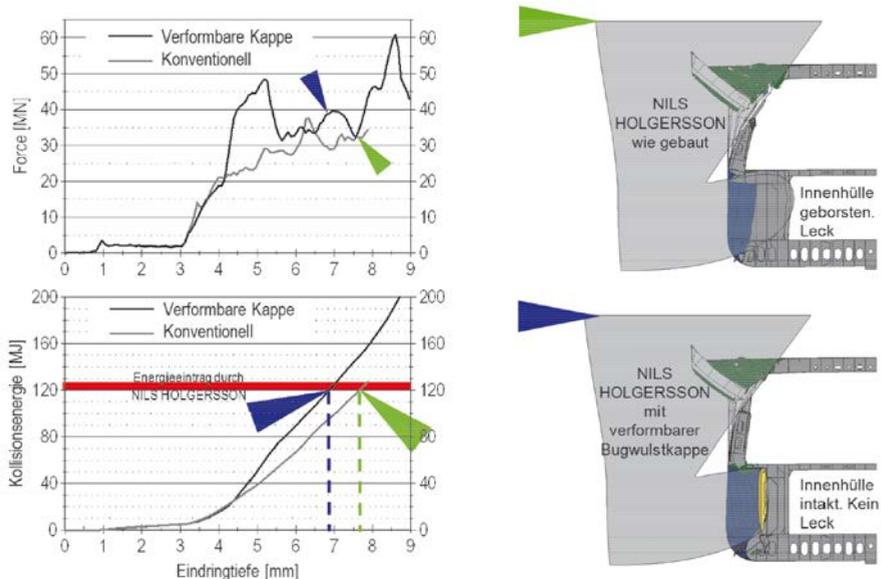


Bild 4: Berechnungsergebnisse bei 120MJ Energiedissipation für ein reales Unfallszenario und Änderung bei Verwendung einer verformbaren Bugwulstkappe

Um die Effektivität einer solchen verformbaren Bugwulstkappe nicht nur im Versuch sondern auch für die Großausführung zu bewerten, wurde ein reales Kollisionsszenario nachgerechnet. Es handelt sich dabei um die Kollision zwischen der RoPax Fähre Nils Holgeresson, die am 03.05.2012 im Hafen von Lübeck-Travemünde mit der am Liegplatz festgemachten RoRo-Fähre URD im Winkel von etwa 90° kollidierte [2]. Bei dem Unfall kam es zum Versagen der Innenhülle mit Wassereintritt in den unteren Laderaum der URD. Eine Berechnung dieses Unfallszenarios hat ergeben, dass es bei Verwendung eines Bugwulstes mit verformbarer Kappe nicht zum Versagen der Innenhülle gekommen wäre und folglich auch keine Flutung des unteren Laderaumes stattgefunden hätte (Bild 4).

- [1] Tautz I., Schöttelndreyer M., Gauerke J., Fricke W., Lehmann E. 2013. Structural Design of a bulbous bow with regard to collision safety. In: Brinkmann B. and Wriggers P.: Proc. of 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2013; Hamburg.
- [2] Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung. 2013. Kollision der Ro/Pax-Fähre Nils Holgeresson mit der Ro/Pax-Fähre URD im Hafen von Lübeck-Travemünde am 3. Mai 2012. Bericht 154/12.

**Vorhabensteil II: Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH),
M06; Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit:**

**Integration von strukturellen Maßnahmen zur Verbesserung
der Kollisionsicherheit von RoRo-Fahrgastschiffen in die Leck-
stabilitätsberechnung**

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das RoRo-Fahrgastschiff einen unteren Laderaum hat, weil diese Schiffe bezüglich der Sinksicherheit am kritischsten sind. Der Einfluss einer Doppelhülle auf die Sinksicherheit von RoRo-Fahrgastschiffen mit unterem Laderaum besteht zunächst darin, dass sie bei einer Seitenbeschädigung verhindern kann, dass der untere Laderaum dann nicht vollläuft, wenn der Treffer innerhalb der Doppelhülle verbleibt. Damit wird die Doppelhülle zunächst dadurch wirksam, dass sie das Treffen des Laderaumes in bestimmten Fällen verhindern kann. Der wesentliche Effekt der Doppelhülle ist dann gegeben durch die Wahrscheinlichkeit, dass diese bei einem Treffer durchschlagen wird. Diese Durchschlagenswahrscheinlichkeit wird bestimmt von der Breite der Doppelhülle an sich sowie dem Kollisionswiderstand der Struktur. Die Breite der Doppelhülle beeinflusst neben der eigentlichen Durchschlagenswahrscheinlichkeit noch die Restschwimmfähigkeit des Schiffes, da der unbeschädigte Teil der Doppelhülle ein erhebliches Aufrichtmoment erzeugt. Allerdings kostet die Breite der Doppelhülle auch wertvollen Laderaum oder bedeutet bei gleicher Laderaumkapazität ein breiteres Schiff. Im Prinzip ist für ein RoRo-Fahrgastschiff nach der SOLAS 2009 B1 eine Doppelhülle von je 1/10 der Schiffsbreite vorzusehen, weil alle Leckfälle mit B/10-Eindringtiefe überlebt werden müssen, ein solches Schiff aber einen Treffer im unteren Laderaum im Allgemeinen nicht überleben wird.

Für die Bewertung der Wirksamkeit einer solchen Doppelhülle ist es daher erforderlich, die Durchschlagenswahrscheinlichkeit dieser Doppelhülle zu berechnen, und das geht im Prinzip mit den Methoden, die in der SOLAS 2009 B1 vorgegeben sind. Will man aber den Effekt von spezifischen konstruktiven Maßnahmen bewerten, welche die Kollisionssicherheit verbessern sollen, in der Leckrechnung bewerten, dann muss dafür ein alternatives Berechnungsverfahren entwickelt werden, denn die SOLAS gibt dazu nichts her. Und genau die Entwicklung eines solchen Verfahrens war Gegenstand unseres Teilvorhabens im Verbundvorhaben ELKOS. Darüber wird in den folgenden Abschnitten berichtet.

Weiterhin erlaubt die Leckrechnung nach SOLAS 2009 B1 explizit, das Freiborddeck im Beschädigungsfall zu tauchen, was vorher wegen des sogenannten Margin-Line-Kriteriums nicht möglich war. Damit wird eine zusätzliche Doppelhülle auf dem Hauptfahrzeugdeck attraktiv, weil man damit ebenfalls große Aufrichtmomente erzeugen kann, wenn sich der Treffer auch auf das Hauptfahrzeugdeck erstreckt. Diese Doppelhülle wirkt also vor allem

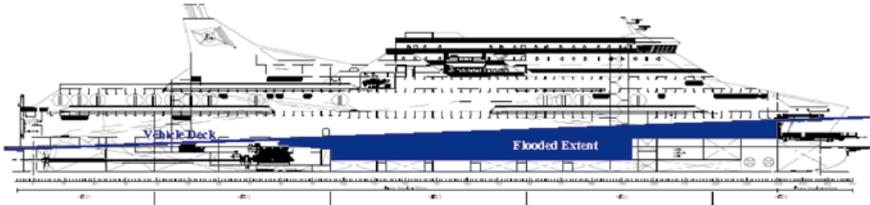


Bild 5: Generalplan des Referenzschiffes bei Treffer im unteren Laderaum

wegen des zusätzlichen Auftriebs, weniger wegen der Verhinderung des Flutens des Hauptfahrzeugdecks. Es liegt dabei auf der Hand, dass diese Doppelhülle möglichst schmal sein muss. Damit kommen wir zu folgenden Effekten, die zu erfassen sind:

- Änderung der Trefferwahrscheinlichkeit des unteren Laderaumes durch eine Erhöhung des Kollisionswiderstandes der Struktur
- Erhöhung des Aufrichtmomentes beim Treffen des oberen Laderaumes.

Als Referenzschiff für unsere Untersuchungen wurde eine RoPax-Fähre mit unterem Laderaum gewählt, die im Vorhaben für die EMSA [1] bereits intensiv untersucht worden ist. Das Schiff wurde speziell als SOLAS 2009 B1 Schiff entworfen. Für die KG-Grenzkurve ergaben sich nach der SOLAS 2009 B1 folgende Lecksicherheitsindizes:

Tiefgang	Verdrängung	Index	Index	Index
ss	[t]	PS	STB	Mean
Light	16081	0.724	0.680	0.702
Partial	19933	0.761	0.725	0.743
Deepest	22875	0.735	0.700	0.718

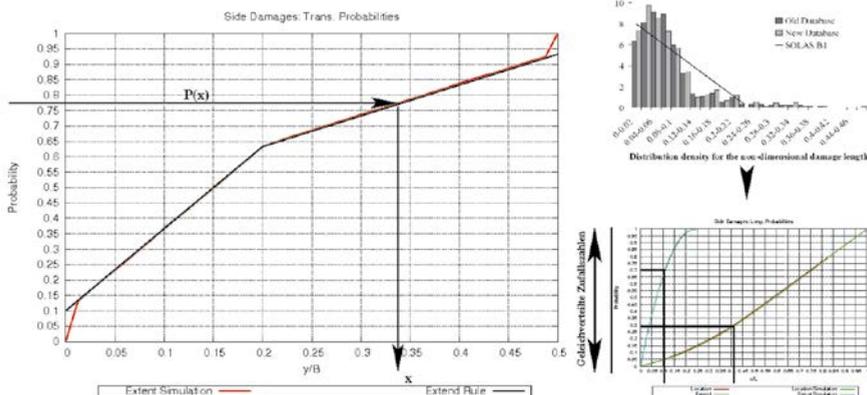


Bild 6: Beschädigungsgenerierung mit Zufallszahlen nach dem Monte-Carlo-Prinzip

Der Gesamtlecksicherheitsindex betrug 0.725, und damit erfüllt das Schiff gerade die SOLAS 2009B1. Zu bemerken ist noch, dass kein einziger Leckfall überlebt wird, bei dem der untere Laderaum getroffen wird, daher ist das Schiff (Bild 5) geeignet als Referenzschiff des Vorhaben.

Zum Einsatz bei unseren Untersuchungen kommt ein Verfahren, bei dem die Leckrechnung als Zufallsproblem aufgefasst wird. Mittels einer Monte-Carlo-Simulation erzeugt man gleich verteilte Zufallszahlen, aus denen dann mit Hilfe der in der SOLAS 2009 B1 vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Lecklänge, Lecklage, Eindringtiefe und Leckhöhe ein Beschädigungsquader erzeugt werden kann (Bild 6, links) Führt man diese Simulation beliebig oft durch, dann entsteht ein statistisches Kollektiv von Beschädigungsquadern, deren Verteilung den Grundlagen der SOLAS 2009 B1 entspricht. Wenn man jetzt ermittelt, welche Raumkombination durch jeden Leckquader getroffen wird und die Treffer für jede Raumkombination einfach zählt, dann lassen sich leicht SOLAS-konforme Trefferwahrscheinlichkeiten für jeden Ein- und Mehrabteilungsfall angeben. Das Verfahren ist robust, extrem schnell, und von uns in vielen Kontexten erfolgreich für die Bearbeitung von Leckrechnungsproblemen aller Art angewendet worden. Im vorliegenden Vorhaben ist das Verfahren auch deshalb besonders geeignet, weil man nur die zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen modifizieren muss, um den Einfluss einer strukturellen Maßnahme auf die Leckrechnung bewerten zu können.

Ausgangspunkt für unser Verfahren zur Berechnung von Durchschlagenswahrscheinlichkeiten für die Leckrechnung sind Kollisionsrechnungen, welche die Energieaufnahme der Struktur über der Eindringtiefe liefern. Weil solche Berechnungen sehr aufwändig sind, wurde Wert darauf gelegt, mit möglichst wenigen solchen Berechnungen auszukommen. Bild 7 links zeigt die von der FSG berechnete Energieaufnahme von zwei Strukturvarianten einer B/5-Doppelhülle über der Eindringtiefe. Dabei ist der Verlauf der kinetischen Energie des eindringenden Schiffes über der Zeit dargestellt, jede Kurve endet, wenn die Doppelhülle durchschlagen wird. Berechnet wurden dabei

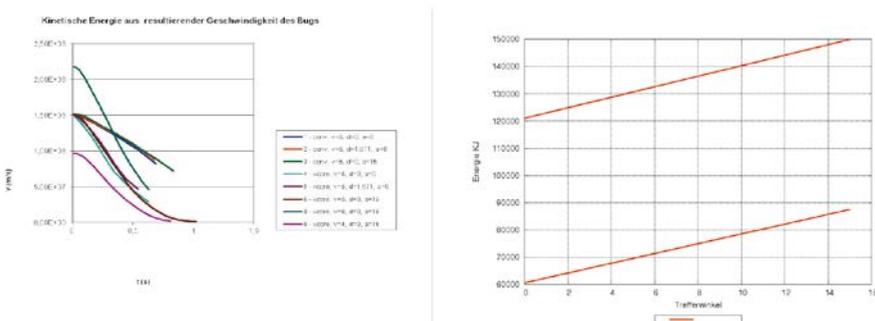


Bild 7: Ergebnisse von Kollisionsrechnungen für zwei alternative Strukturkonzepte (links) und Energieaufnahme über dem Auftreffwinkel (rechts).

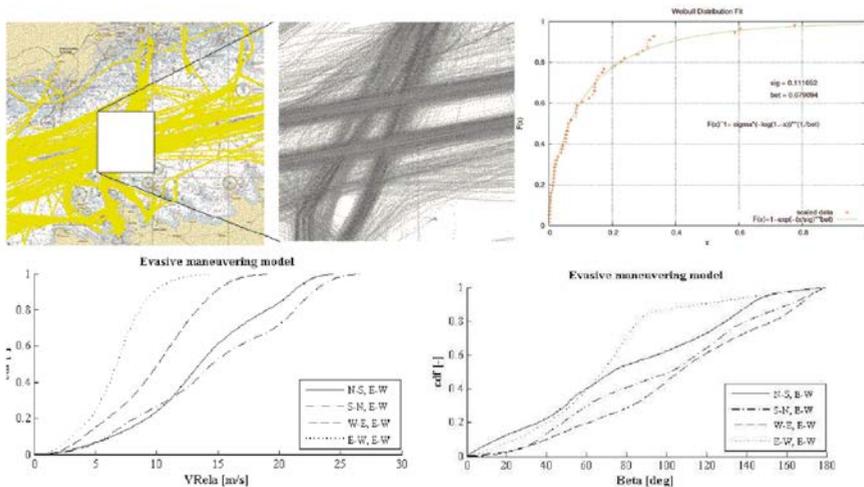


Bild 8: Betrachtete Routen von Ehlers auf der Ostsee (oben, links und Mitte) sowie die von ihm berechneten Verteilungen der relativen Treffergeschwindigkeiten und Auftreffwinkel (unten). Oben rechts die statistische Verteilung der Schiffsgrößen nach Lützen.

mehrere Auftreffwinkel für beide Strukturen. Daraus lässt sich dann für beide Strukturkonzepte ermitteln, welche Energie die Struktur aufnehmen kann, bis die Doppelhülle durchschlagen wird (die Differenz zwischen dem Anfangs- und Endpunkt der Kurve). Bei den Berechnungen zeigt sich eine Besonderheit für RoRo-Fahrgastschiffe, nämlich, dass der wesentliche Teil der Kollisionsenergie zwischen Vorsteven und der Überwasserstruktur des getroffenen Schiffes umgesetzt wird. Daher kann man davon ausgehen, dass der Tiefgang des treffenden Schiffes keinen Einfluss auf das Problem hat (das getroffene Schiff fährt praktisch immer auf dem gleichen Tiefgang), so dass es hier ausreicht, die Kollisionsenergie über dem Trefferwinkel zu formulieren. Ab einem Trefferwinkel von deutlich mehr als 15 Grad durchschlägt das treffende Schiff die Doppelhülle nicht mehr, weil sich die Schiffe ineinander verhaken, das dass es im Rahmen dieses Verfahrens zunächst ausreicht, den Trefferbereich zwischen 0 Grad (senkrecht auf die Schiffsmittellinie) bis zu 15 Grad davon zu betrachten. Damit liegt jetzt fest, welche Kollisionsenergie die beiden Schiffe aufnehmen können, bis jeweils die Doppelhülle durchschlagen wird.

Nun muss die statistische Verteilung der Kollisionsenergie bestimmt werden. Dazu greifen wir neuere Entwicklungen von Ehlers [2] auf, siehe Bild 8.

Ehlers hat Schiffsrouten auf der Ostsee (ein typisches Einsatzgebiet für RoRo-Fahrgastschiffe) von Schiffen analysiert und gefunden, dass die Hauptverkehrsrouten im Wesentlichen in Nord/Süd sowie in Ost/West-Richtung verlaufen. Wenn zwei Schiffe miteinander kollidieren, dann versucht entweder eines (oder beide) noch ein Manöver des letzten Augenblickes zu

fahren, dadurch entspricht der Auftreffwinkel nicht notwendigerweise dem relativen Kurswinkel der Schiffe zu einander; Gleiches gilt für die relative Treffergeschwindigkeit. Mittels eines dafür entwickelten Manövriermodells (Evasive Manoeuvring Model) simuliert Ehlers die Kollisionen von Schiffen und erhält so die in Abb. 4, unten gezeigten statistischen Verteilungen für die Treffergeschwindigkeit und der Auftreffwinkel. Weil die Kollisionsgegner auf unterschiedlichen Kombinationen der Routen unterwegs sein können, erhält man jeweils vier Kurvenscharen. Unserer Recherche nach sind die Arbeiten von Ehlers die ausführlichsten, die man zu diesem Problem finden kann, und seine Ergebnisse sind, wie man weiter unten sehen wird, sehr gut. Nun benötigen wir noch die statistische Verteilung der Schiffsgrößen, dies haben wir einer Arbeit von Lützen [3] entnommen, die im Rahmen des EU-Vorhabens HARDER erstellt wurde. Die Verteilung der Schiffsgrößen nach Lützen ist in Abb. 5 dargestellt, wir haben diese in eine Weibull-Darstellung überführt.

Mit Hilfe dieser Daten ist es jetzt möglich, eine statistische Verteilung der Kollisionsenergien und damit des Durchschlagens der Doppelhülle für beide Konstruktionen zu erstellen. Das Verfahren basiert auf einer Monte-Carlo Simulation, berücksichtigt die oben angegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, und funktioniert wie folgt.

- Man zieht eine Routenkombination.
- Man zieht eine Schiffsgröße, Auftreffgeschwindigkeit und einen Trefferwinkel. Dabei muss man beachten, dass bestimmte Kombinationen von Schiffsgröße und Geschwindigkeit nicht realistisch sind.
- Aus relativer Auftreffgeschwindigkeit und Schiffsmasse ermittelt man die Kollisionsenergie.
- Mittels des Auftreffwinkels ermittelt man die zulässige Kollisionsenergie bis zum Durchschlagen der Wand.
- Ist diese geringer als die kinetische Energie, wird die Wand durchschlagen.
- Das Zählen des Durchschlagens der Wand liefert die Trefferwahrscheinlichkeit.

Bild 9 zeigt die Ergebnisse unserer Berechnungen: Für die Doppelhülle üblicher Bauart ergaben die Kollisionsrechnungen eine Lecklänge von 15 m, das entspricht $J = 0.08$. Für die Breite der Doppelhülle ergibt sich daraus nach der SOLAS 2009 B1 eine Durchschlagenswahrscheinlichkeit von 0.712, dieser Wert wird von unserem Verfahren erstaunlich gut getroffen (vermutlich, weil die Eingangsgrößen von Ehlers sehr präzise sind). Die verbesserte Konstruktion mit etwa der doppelten ertragbaren Kollisionsenergie bringt aber nur eine Verbesserung der Durchschlagenswahrscheinlichkeit um etwa 4.8 %. Das liegt eindeutig darin, dass die Verbesserung der Kollisionssicherheit auf zu niedrigem Niveau stattfindet, statistisch gesehen sind zu viele Hochenergiekollisionen dabei.

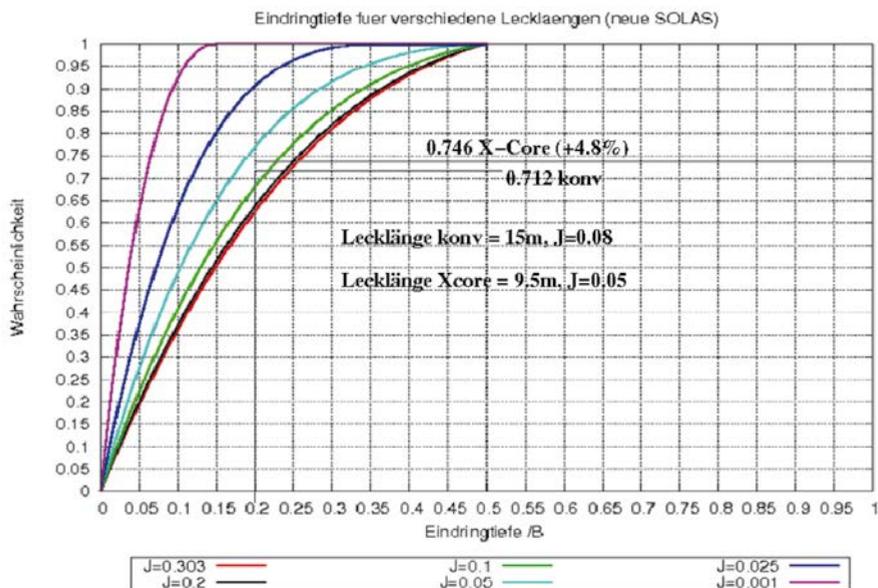


Bild 9: Berechnete Durchschlagswahrscheinlichkeiten für beide Konstruktionen

Wir haben nun die um 4.8 % modifizierte Durchschlagswahrscheinlichkeit in die Leckrechnung eingebaut, in dem wir eine entsprechend modifizierte Wahrscheinlichkeitsverteilung vorgegeben haben. Damit wurde die Berechnung der Leckrechnung wiederholt. Es zeigte sich eine Index-Verbesserung von maximal 0.8 % auf dem großen Tiefgang, und der ist der kritischste, weil dort kein einziger Treffer in den unteren Laderaum überlebt wurde. 0.8 % ist aber aus Sicht der Leckrechnung kein wirtschaftlich attraktiver Wert.

Daraus muss gefolgert werden, dass zumindest für RoRo-Fahrgastschiffe eine strukturelle Verbesserung des getroffenen Schiffes bezüglich Kollisionssicherheit nichts bringt, einfach deswegen, weil der Anteil der Niedrigenergiekollisionen bei diesen Schiffen zu gering ist.

- [1] Valanto, P.: Research for the Parameters of the Damage Stability Rules including the Calculation of Water on Deck of Ro-Ro Passenger Vessels, for the amendment of the Directives 2003/25/EC and 98/18/EC. HSWA Report No. 1669, HSWA, Hamburg.
- [2] Stahlberg, K., Ehlers, S., Kujala, P.: Design Scenario Modelling for Assessing Passenger Vessel Crashworthiness. Prof. IMDC 2012, Glasgow, P. 99
- [3] Lützen, M.: Ship Collision Damages. PhD Thesis, Technical University of Denmark (DTU), 2001

**Vorhabensteil III (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, FE;
Forschung und Entwicklung):**

**Entwicklung einer kollisionsmechanischen Untersuchungs-
methodik für verschiedene Seitenhüllenvarianten zur Ermittlung
von Leckrechnungsparametern**

Haupt-Bestandteil des Vorhabens war für die FSG die Konstruktion und der Bau aller Prüfkörper und Proben. Für den Vergleich verschiedener Konstruktionsvarianten wurde im dem von der FSG verwendeten 3D-Konstruktionsprogramm das Referenzschiff mit konventioneller Seitenhüllen-Konstruktion benutzt, dessen Mittschiffsbereich auch für die FEM-Berechnungen betrachtet wird. In enger Zusammenarbeit mit der TUHH wurde der Prüfkörper des Seitenhüllen-Modellkörpers entwickelt (Bild 10). Er besteht im Grundsatz aus der Doppelhüllenstruktur, welche in einer Art Rahmenkonstruktion eingefasst ist. Die Rahmenkonstruktion soll den Prüfbereich in der Weise tragen, dass der Einfluss der tatsächlichen umgebenen Schiffstruktur um den Kollisionsbereich des echten Schiffes berücksichtigt ist. Die Geometrie und die Materialfestigkeit der Rahmenkonstruktion wurden nach Berechnungen der TUHH dahingehend verändert, dass in dieser während des Versuchs keine wesentliche plastische Verformung auftritt. Weiterhin wurden fertigungstechnische Einflüsse wie Zugänglichkeit und Schweißbarkeit berücksichtigt. In Absprache mit der TUHH wurde die Konstruktion des Seitenhüllen-Modellkörpers außerdem dahingehend verändert, dass die Abmaße an die Zugangsöffnung zum Versuchsbereich der TUHH angepasst wurden. Damit ist ein notwendiger

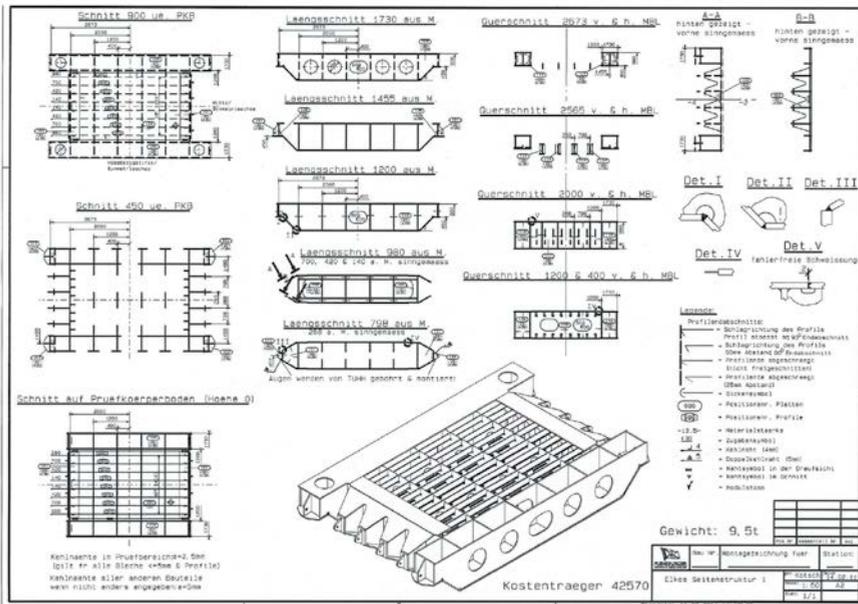


Bild 10: Konstruktionszeichnung Seitenhüllen-Modellkörper



Bild 11: Seitenhüllen-Modellkörper Versuch-1 im Bau und ein fertiger Bugwulst-Modellkörper (starr)

Zusammenbau des Prüfkörpers aus Komponenten in der Festigkeitshalle der TUHH vor Ort entfallen. Der Zusammenbau des Prüfkörpers erfolgte als Sonderarbeit in einer schiffbaulichen Fertigungshalle der FSG. Alle Bauteile wurden mittels Plasma ausgeschnitten. Alle Verbindungen sind mit MAG unter Verwendung eines 1,2 mm Fülldrahtes (EN ISO17632-A) manuell geschweißt worden.

Für die Großversuche wurden sowohl starre Bugwulstmodelle als auch teilweise plastisch verformbare Modellkörper angefertigt. Parallel wurde in den Versuchen ohne plastische Verformung des Bugwulstmodells der reine Anteil der Energieabsorption der Seitenhülle bestimmt. Für den starren Bugwulst-Modellkörper wurde zunächst in Erwägung gezogen, den bereits verwendeten deformierbaren Bugwulst in einer mit Beton gefüllten Variante zu fertigen. Da dies auf Grund von produktionstechnischen Nachteilen (Hinterschneidungen mit Gefahr von Lufteinschlüssen) und zusätzlichem Aufwand der materialtechnischen Abbildung in den Berechnungen unpraktisch erschien, wurde ein komplett neuer starrer Bugwulst aus Stahl konstruiert, welcher im Wesentlichen aus einem dickwandigen Rohr und einem aus einem Schmiedeteil gedrehten Formstück besteht (Bild 12). Dieser brachte neben dem relativ einfachen, aber steifen Aufbau den Vorteil guter rotations-symmetrischer Außenkontur.

Als weiterer Vorhabensbestandteil wurden Berechnungstests für die Großausführungssimulationen durchgeführt. Der Mittschiffsbereich des Referenzschiffs wurde dazu auf zwei verschiedene Arten beschrieben: a) konventionelle Konstruktion; b) Bauweise mit X-Core Paneelen. Wirtschaftliche und

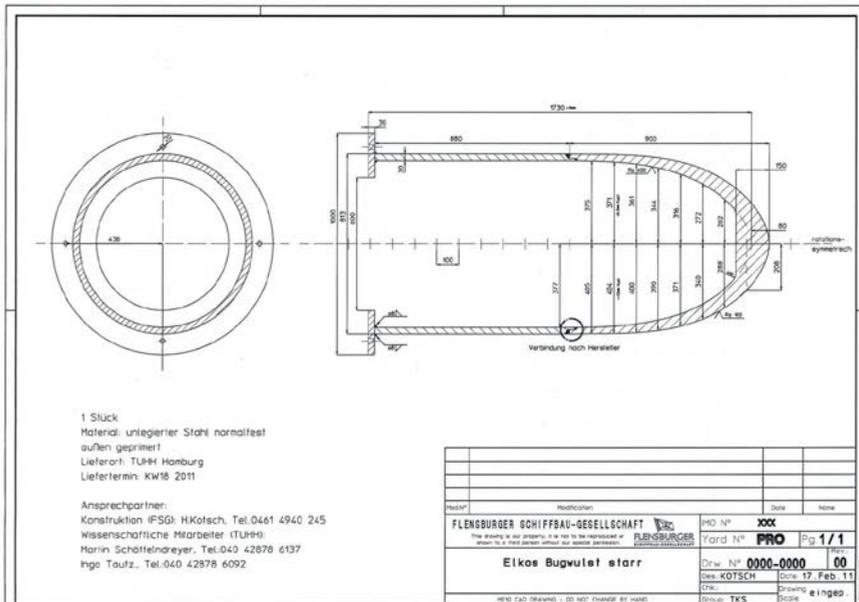


Bild 12: Konstruktionszeichnung Bugwulst-Modellkörper starr

Fertigungsaspekte wurde zunächst nicht beachtet. Ebenso bleibt die Berücksichtigung hydrodynamischer Massen und Strukturdämpfungen späteren Untersuchungen vorbehalten. Die in der Literatur beschriebenen Versagenskriterien für derartige Simulationen (nach GL; PES: nach Peschmann; RTCL: nach Rice/Tracey) kamen beispielhaft zur Anwendung und wurden auf ihre Tauglichkeit untersucht. Mit der Variationen sowohl von Auftreffwinkeln der Strukturen als auch der Lage des Mittelpunktes der Kollision (in Tiefgang und Länge) wurden erste Ansätze zur Ermittlung einer breiten Ergebnis-Bandbreite gelegt.

Als Kollisionsgegner wurde zunächst beispielhaft ein starrer Gegner angenommen. Dazu wurde die Außenhaut des Vorschiffs eines weiteren FSG-Neubaus in ANSYS vernetzt. Wesentliche Ziele der Rechnungen waren die

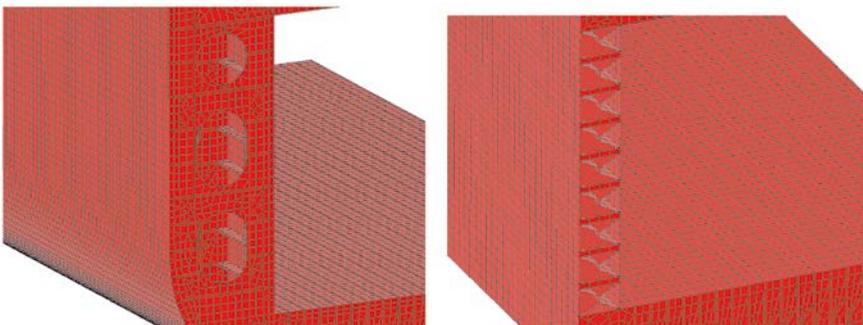


Bild 13: FE-Varianten der untersuchten Seitenstruktur (konventionell/X-Core)

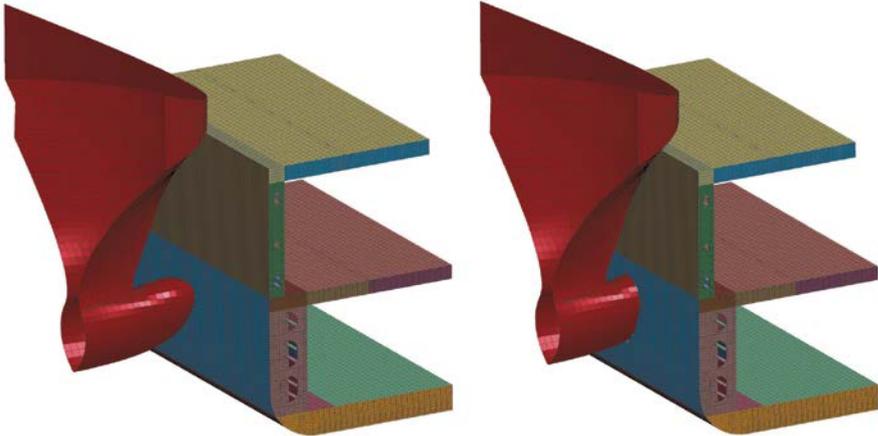


Bild 14: Anfangs- und End-Zeitschritt der Gesamt-Kollisionssituation

Ermittlung sinnvoller Vernetzungs-Parameter sowie die Einstellung einer problemangepassten Zeitschrittweite für die explizite Rechnung. Zur formalen Vergrößerung der Ergebnis-Datenbasis wurden verschiedene geometrische Parameter der Kollisionssituation variiert.

Bezüglich der Einstellung für die mittlere Vernetzungskantenlänge hat sich ein Maß von 200-400 mm als sinnvoll erwiesen. Hier bestand ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Konstanz im Ergebnis, wobei für die 400 mm-Vernetzung nur ca. 30 % der Rechenzeit des 200 mm Netzes anfallen. Für einen ersten Vergleich der Ergebnisse wurden die Energie-Verzehrverläufe von konventioneller und alternativer Konstruktion verglichen. Vermutlich aufgrund der noch unzureichenden Beschreibung der Gesamtsituation wurde bislang noch kein bewertbares Indiz für Verbesserungspotentiale erkannt.

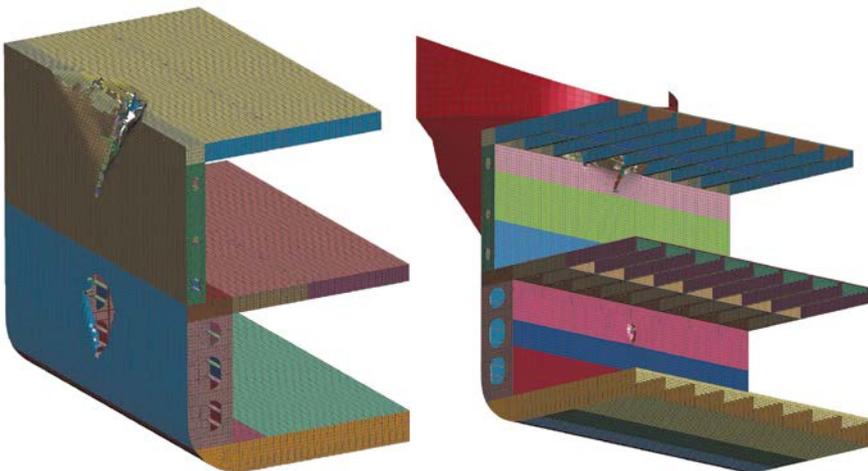


Bild 15: Beschädigungssituation nach vollständiger Energieumsetzung (konventionelle Hülle)

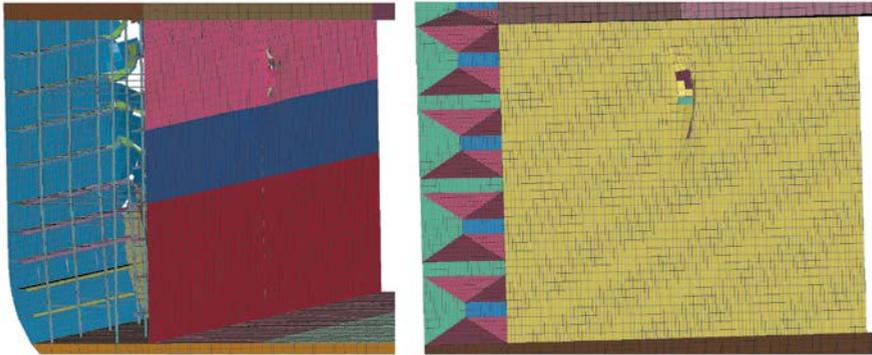


Bild 16: Vergleich der Eindringssituationen beider untersuchten Bauprinzipien

Als Versagenskriterien haben sich trotz hohem Beschreibungsaufwand sowohl PES als auch RTCL als gut handhabbar herausgestellt. Im derzeitigen Stadium benötigt sowohl die Vorbereitung der expliziten Rechnung einer einzelnen Kollisionssituation als auch die Berechnung selbst einen enorm hohen Zeitaufwand. Unter Verwendung beider oben beschriebenen Konstruktionen wurden Kollisionsrechnungen unter Variation mehrerer Parameter durchgeführt. Diese waren:

- Startgeschwindigkeit des auftreffenden Schiffes
- Auftreffwinkel (von der Hüllennormalen gerechnet)
- Tiefgangdifferenz

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde die Geschwindigkeit des auftreffenden Schiffes senkrecht zur Doppelhülle aufgezeichnet. Diese wurde anschließend quadriert und mit der Masse des auftreffenden Schiffes multipliziert, um so seine kinetische Energie zu erhalten. Aus diesem Energieverlauf, aufgetragen über der Zeit, ist dann ersichtlich, wie die Doppelhülle Kollisionsenergie aufnimmt und sich im Gegenzug die Geschwindigkeit des auftreffenden Schiffes verringert. Dieses ist in Bild 17 dargestellt. Es sind acht Energieverläufe aufgetragen, die jeweils von Beginn der Kollision bis zum Durchstoßen des inneren Teils der Doppelhülle und damit zum Wassereintrich verlaufen (Situation 7 ist hier nicht aufgeführt, da unter dem verwendeten Auftreffwinkel von 30° das auftreffende Schiff nach anfänglichem Eindringen an der Außenhaut entlang glitt und sich der Zeitschritt sehr stark verringerte, so dass die Rechnung abgebrochen wurde). Dies gilt nicht für die Kurven 6 und 9, da das auftreffende Schiff in diesen Situationen von der Doppelhülle aufgehalten wurde, bevor der innere Teil durchstoßen werden konnte.

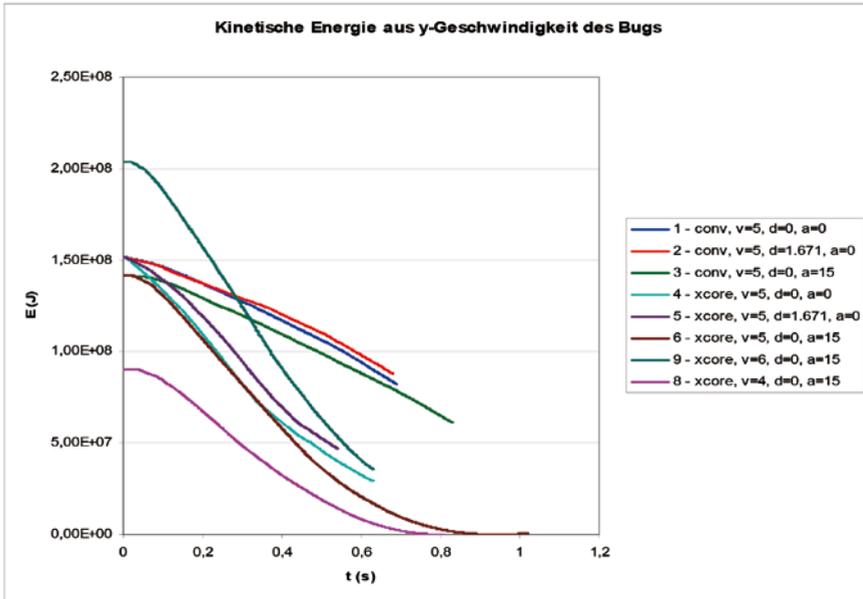


Bild 17: Kollisionenergie und Geschwindigkeit des auftreffenden Schiffes

Die Kurven zeigen, dass die X-Core-Hülle in einem gleichen Zeitabschnitt ein tendenziell höheres Energieaufnahmevermögen besitzt. Außerdem ist besonders aus den Kurven 6, 8 u. 9 ersichtlich, dass die Kurven bei Änderung nur eines Parameters (hier Startgeschwindigkeit des auftreffenden Schiffes) lediglich auf der Energieachse verschoben und auf der Zeitachse gestreckt sind, so dass ausgehend von diesen Ergebnissen auf eine Vielzahl ähnlicher Kollisionssituationen extrapoliert werden kann, ohne diese tatsächlich zu rechnen.

Um die Realisierung von besonders schmalen Doppelhüllen bei RoRo-/RoPax-Schiffen zu ermöglichen, wurden Maßnahmen zur Umverteilung der wegfallenden Verdrängung durch die Reduzierung der Doppelhüllenvolumina für Vergleichsschiffe untersucht. Hintergrund dieser Untersuchung ist der Wunsch, weitere Spurmeter für rollende Ladung bereit zu stellen, um die Effektivität und Kundenattraktivität der FSG-Schiffe zu erhöhen. Für die Umverteilung der Verdrängung wurden die hochstegigen, offenen Stahlstrukturen, welche sich durch die hohen Querrahmen der Fahrzeugdecks ergeben, in unserem Schiffsentwurfssystem als wasserdichte Abteilungen modelliert (Bild 18). Der Einfluss von hinzukommendem Gewicht durch den zusätzlich zu verbauenden Stahl zur Herstellung der Wasserdichtigkeit wurde an dieser Stelle vernachlässigt. Bei je einem RoPax- und RoRo-Schiff wurde dieser Bereich über dem Lower-Hold als drei in Schiffs-Querrichtung unterteilte wasserdichte Abteilungen modelliert (siehe Bild unten). Die Höhe der Querrahmen, welche die Höhe der wasserdichten Räume vorgibt, beträgt beim



Bild 18: Entwurfsansicht einer untersuchten Raum-Topologie

RoPax Schiff 1050mm und beim RoRo Schiff 1200mm. Die Ergebnisse der Leckrechnung haben gezeigt, dass sich der erreichte vorschriftenbasierte Unterteilungsindex A für das RoPax-Schiff von zuvor 0,788 auf 0,794 verbessert hat. Der erreichte Unterteilungsindex für das betrachtete RoRo-Schiff hat sich in ähnlichem Maße leicht von 0,701 auf 0,714 verbessert.

Die erreichten Verbesserungen sind zwar nicht signifikant, können aber durchaus ausschlaggebend sein für die Bestimmung der diskreten Anzahl von Stellspuren der Spurmeter unserer RoPax- und RoRo-Schiffe. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich eine feinere Unterteilung des Bereichs oberhalb des Lower-Holds in neun wasserdichte Räume auf die Ergebnisse auswirkt. Eine entsprechende Modellierung brachte jedoch keine Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich zur zuvor untersuchten Variante mit sich und wurde verworfen. Eine weitere Untersuchung in der Form eines analogen Vorgehen bei den Querrahmen über dem Hauptfahrzeugdeck hatte bei beiden Schiffen keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Leckrechnung, da sich dieser Bereich zu hoch über der Schwimmwasserlinie befindet und somit erst dann zusätzlichen Auftrieb generiert, wenn das Schiff im Leckfall bereits zu tief getaucht ist, um noch einen Beitrag für den Überlebensindex zu erzielen. Somit wurden im Falle der betrachteten RoRo-/RoPax-Schiffe lediglich die untersuchten Bereiche oberhalb des Lower Holds als wirksame potentielle Auftriebskörper ausgemacht. Der Einfluss auf den Überlebensindex ist insgesamt jedoch als gering einzuschätzen. Eine signifikante Reduzierung der Doppelhüllenbreite kann durch diese Maßnahmen im Hinblick auf die Lecksicherheit nicht aufgefangen werden. Die Entwicklung alternativer

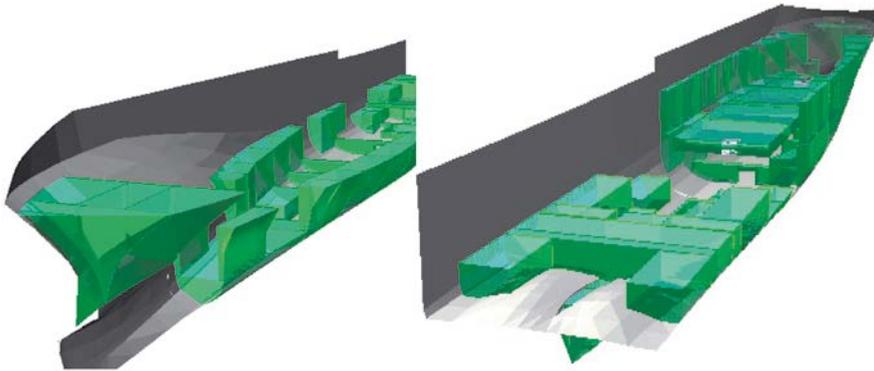


Bild 19: verschiedene Unterteilungsvarianten zur Verbesserung des Index

Unterteilungskonzepte zur Erhöhung der Leckstabilität (und damit des Sicherheitsniveaus) sowie zur Erhöhung der Spurmeter wurde weiter vorangetrieben. Eine Erhöhung der Spurmeter bei ansonsten annähernd unveränderten Schiffsabmessungen führt zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit der Schiffe und damit auch zu einem geringeren Schadstoffausstoß bezogen auf die Ladung. Dazu wurden weitere Raumvarianten untersucht, die zusätzlichen Überlebensindex bringen könnten. Sie sind in einer Übersicht in der folgenden Tabelle dargestellt. Daneben wurde der Einfluss der Rahmenhöhe bei wasserdicht abgeschlossenen Rahmen auf den Überlebensindex untersucht. Hierzu wurde die Rahmenhöhe in systematischen Untersuchungen erhöht und die erreichten Leck-Indices der zwangsläufigen Erhöhung des Schwerpunktes von Schiff und Ladung gegenübergestellt.

Variante	Index	Beschreibung
0	0,727	Ausgangsvariante – klassische Unterteilung in bewährter Form
2	0,738	Feinere Unterteilung der Void-Spaces – bei kleineren Beschädigungen wird die Schwimmlage positiv beeinflusst, da das geflutete Volumen verringert wird.
4	0,765	Geschlossene Rahmenstruktur auf dem Hauptdeck – hierdurch entsteht eine Art „Schwimmgürtel“, zusätzlicher Auftrieb, der vor allem im Rahmen der Hebelarmkurve den Leckstabilitäts-Index verbessert.
5	0,810	Wasserdicht abgeschlossene Deck-Rahmen zwischen unterem und Hauptfahrzeugdeck. Diese erzeugen einen Auftriebskörper, der im Fall eines beschädigten unteren Laderaumes das Volumen des gefluteten Raumes verkleinert und zusätzlich intaktes Auftriebsvolumen bereitstellt, welches den Tiefgang und die Hebelarmkurve des beschädigten Schiffes verbessert.

BunGas – Bunkering gas as fuel for ships

Johannes Beuse, MEYER Werft
Peter Hoffmann, DNV
Benjamin Scholz, GL

Einleitung

Im Rahmen der aktuellen Umwelt- und Emissionsdiskussionen rückt LNG als „alternativer“ Brennstoff in den Fokus der maritimen Industrie. LNG besitzt das Potenzial die Schiffsemissionen deutlich herabzusetzen, so dass die zukünftigen Emissionsgrenzwerte in sog. ECA/SECA (Emission Control Area/ Sulphur Emission Control Area) Gebieten eingehalten werden können. Der Einsatz von LNG an Bord eines Schiffes kann die Schwefelemission nahezu eliminieren, die NO_x-emissionen um 90 %, die CO₂ um 20 % und die Partikel-emissionen um ca. 100% verringern.

Um Gas als Schiffsbrennstoff in der maritimen Industrie etablieren zu können, ist die Entwicklung von Bunker Systemen/Prozeduren zum Betanken von gas-betriebenen Handelsschiffen notwendig. Dies beinhaltet die Entwicklung von technischen als auch organisatorischen Lösungen mit dem Fokus auf „Ship-to-ship transfer“.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen, thermodynamischen Eigenschaften von konventionellen Brennstoffen und LNG können die existierenden Bunkerprozeduren für konventionelle Brennstoffe in der Schifffahrt nicht direkt auf LNG übertragen werden. Bis jetzt bestehen keine allgemein anerkannten Standards für das Bunkern von LNG bzw. für die Schnittstelle zu einer land- oder seeseitigen Versorgung in Europa. Im Rahmen des „Bun-Gas“ Projektes wurden technische Systeme entwickelt, welche die Basis für ein sicheres und wettbewerbfähiges Bunkern von LNG in einer Hafenumgebung bilden und eine Anwendbarkeit der Ergebnisse auf jeden Schiffstyp gewährleisten.

Partner des Vorhabens waren:

- MEYER WERFT GmbH (MW)
- Det Norske Veritas (DNV)
- Germanischer Lloyd SE (GL)

Darüber hinaus beteiligten sich als assoziierte Partner AIDA Cruises, MAN Diesel SE sowie Linde AG an dem Projekt.

Richtlinien

Derzeitig ist es möglich, ein gasbetriebenes Schiff auf Basis der Interim Richtlinie, MSC.285(86), in Fahrt zu bringen. Diese Richtlinie stellt bis zum Inkrafttreten des IGF-Codes den Stand der Technik dar. Sowohl die Interim Richtlinie als auch der zukünftige IGF-Code beinhalten rudimentäre Anforderungen an die Bunkerstation allerdings keine Anforderungen an das Transfersystem als auch nicht an das Bunkerschiff.

Derzeitig beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe der ISO mit der Entwicklung einer Guideline für das Bunkern von LNG. Der GL beteiligt sich an dieser Entwicklung, so dass die Erkenntnisse des BunGas-Projektes in diese Richtlinienentwicklung eingebracht wurden. Dennoch stellt diese ISO-Guideline keine Prozedur für das Bunkern von LNG zur Verfügung, sondern zeigt funktionale Anforderungen für das Bunkern von LNG auf.

Darüber hinaus können bei einem LNG Bunkerprozess auch lokale Anforderungen der einzelnen Hafenstädte zum Tragen kommen.

Tanksysteme

Gemäß der Interim Richtlinie können verschiedene Tanksysteme an Bord von gasbetriebenen Schiffen eingesetzt werden. Das Bebunkern dieser Tanksysteme stellt aufgrund der einzelnen Auslegungskriterien unterschiedliche Anforderungen an das Bunkerschiff. Der Hauptunterschied zwischen den Tanksystemen ist der Auslegungsdruck und daraus resultierend die unterschiedliche Geometrie. Die Tanksysteme gliedern sich gemäß International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC-Code) in:

- Type A: komplette zweite Barriere, prismatisches Design, der Auslegungsdruck beträgt max. 0,7 bar Überdruck.
- Type B: teilweise zweite Barriere, prismatisches Design, der Auslegungsdruck beträgt max. 0,7 bar Überdruck.
- Type C: keine zweite Barriere, zylindrisches Design, der Auslegungsdruck beträgt max. 10 bar Überdruck.

Ein seegehendes Bunkerschiff ist im Allgemeinen gemäß den Anforderungen des IGC-Codes zu entwerfen und zu bauen, so dass auch an Bord des Bunkerschiffes die genannten Tanksysteme zum Einsatz kommen. Die derzeitige bevorzugte Tanklösung eines Bunkerschiffes bzw. des Empfängerschiffes sind aufgrund des hohen Auslegungsdruckes Type C-Tanks.

Anhand dieser verschiedenen Tanklösungen ergibt sich aber auch die Herausforderung beim Bunkern von LNG, da entstehendes Boil off Gas (BOG) entweder vom Empfänger- oder Bunkerschiff verarbeitet werden muss, ohne es in die Umwelt freizusetzen. Nach Möglichkeit werden alle Tanktypen mit kaltem LNG (Siedetemperatur -163°C bei Umgebungsdruck) bebunkert, damit bei diesem Prozess möglichst wenig BOG entsteht. Generell verdampft LNG so lange, bis sich zu dem Betriebspunkt der entsprechende Siedezustand des LNGs eingestellt hat.

Schiffe, die mit einem Typ A oder Typ B Tank ausgerüstet sind, haben nur geringe Möglichkeiten das BOG einzuspeichern. Diese Tanktypen benötigen beim Bunkern eine Vorrichtung mit der das BOG zurück zum Bunkerschiff gegeben werden kann. Diese Leitung wird „Vapour Return“ Leitung genannt. Einen Typ C Tank mit Vapour Return zu bebunkern ist nur in Ausnahmen erforderlich, da bei diesem Tanksystem aufgrund des hohen Auslegungsdruckes ein Druckanstieg zulässig ist.

State of the art

Derzeitig fährt der Großteil der gasbetriebenen Schiffe in norwegischen Gewässern. Das benötigte Bunkervolumen dieser Schiffe, welches zwischen 30 m^3 sowie 100 m^3 pro Bunkervorgang beträgt, ist dabei als gering im Vergleich zu den zukünftigen Anwendungen anzusehen. Diese Mengen werden vorwiegend landseitig mittels LKW zur Verfügung gestellt. Die Transferraten bei einer solchen Bebunkerung betragen dabei weniger als $100\text{ m}^3/\text{h}$. Die Randbedingungen sind analog zu denen von Gas Terminals hinsichtlich Sicherheitsabstände, Zugang von Personen, etc anzusehen.

Eine Ausnahme stellt die Bit Viking, ein gasbetriebener Chemikalien-/Produktentanker, dar. Dieses Schiff bunkert an einen kleinen LNG Terminal in Resavika. Hierzu muss sich das Schiff extra an das LNG-Terminal verholen, welches im Allgemeinen aufgrund des zusätzlichen Zeitaufwandes für zukünftige Anwendungen nicht effizient ist. Darüber hinaus existieren an dem Terminal strikte Sicherheitsvorkehrungen, welche beispielsweise das Be- und Entladen des Schiffes zeitgleich mit dem Bunkern nicht ermöglichen. Bei diesem Schiff beträgt die Bunkerrate ca. $350\text{ m}^3/\text{h}$.

Als Ausgangspunkt für das Bungas Projekt wurde das gasbetriebene Kreuzfahrtschiff der Meyer Werft, welches im Rahmen des GasPax-Projektes entwickelt wurde, zugrunde gelegt. Das Schiff besitzt Typ C-Tanks mit einem LNG Tankvolumen von 2000 m^3 (ausreichend für einen 14-tägigen Reise). Die Hafentiegezeit für einen Kreuzfahrer liegt heute bei ca. 8 bis 10 Stunden und für den reinen Transfer des Bunkers steht durchschnittlich ein Zeitraum von 4h zur Verfügung. Dementsprechend ergeben sich für solche zukünftigen Anwendungen Transferraten von $500\text{ m}^3/\text{h}$ bei einem Förderdruck von bis zu 10 bar g.

Entwurf des Bunkerschiffes

Im Rahmen des BunGas-Projektes wurde neben dem Kreuzfahrtschiff auch das Bebunkern unterschiedlicher Empfängerschiffe mit den verschiedenen Tanksystemen berücksichtigt. Hierzu wurde eine offene Bunkerstation und für den Kreuzfahrer eine geschlossene Bunkerstation entwickelt. In Einklang mit den Anforderungen für das zu bebunkernde Schiff als auch unter Berücksichtigung der Gegebenheiten der Bunkerstationen ist das Design eines Bunkerschiffes entstanden.

Die LNG Kraftstofftanks befinden sich üblicherweise an Bord von Kreuzfahrern ca. in der Mitte des Schiffes, so dass auch die Bunkerstation in diesem Bereich des Schiffes angeordnet wurde um somit die Länge der Bunkerleitungen zu den LNG Tanks zu minimieren. Dementsprechend ergibt sich auch für die Anordnung der Bunkerstation an Bord des Bunkerschiffes eine mittige Position s. Abb. 1. Mittels dieser Anordnung kann ein sicheres Festmachen des Bunkerschiffes an dem zu bebunkernden Schiff gewährleistet werden.

In dem Entwurf der Meyer Werft sind für den Transfer zum Empfänger Schlauchleitungen vorgesehen.

An Bord von Containerschiffen oder beispielsweise von Massengutschiffen ergeben sich andere Anordnungen. Bei diesen Schiffen liegt die Bunkerstation bzw. die LNG-Tanks vorzugsweise im Bereich der Aufbauten, damit nach Möglichkeit kein Ladungsraum verloren geht bzw. um bei Ladungsoperationen keine ungewollte Interaktion mit dem LNG System hervorzurufen, s. Abb. 2.

In der Regel darf eine Bunkerbarge an einem anderen Schiff im Hafen nur in der Art festmachen, dass es nicht über das Heck bzw. den Bug hinausragt. Ansonsten ist kein sicheres Festmachen gewährleistet. Daraus resultiert, dass für diese Bunkeranwendungen eine mittige Anordnung der Bunkerstation nicht geeignet ist. Infolgedessen ist eine Bunkerstation im Bugbereich des Bunkerschiffes positioniert worden, um diesen Überstand zu vermeiden, s. Abb. 2.

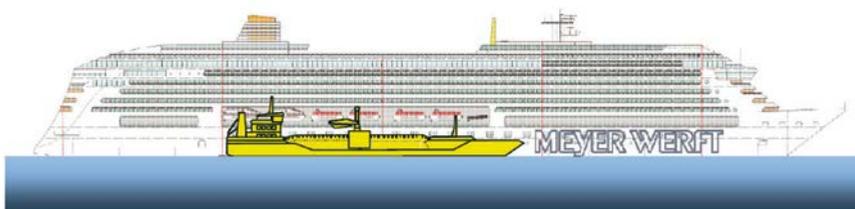


Abb. 1: Cruise Vessel und LNG Bunker Barge (MW)

Feeder ship and LNG-Barge

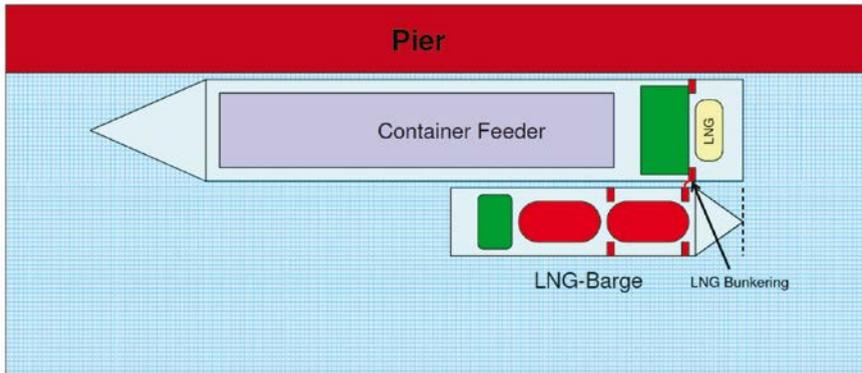


Abb. 2 Feeder Ship und LNG Bunker Barge ohne Überstand (MW)

Basierend auf den möglichen Positionen für die Bunkerstationen an Bord des Empfängerschiffes und den Forderungen für das sichere Festmachen des Bunkerschiffes wurden an Steuerbord und Backbord jeweils zwei Übergabestationen geplant. Im Bereich der Bunkerstationen sind Schlauchkräne vorgesehen, die jeweils an Steuerbord oder Backbord die Bunkerstation der Empfänger zur Schlauchübergabe bedienen können, s. Abb 3.

Antriebs-Konzept der LNG-Barge

Das Bunkerschiff wurde mit zwei Azimut Antrieben und zwei Bugstrahlern ausgerüstet. Durch diese Konfiguration wird eine hohe Manövrierfähigkeit im Hafen und eine Redundanz des Antriebes erreicht, s. Abb.4.

Die Motoren sind als Dual Fuel (DF) Motoren ausgeführt. Zum einen befindet sich der Kraftstoff als Ladung an Bord zum anderen kann durch die Nutzung des Boil off Gases für Antriebszwecke das Ansteigen des Tankdruckes vermieden werden. Bei ausreichender Nutzung des Boil off Gases kann



Abb. 3: Übergabestation und Schlauchkran auf der LNG-Barge



Abb. 4: LNG Bunkerbarge (MW)

somit verhindert werden, dass korrespondierend zum Tank-druck die Temperatur des LNGs ansteigt. Dementsprechend entsteht beim Bunkervorgang mit kaltem LNG auch nur eine geringe Menge BOG beim Empfängerschiff.

Dimensionierung des Bunkerschiffes

Unter Abschätzung der benötigten Bunkermengen ist eine Kapazität der Barge von 5000 m³ LNG aufgeteilt auf 2 LNG Tanks vorgesehen worden. Das Bunkerschiff soll mindestens zwei Schiffe in der Größenordnung eines Kreuzfahrers bebunkern können und erst anschließend zu einer landseitigen Versorgung (Terminal) zurückkehren. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass mindestens ein Füllstand von 5 % im Tank verbleiben muss, damit sich die Tanks nicht zu stark erwärmen. Diese Lösung mit zwei LNG Tanks erwies sich als effizienter als ein möglicher Betrieb mit 3 kleineren Tanks. Gemäß dem ausgearbeitetem Design für das Bunkerschiff ergaben sich folgende Daten:

Tankvolumen	2 x 2500 m ³
LNG Kapazität mit 95% Füllung	2 x 2375 m ³
Max. Bunkerrate	500 m ³
Max Abgabedruck der Deepwell Pumpe	10 bar g
Kranausleger	17 m
Schiffdaten:	
Länge	104 m
Breite	18,4 m
Tiefgang	5,0 m
Verdrängung	5800 GT
Antrieb	2 x 1100 KW
Bugstrahler	2 x 250 KW

Anlagenschema LNG Barge

Das Bunkerschiff ist für die Übernahme der Ladung bzw. des Treibstoffes an einem herkömmlichen LNG Terminal ausgestattet. Das Manifold für diese Übernahme ist im Rahmen des Projektes nicht weiter betrachtet worden.

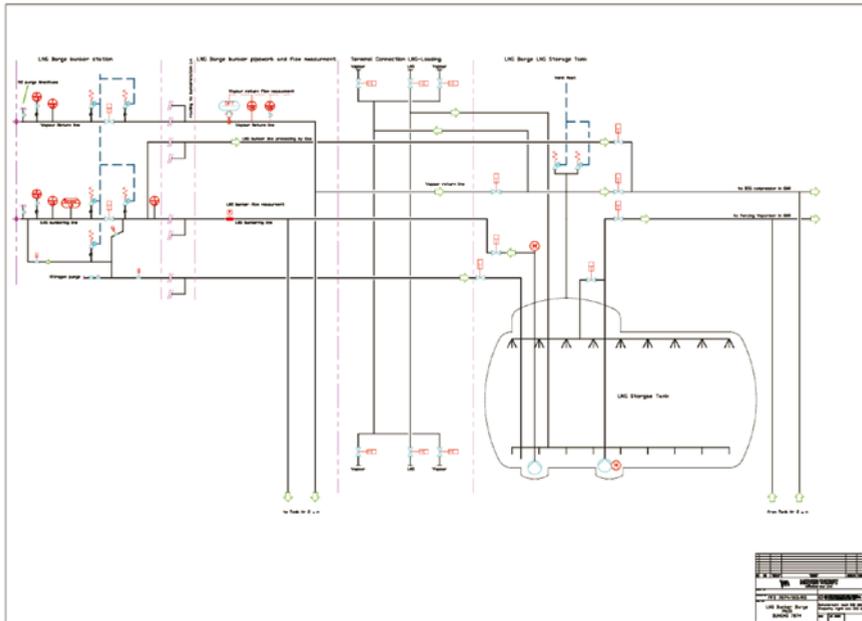


Abb. 5: LNG Bunkerbarge PFD Barge (MW)

Basierend auf den beschriebenen Anforderungen wurde das Design des Bunkerschiffes mit dem dazugehörigen Piping and Flow Diagramm erstellt, s. Abb. 5. In dieser Abb. ist zu erkennen, dass mittels einer Pumpe das LNG für den Transfer zum Empfängerschiff bereitgestellt werden kann. Mittels einer zweiten, kleineren Pumpe kann LNG für die Nutzung im Maschinenraum zur Verfügung gestellt werden. Die Motoren verarbeiten in erster Linie das BOG. Fahren die Motoren mit einer Leistung, welche mehr Gas erfordert, kommt die zweite Pumpe im Tank zum Tragen.

Das detaillierte Anlagenschema zur Übergabe von LNG ist in der folgenden Abbildung 6 dargestellt.

Die in Abb.6 dargestellte obere Leitung ist die sog. „Vapour Return“ VR Leitung, welche für die Abfuhr des überschüssigen Gases an Bord des Empfängerschiffes genutzt wird. Die untere Leitung wird für den Transfer des LNGs verwendet.

An Bord des Empfängerschiffes befindet sich für diese beiden Leitungen ein ANSI-Flansch als erster Anschlusspunkt. Passend zu dem Bunkerschiff ist an diesem ANSI Flansch eine Schnellkupplung Quick Connect Disconnect Coupling (QCDC) vorgesehen, s. Abb. 7. Diese Kupplung bietet den Vorteil, dass aufgrund eines Verriegelungsmechanismus eine feste Verbindung zwischen dem Bunkerschlauch und dem zu bebunkernden Schiff ohne das zeitaufwendige Anziehen von Flanschen hergestellt werden kann. Beim

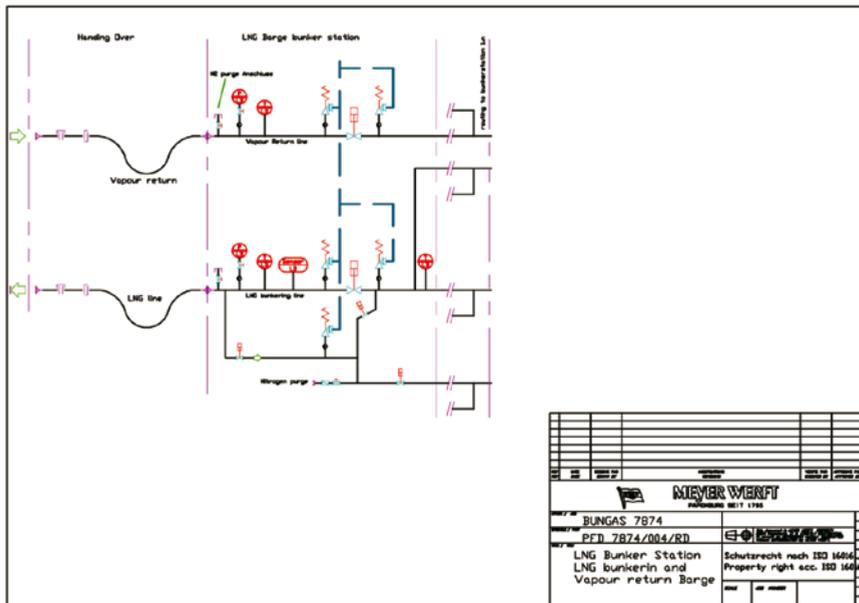


Abb. 6: LNG Bunkerbarge PFD Übergabe LNG (MW)

Bunkern von konventionellen Kraftstoffen werden üblicherweise Flanschverbindungen eingesetzt. Diese besitzen den Nachteil, dass es bei tiefkalten Temperaturen infolge von Schrumpfungen zu Leckagen kommen kann, wenn die Schrauben mit zu geringem Drehmoment angezogen sind.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes festgestellt, dass Situationen wie Feuer an Bord, Auseinanderdriften der Schiffe etc. während des Bunkerprozesses auftreten können, welches ein schnelles Trennen der Transferleitung bzw. auch ein Ablegen des Bunkerschiffes zur Folge haben. Für ein solches Szenario ist das Transfersystem mit einem ERS (Emergency release system) ausgestattet. Das ERS ist als Dry break coupling ausgeführt, so dass bei einer Nottrennung der Schiffe beide Seiten der getrennten Verbindungen geschlossen werden und somit die austretende Menge LNG bzw.

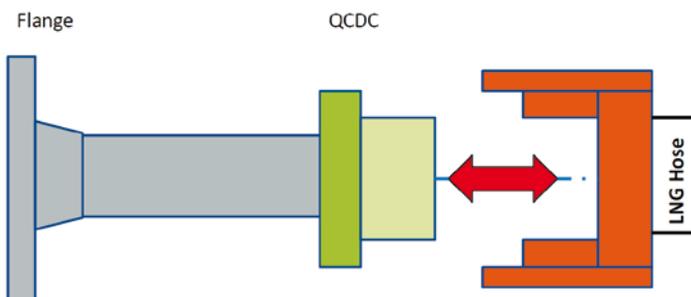


Abb. 7: Zwischenstück (Spool-Piece) mit Schnellkupplung QCDC (MW)

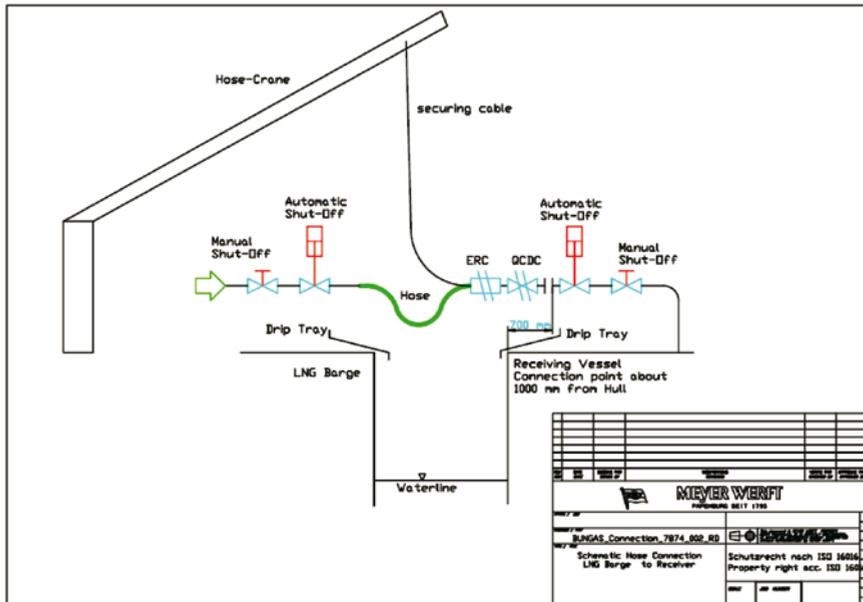


Abb. 8: Schema der Verbindung LNG Bunkerschiff zum Empfänger

Gas auf ein Minimum reduziert wird. Mittels einer solchen Einrichtung kann die Entstehung einer entzündbaren Gas-Wolke verhindert werden. Bei einer zu hohen mechanischen Beanspruchung löst das System ebenfalls selbständig aus und die sichere Trennung der Systeme wird vorgenommen. Das Zwischenstück verbleibt bei einer solchen Nottrennung zunächst am Empfänger. Vor dessen Demontage müssen die Leitungen gasfrei gemacht und mit Stickstoff gespült werden.

Führung der Bunkerschläuche

Beim Anlegen des Bunkerschiffes an den Empfänger ergibt sich aufgrund der vorgeschriebenen Fender ein Abstand von ca. 2 m. Infolge des Abstandes müssen die Schläuche durch den Schlauchkran beim Bunkervorgang geführt bzw. gehalten werden. Kryogene Bunkerschläuche dürfen im Allgemeinen nicht geknickt werden bzw. es dürfen definierte Biegeradien nicht überschreiten, wodurch zusätzlich zu dem Kran ein Knickschutz im Relingsbereich der beteiligten Schiffe notwendig ist.

Bei einer Nottrennung verbleiben die ERC Kupplungen an dem Kranseil bzw. an einem Auffangseil, welches mit dem Kran des Bunkerschiffes verbunden ist. Darüber hinaus soll das Eintauchen der ERC bzw. des Bunkerschlauches in das Wasser verhindert werden, damit das verbleibende LNG in dem Transferschlauch nicht schlagartig durch die Wärme des Wassers verdampft. Eine Prinzipskizze mit den erarbeiteten Sicherheitseinrichtungen ist in der folgenden Abb. 8 dargestellt.

Vent Mast Bunkerschiff

Im Rahmen der sicherheitstechnischen Untersuchung stand unter anderem der Vent Mast im Fokus, da an diesem Ort potentielle Gasmengen im Notfall freigesetzt werden können. Der Vent Mast ist auf dem Vordeck angeordnet und besitzt eine Höhe von 10 m, welches sich aus den Anforderungen für Gastanker ergibt. Die Anordnung des Vent Mastes auf dem Vorschiff ergab sich aus den Betrachtungen des Bunkervorganges eines Containerschiffes. Durch diese Anordnung wird erreicht, dass sich der Abblasemat bei diesem Bunkerszenario am weitesten vom Ladungsbereich entfernt befindet. Bei einem Kreuzfahrer läßt sich aufgrund der mittigen Anordnung der Bunkerstation bei einer anderen Anordnung des Abblasemastes kein größerer Abstand erzielen.

Über den Vent Mast werden folgende Leitungen abgeführt:

- Alle Abblaseleitungen der Sicherheitsventile
- Die Abluft aus den belüfteten Bereichen der Gasanlage

Entwurf der Bunkerstation auf dem Empfänger

Im Rahmen des BunGas-Projektes ist für das Empfängerschiff eine offene als auch geschlossene Bunkerstation entwickelt worden. In einem ersten Schritt ist für das System zur LNG Übernahme ein Piping and Flow Diagramm erstellt worden. Darauf aufbauend ist zu einem späteren Zeitpunkt das Piping and Instrumentation Diagram der Bunkerstation entstanden, welches in der folgen Abbildung 10 dargestellt ist.

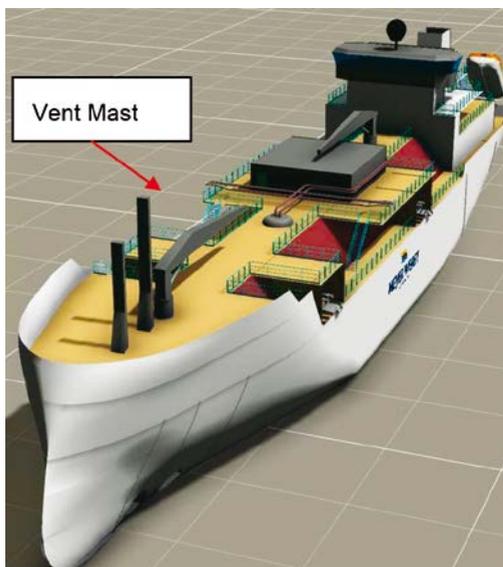


Abb. 9 Positionen von Signalmast vorne und Vent Mast auf dem Vorschiff

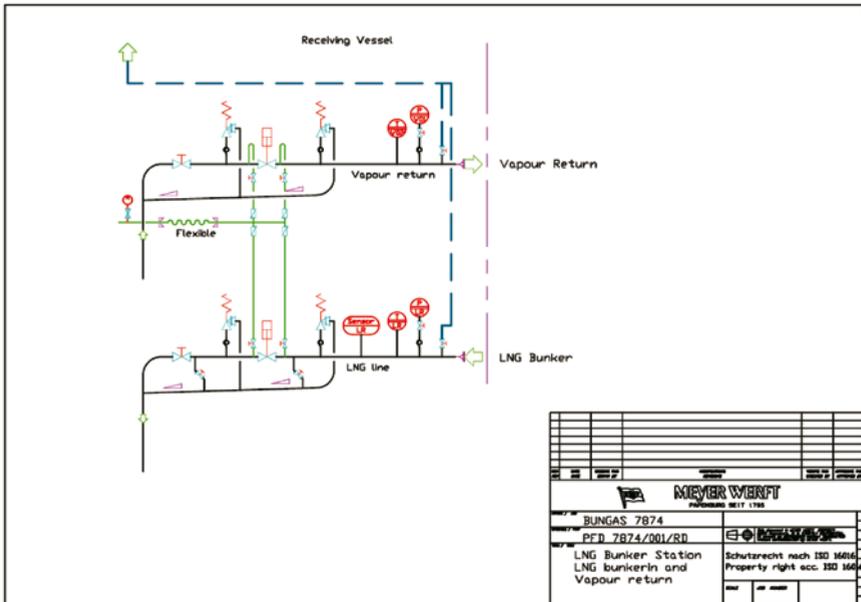


Abb. 10: P&ID der Bunkerstation auf dem Empfänger

Für die Anordnung der Flansche in der Bunkerstation wurde die Empfehlung der SIGTTO, welche für Gastanker erstellt wurde, berücksichtigt. Somit wurden die empfohlenen Abstände zur Außenhaut eingehalten und freie Bereiche zur Montage und Bewegung des Bedienpersonals umgesetzt. Unterhalb der Flansche für die Bunkerschlauchleitungen und der Ventile sind in der Bunkerstation Drip trays vorgesehen, die eventuelle Leckagen nach Außenbord ableiten. Diese Drip trays sind für die tiefen Temperaturen von LNG ausgelegt, so dass diese eine Versprödung der schiffbaulichen Strukturen im Leckgefall verhindern.

An Bord des Kreuzfahrers befindet sich die geschlossene LNG Bunkerstation neben der konventionellen, welches in der folgenden Abbildung 11 dargestellt ist. Die Trennung dieser beiden Räume ist mittels einer gasdichten Tür gegeben.

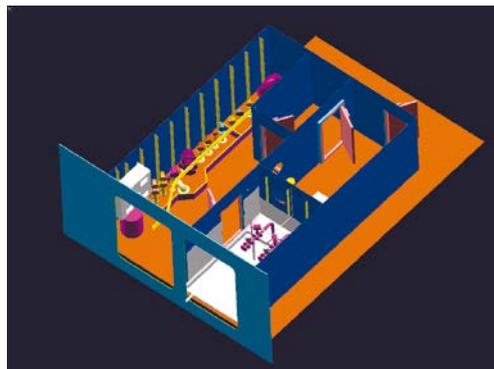


Abb. 11 Ansicht der Kombi-Station (MW)

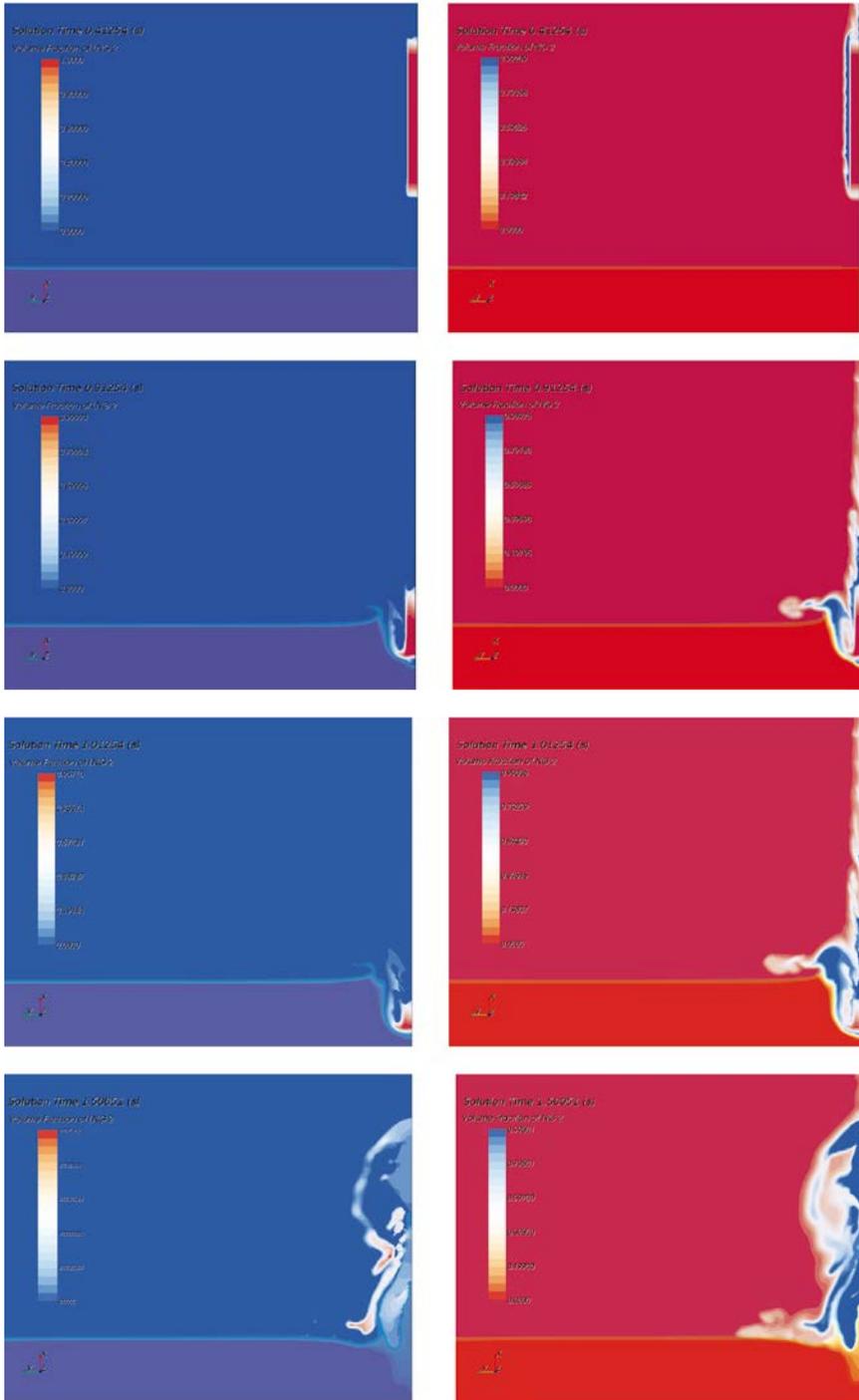


Abb. 12 LNG /NG –Konzentration bei ungewollter Freisetzung von LNG

Innerhalb der LNG Bunkerstation sind die Rohrleitungen mit einfacher Wand ausgeführt. Das Drip tray bzw. auch der 30-fache Luftwechsel fungieren als zweite Barriere, welche gemäß der Interim-Richtlinie für ein gasbetriebenes Schiff gefordert wird. Alle Armaturen in der Bunkerleitung sowie in der Vapour Return Leitung sind geschweißt. Die einzige Flanschverbindung in der Bunkerstation stellt der „Presentation Flange“ dar.

Sicherheitstechnische Untersuchung

Im Rahmen des Projektes wurde für das Bunkerschiff, die Bunkerstationen sowie für das Transfersystem eine sicherheitstechnische Untersuchung durchgeführt. Zunächst wurden mittels einer Gefahrenidentifikation (Hazid) potentielle Fehlerfälle der einzelnen Komponenten untersucht. Die Hazid bildet die Basis für die weiteren sicherheitstechnischen Untersuchungen.

Im Rahmen der Hazid standen mögliche LNG Leckagen bzw. mögliche Gasaustritte der einzelnen Komponenten des Transfersystems im Fokus, wobei nur einzelne Fehlerfälle und keine Fehlerverkettungen untersucht wurden. Insgesamt hat die Analyse gezeigt, dass das Brechen des Bunkerschlauches vermutlich die schwerwiegendsten Konsequenzen zur Folge hat. Das austretende LNG in einem solchen Fehlerszenario und die vermutlich schlagartige Verdampfung, wenn das LNG auf die Stahlstruktur bzw. auf die Wasseroberfläche trifft, hätte die Ausbildung einer entzündbaren Gaswolke zur Folge. Darüber hinaus können auch weitere Undichtigkeiten beim Bunkervorgang bzw. ungewollte Freisetzung von LNG/Gas zu einer entzündbaren Gaswolke führen. Bei dieser Analyse wurden externe Einflüsse wie beispielsweise Gewitter, Kollision, etc. diskutiert.

Teilweise war für die Ermittlung der Konsequenzen einiger potentieller Fehlerfälle die Durchführung weiterführender Analysen notwendig. Für das Brechen der Bunkerleitung sowie der Vapour return Leitung wurden vereinfachte CFD-Rechnungen durchgeführt, um die Auswirkungen auf die beteiligten Schiffe besser beurteilen zu können. Beispielhaft befinden sich in der folgenden Darstellung Abb. 12 die LNG bzw. NG Konzentrationen eines Eintauchvorganges von einer LNG Säule in Wasser. Für vier verschiedene Zeitpunkte sind die Konzentrationen dargestellt. Die blau hinterlegten Darstellungen auf der linken Seite in der Abb.12 zeigen die LNG Konzentration auf (rot entspricht 100%). Die rot hinterlegten Darstellungen zeigen die Gas-Konzentration auf, wobei blau 100 % entspricht. Die Fallhöhe beträgt dabei ungefähr die Höhe einer Transferleitung beim Bunkern. Die LNG Säule entspricht der Austrittsmenge von LNG gemäß den Schließzeiten der Absperrventile zuzüglich des Inhaltes des Bunkerschlauches, wenn es zum Versagen dieses Bauteils kommt. Die Rechnungen wurden unter Ausnutzung der Symmetrie durchgeführt, weswegen in der folgenden Darstellung nur ein Ausschnitt des Berechnungsraumes zu sehen ist.

Die derzeitigen erzielten Ergebnisse geben die physikalischen Phänomene korrekt wieder. Zur Validierung der Ergebnisse werden noch verschiedene Variationen von den zur Verfügung stehenden Modellen gerechnet und mit Literaturwerten verglichen, um eine möglichst exakte Abbildung der Realität zu erzielen.

Zusammenfassung/Ausblick

Bis zum Projektende werden die Ziele des Vorhabens vollständig erreicht sein. Anhand der Entwicklung eines LNG-Bunkerschiffes wurden Erkenntnisse erarbeitet, welche zum einen die praktische Umsetzung eines sicheren LNG Bunkervorganges aufzeigen zum anderen konnte Erkenntnisse/Zwischenergebnisse in entsprechenden Gremien vorgestellt werden. Diese kamen beispielsweise bei der Erarbeitung der ISO Guideline zum Tragen.

Darüber hinaus ist gewährleistet, dass die sicherheitstechnischen Untersuchungen bis Ende des Jahres abgeschlossen sind und das potentielle Risiko dieses Transferprozesses aufzeigen. Hafenstädte können diese Ergebnisse zur Beurteilung von Bunkerprozeduren verwenden. Darüber hinaus können Systemlieferanten durch einen Vergleich mit den erzielten Ergebnissen eine Zulassung von weiteren Entwicklungen in diesem Segment beantragen bzw. herbeiführen. Somit ist im Rahmen des Projektes eine Grundlage geschaffen worden, auf der aufbauend das Bunkern von LNG in den einzelnen Hafenstädten etabliert werden kann.

Plasma-katalytische Abgasbehandlung für Schiffsdieselmotoren PBCT

M. Schmidt, R. Basner, R. Brandenburg (Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie), R. Summerer (neoplas GmbH), M. Bludszuweit (MET GmbH), T. Borkowski (Maritime Universität)

Kurzfassung

Ziel des Vorhabens war, ein auf nicht-thermischen Plasmen und Katalysatoren basierendes System zur Nachbehandlung maritimer dieselmotorischer Abgase zu entwickeln und an einem Schiffsdieselmotor zu applizieren. Hierfür war es notwendig, interdisziplinär die Bereiche Plasmatechnologie (Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie, Greifswald), Katalysatorforschung (Leibniz-Institut für Katalyse, Rostock), Hochspannungselektrotechnik (Technische Universität Szczecin), Strömungssimulation und Modellierung chemischer Reaktionskinetik (MET GmbH, Rostock) sowie Motorentechnologie (Maritime Universität Szczecin) zu vereinen. Entwickelt, gefertigt und an einem Prüfstandsmotor untersucht wurde ein zweistufiges System, dessen Herzstück die Kombination aus nicht-thermischem Plasma und Edelmetall-freiem Katalysator ist. Das Vorhaben wurde unter dem Förderkennzeichen **03SX288A** vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert und vom Projektträger Jülich betreut.

Einleitung

Motivation und gesetzliche Rahmenbedingungen

1973 wurde durch die International Maritime Organization (IMO) die International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships (MARPOL) verabschiedet^[1]. In dieser sind die allgemeinen Rahmenbedingungen zur Vermeidung von Gesundheits- und Umweltschäden durch Schiffsverkehr in internationalen Gewässern festgehalten. Die Emissionen der jeweiligen Betriebsstoffe (z.B. Öle und Lacke) sind in den Anlagen I-VI spezifiziert. Anlage VI regelt die relevanten gasförmigen Emissionen aus den Verbrennungskraftmaschinen (Hauptantrieb, Generatoren). Dies sind schwefelhaltige und flüchtige organische Verbindungen sowie Stickoxide. Die Obergrenzen für die nach MARPOL Annex VI zugelassenen NO_x -Emissionen ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) sind in Abbildung 1 gezeigt. Es sind die jeweiligen maximalen NO_x -Emissionen in Abhängigkeit von der Drehzahl der Motoren für die nach dem angegebenen Stichtag produzierten Maschinen dargestellt. Für nach dem 1. Januar 2016 hergestellte Schiffsdieselmotoren gilt es demnach, die Stickoxidemissionen gegenüber den erlaubten Grenzwerten von vor dem Jahr

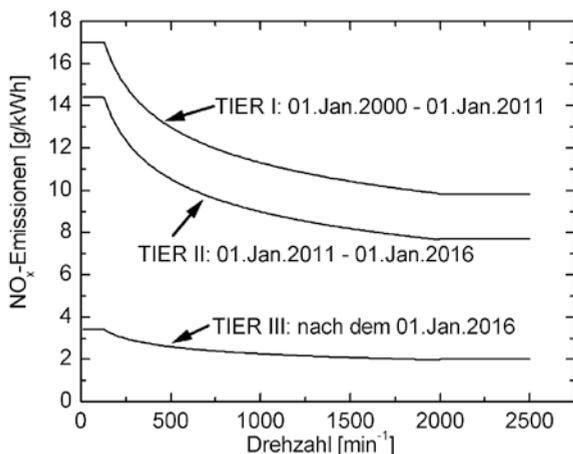


Abbildung 1: Nach MARPOL Annex VI geforderte maximale NO_x-Emissionen aus Schiffsdieselmotoren mit den Baujahren der betroffenen Motoren

2000 um 80 % zu senken. Die diskutierten Grenzwerte gelten in den ebenfalls durch die IMO definierten Emissionsschutzgebieten (emission controlled area, ECA). Hierzu gehören unter anderem die Nord- und die Ostsee, das Mittelmeer und die nordamerikanischen Küstengewässer.

Die Einhaltung der Grenzwerte wird derzeit durch die Optimierung der Verbrennungsprozesse und den Einsatz emissionsreduzierender Kraftstoffe (z.B. schwefelarmer Diesel statt Bunkeröl) gewährleistet. Bei der Nachbehandlung von Schiffsdieselaabgasen kommen Schwefelwäsche und selektive katalytische Reduktion (selective catalytic reduction, SCR) zum Einsatz. Letztere, aus der Automobilbranche bekannte, Technologie verwendet Harnstoff als Reaktionsmittel, welcher in entsprechender Menge auf dem Schiff bereitgestellt werden muss.

Alternativ zu diesen Technologien wird seit einiger Zeit die Möglichkeit der Reduzierung der Stickoxidemissionen mit Hilfe von Plasmatechnologie untersucht^[2, 3, 4]. Hierbei soll das Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoffdioxid (NO₂) oxidiert werden, welches dann katalytisch zu Stickstoff und Sauerstoff reduziert wird. Versuche, die Stickoxide mittels nicht-thermischen Plasmas direkt zu Stickstoff und Sauerstoff zu wandeln, haben sich als wirtschaftlich nicht machbar erwiesen, da aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes in Dieselaabgasen oxidative Prozesse vorrangig ablaufen^[5].

Nicht-thermisches Plasma bei Atmosphärendruck

Die allgemein bekannten Aggregatzustände der Materie sind fest, flüssig und gasförmig. Zuführen von Energie führt über das Schmelzen von fest zu flüssig und über das Verdampfen von flüssig zu gasförmig. Weiteres Zuführen von Energie führt zur Ionisation eines Gases und es wird der Aggregatzustand „Plasma“ erreicht. Dies ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

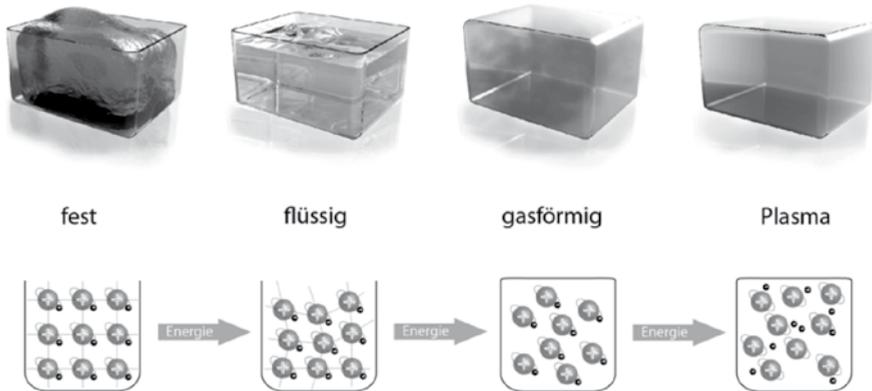


Abbildung 2: Die Zufuhr von Energie führt zur Änderung des Aggregatzustandes von Materie

Als Plasma wird ein elektrisch leitfähiges gasförmiges Gemisch bezeichnet, das aus den elektrisch neutralen Atomen und Molekülen, elektrisch negativen Elektronen und elektrisch positiv oder negativ geladenen Ionen besteht. Plasmen sind vielfältig und unterscheiden sich durch die Art der Erzeugung, den Gasdruck, die Temperatur der Komponenten und den Ionisationsgrad. Ein nicht-thermisches Atmosphärendruckplasma ist ein unter Normaldruck erzeugtes Plasma, bei dem die Temperatur der leichten Elektronen sehr viel größer ist als die Temperatur der schweren Atome, Moleküle und Ionen und die Dichte der elektrisch geladenen Komponenten nur ein Bruchteil der Dichte der neutralen Komponenten ausmacht.

Wird ein nicht-thermisches Atmosphärendruckplasma im Abgas eines Dieselmotors betrieben, entstehen unter anderem atomarer Sauerstoff, Ozon und Hydroxylradikale. Diese führen durch ihre oxidative Wirkung zu einer Stoffwandlung von NO zu NO₂. Die Zumischung geeigneter Kohlenwasserstoffe unterstützt diese Wirkung, da weitere Reaktionskanäle eröffnet werden [6]. Zusätzlich zur gewünschten Stoffwandlung NO → NO₂ finden weitere Reaktionen statt, deren Produkte unter anderem Salpetersäure (HNO₃), Formaldehyd (CH₂O) oder Lachgas (N₂O) sind. Die Produktion dieser Komponenten ist durch geeignete Wahl der Betriebsparameter so weit wie möglich zu verhindern. Der vollständige Reaktionsmechanismus ist komplex, weshalb in Abbildung 3 die Hauptreaktionspfade schematisch dargestellt sind.

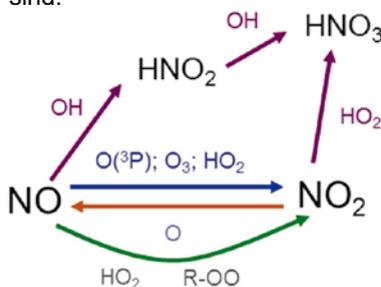


Abbildung 3: Schematische Darstellung der durch ein Plasma induzierten plasma-chemische Vorgänge im dieselmotorischen Abgas

Applikation eines plasma-basierten Abgasnachbehandlungssystems

Ein Abgasnachbehandlungssystem muss seine Aufgaben erfüllen, ohne den Betrieb des Motors negativ zu beeinflussen. Der hier ausschlaggebende Parameter ist der Gegendruck, der durch das zu installierende System im Abgasstrang des Motors erzeugt wird. Eine plasma-basierte Lösung benötigt darüber hinaus eine elektrische Versorgung, welche die notwendige Hochspannung mit der erforderlichen Leistung bereitstellt. Um ein robustes und wirtschaftliches System zu entwickeln, ist eine an der Aufgabenstellung orientierte Plasmaquellengeometrie und Form der Anregungsspannung erforderlich, da die Plasmaquellengeometrie den vom Abgasnachbehandlungssystem erzeugten Abgasgegendruck bestimmt und Änderungen der Geometrie Anpassungen in der elektrischen Versorgung bedingen. Die plasma-basierte Behandlung maritimer dieselmotorischer Abgase stellt an das Design der Plasmaquelle spezifische Anforderungen, da die Verbrennungsabgase Temperaturen von bis zu 400 °C erreichen können, erhebliche Mengen an Feuchtigkeit (bis 15 %), Feststoffen (Feinstaub und Ruß) sowie reaktiven Spezies (NO, NO₂) enthalten. Die benötigten Dielektrika sind also nicht nur bezüglich ihrer dielektrischen Eigenschaften auszuwählen sondern auch bezüglich ihrer thermischen und chemischen Beständigkeit. Das Material für die Elektroden, die elektrischen Anschlüsse und die mechanischen Bauteile, die die Positionierung des gesamten Systems im Abgasstrang realisieren, sind ebenfalls dahingehend auszuwählen, dass sie den besonderen Anforderungen eines Betriebes im Abgas eines Dieselmotors standhalten. Darüber hinaus sind mechanische Stabilität bei Vibration und Torsion für alle benötigten Materialien relevante Auswahlkriterien.

Der durch die vorstehend beschriebenen Bedingungen definierte komplexe Parameterraum für die Auswahl der Plasmaquellengeometrie, Materialien und elektrischen Parameter wird durch die Implementierung eines Katalysators weiter aufgespannt, da für dessen Wahl die Bedingungen, gestellt durch die Anwendung im dieselmotorischen Abgas, ebenfalls gelten. Das Katalysator- und Trägermaterial muss thermisch und chemisch stabil sein und darf die Plasmaeigenschaften nicht negativ beeinflussen. Der Einsatz Edelmetall-basierter Katalysatormaterialien soll vermieden werden, da diese aufgrund ihrer Preise die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems negativ beeinflussen und die Verfügbarkeit dieser Materialien in den erforderlichen Mengen nicht gewährleistet ist^[7]. Das Trägermaterial für den Katalysator ist ebenfalls Einschränkungen unterworfen, da es in reaktiven Gasgemischen stabil sein, den hohen Temperaturen widerstehen und eine gute Anhaftung auf den zu beschichtenden Elektroden und Dielektrika gewährleisten muss.

Neben den physikalischen und chemischen Herausforderungen an die Entwicklung eines Nachbehandlungssystems für dieselmotorische Abgase stellt

die Applikation an einem realen Schiffsmotor besonders an die Plasmaforschung und die Hochspannungstechnik hohe Anforderungen, da Erfahrungen mit Plasmaquellen, die Gasdurchsätze von mehreren hundert Kubikmetern pro Stunde erlauben, kaum vorliegen.

Laboruntersuchungen und Modellierungen

In Abbildung 4 ist die gewählte Entladungskonfiguration der Plasmaquelle schematisch dargestellt. Die Elektroden sind aus Edelmetallgitter gefertigt und an die Spannungsversorgung angeschlossen. Zwischen den Elektroden befinden sich die keramischen Dielektrika. Für den elektrischen Betrieb wurde eine sinusförmige Hochspannung gewählt. Übersteigt die Amplitude der Hochspannung die Zündspannung der Elektrodenkonfiguration werden zwischen den Elektroden und den Dielektrika Mikroentladungen generiert. In diesen wird den Elektronen so viel Energie zugeführt, dass sie durch Stöße die Gasmoleküle anregen oder dissoziieren können und so ein Plasma entsteht, ein Gemisch aus Elektronen, Ionen und elektrisch neutralen Gasmolekülen.

Für die untersuchten Plasmaquellen wurden die Größe und die Anzahl der Elektroden und Dielektrika variiert. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Daten zusammengefasst. In verschiedenen Entwicklungsstadien wurden sowohl Elektroden als auch Dielektrika mit Katalysatormaterial beschichtet.

	Laborplasmaquelle für Gasflüsse bis 0,2 m ³ /h	aufskalierte Laborplasmaquelle für Gasflüsse bis 1 m ³ /h	nochmals aufskalierte Plasmaquelle im Bypass der Abgasanlage des Schiffsmotor
Anzahl der Elektroden	2	5	405
Anzahl der Dielektrika	3	6	414
Größe der Elektroden	13,5 cm x 4,5 cm	13,5 cm x 4,5 cm	14 cm x 14,5 cm
Größe der Dielektrika	18 cm x 7 cm	18 cm x 7 cm	17 cm x 17 cm
Bezeichnung	PQ-INP	PQ-LTT	PQ-MUS

Tabelle 1: Übersicht über Anzahl und Dimensionen der Elektroden und Dielektrika

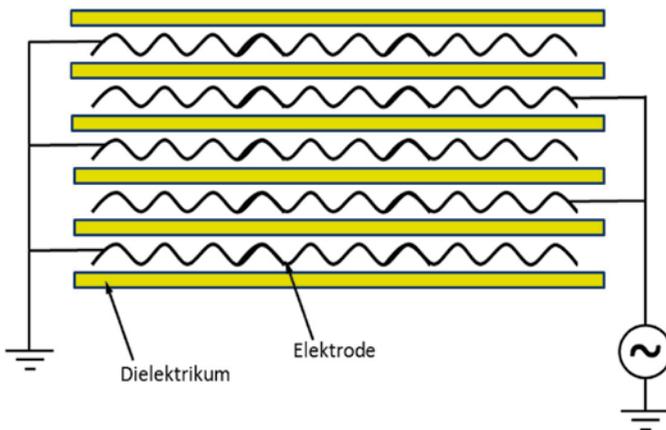


Abbildung 4:
Schematische
Darstellung der
Entladungs-
konfiguration

Zusätzlich zur Katalysator-unterstützten Plasmastufe, die die Stoffwandlung von NO zu NO_2 bewirken soll, wird im plasma-katalytischen Abgasnachbehandlungssystem eine reine Katalysatorstufe installiert, die die Stoffwandlung von NO_2 zu N_2 und O_2 bewirkt. Dazu werden handelsübliche Cordierit-Monolithe Katalysator-beschichtet und hinter der Plasmastufe verbaut. Durch das Additiv Propen werden in der Plasmastufe die NO -zu- NO_2 -Wandlung und in der Katalysatorstufe der NO_2 -Abbau unterstützt.

Für die Entwicklung des Katalysators wurden nach ausführlicher Literaturrecherche verschiedene Materialien im Labor auf ihre Eignung hin in einem künstlichen Dieselabgas untersucht. Hierbei waren insbesondere die Stickoxidwandlung und die Light-Off-Temperatur, bei der die katalytische Wirkung einsetzt, von Interesse. Bei diesen Experimenten zeigte sich, dass Kupferbasierte Katalysatoren am vielversprechendsten sind. Mit diesen wurden in unterschiedlichen Konfigurationen weitere Tests durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 5 dargestellt sind. Auf Basis dieser Messergebnisse konnte der Katalysator mit 16 % Kupferanteil auf Basis eines Y-Zeolithen ausgewählt werden, da bei diesem die Stoffwandlung am effektivsten und die Light-Off-Temperatur am niedrigsten war. Um das Katalysatorgemisch in großer Menge und Stückzahl auf die Elektroden und Dielektrika aufbringen zu können, musste ein entsprechendes Verfahren entwickelt werden, da die bislang in der Forschung angewendeten Verfahren für die Produktion kleiner Mengen und Stückzahlen optimiert sind. Hierbei stellte sich heraus, dass eine dreifache Beschichtung mit zwischenzeitlicher Trocknung und anschließender Kalzinierung die gewünschten Ergebnisse liefert.

Für die Entwicklung einer Hochspannungsversorgung war es nötig, frühzeitig eine Festlegung auf die Geometrie der Plasmaquelle PQ-MUS, die im Bypass des Abgasstranges des Prüfstandsmotors an der Maritimen Universität Szczecin betrieben werden soll, zu treffen. Aufgrund der im Laufe der Projektarbeit gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen konnte eine 3x3-Matrix

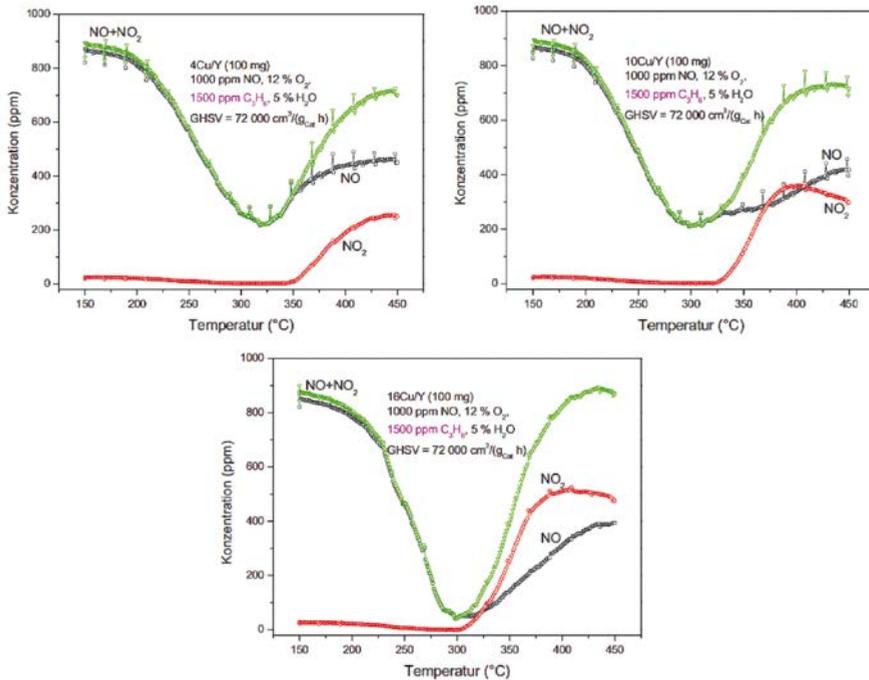


Abbildung 5: Stoffwandlung für unterschiedliche Kupfer-Zeolith-Mischungen: oben links 4% Cu/Y-Zeolith, oben rechts 10% Cu/Y-Zeolith, unten 16% Cu/Y-Zeolith

aus 9 einzelnen Plasmaquellen (Stapel) als geeignet identifiziert werden. Jeweils 3 Stapel wurden zu einem Modul zusammengefasst, welches von einer Spannungsquelle betrieben wird. Dies reduzierte die Baukosten für die Spannungsquelle gegenüber einer Lösung mit einer einzigen Spannungsquelle für alle 9 Stapel erheblich und lieferte darüber hinaus zusätzliche Betriebssicherheit, da der Ausfall eines Moduls (z.B. durch Kurzschluss) oder Spannungsquelle (z.B. durch thermische Überlastung) nicht zum Ausfall der gesamten Anlage führt.

Es wurde bereits diskutiert, dass die Geometrie der Plasmaquelle für die Applikation in einem realen Abgassystem eines Schiffsdieselmotors entscheidende Bedeutung hat, da zu hoher Gegendruck die Leistungsfähigkeit des Motors bis hin zum Stillstand beeinträchtigt. Für die Stoffwandlung ist die Geometrie ebenfalls von Bedeutung, da eine homogene Verteilung des Additivs Propen, welches im Abgasstrang vor dem plasma-katalytischen Abgasnachbehandlungssystem eingedüst wird, erforderlich ist. Diese Verteilung ist messtechnisch nicht zugänglich, weswegen sie vom Projektpartner MET GmbH mit Hilfe eines CFD-Modells ermittelt wurde. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte ein Lochblech entwickelt werden, das im Gaseinlassbereich der PQ-MUS die homogene Verteilung des Additivs sicherstellt. Ein Ergebnis dieser Modellierungen zeigt Abbildung 6. Über die ganze Plasmaquelle hinweg

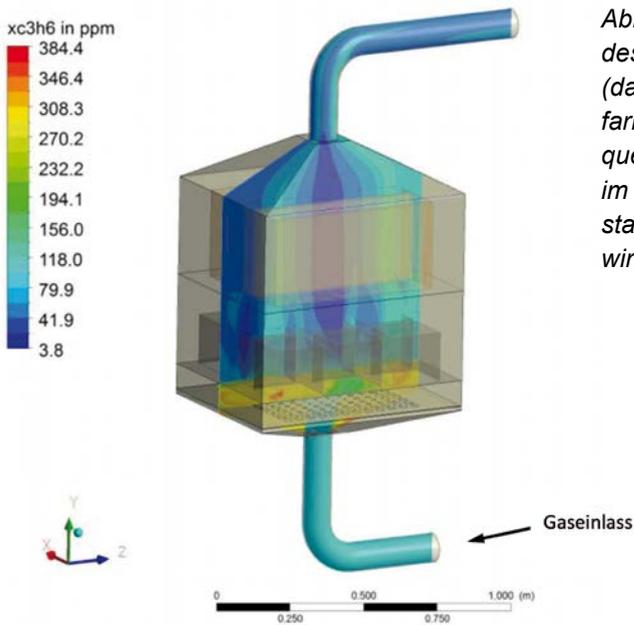


Abbildung 6: Verteilung des Additivs Propen (dargestellt in Falschfarben) in der Plasmaquelle PQ-MUS, die im Bypass des Prüfstandsmotors installiert wird

verteilt sich das Propen gleichmäßig und steht somit überall zur Unterstützung der Stoffwandlung zur Verfügung.

Ein weiteres Teilziel des Vorhabens war die Entwicklung eines reaktionskinetischen Modelles, das die plasmachemischen Prozesse in den Plasmaquellen abbildet. Hierzu wurde ein reaktionskinetisches Modell erstellt (Gleichungen [1] – [7]) und auf die zu untersuchenden Gasgemische mit guter Übereinstimmung zu den experimentell ermittelten Konzentrationen abgebildet.

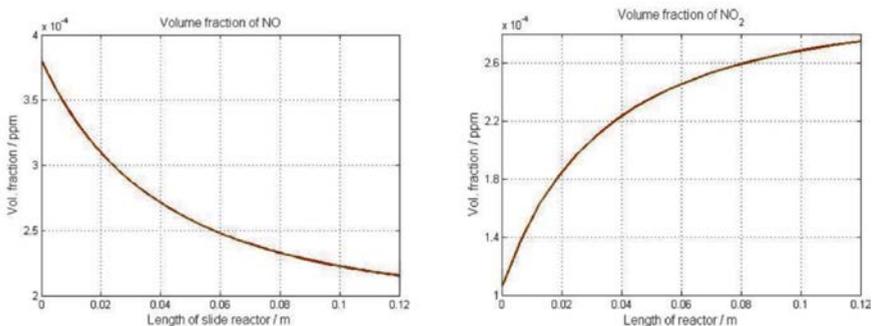
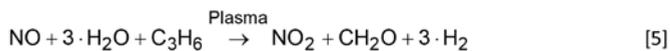
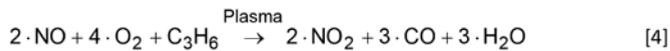


Abbildung 7: Konzentrationsverläufe der Spezies NO (links) und NO₂ (rechts) innerhalb der Plasmaquelle PQ-LTT entlang der Gasströmungsrichtung (10%-Last-Gasgemisch, T = 158°C)



Durch diese Modellierung konnten Erkenntnisse zur Reaktionskinetik innerhalb der Plasmaquellen gewonnen werden. In Abbildung 7 sind die Verläufe der Konzentrationen von NO (links) und NO₂ (rechts) innerhalb der Plasmaquelle PQ-LTT entlang der Gasströmungsrichtung dargestellt. Gezeigt ist der stöchiometrische Umsatz von NO zu NO₂ entsprechend den Reaktionsgleichungen. Am Gaseinlass ist die Reaktionsgeschwindigkeit am höchsten, da hier die Konzentrationen der Reaktanten am höchsten sind. Während des Gasdurchtrittes durch die Plasmaquelle nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit kontinuierlich ab.

Im Fokus der anfänglichen Forschungsarbeiten stand die Untersuchung der Plasmawirkung auf dieselmotorische Abgase. Diese wurden dafür nach Vorgaben des Projektpartners Maritime Universität Szczecin im Labor mit Hilfe von kommerziellen Gasmischungen und einer Gasbefeuchtungseinrichtung nachgebildet. In Tabelle 2 sind die Konzentrationen der wichtigsten Komponenten der Abgase des Prüfstandsmotors zusammengefasst.

	10% Last	50% Last	100% Last
NO (ppm)	348	786	953
NO ₂ (ppm)	102	106	141
CO (ppm)	195	191	176
CO ₂ (%)	3,9	5,1	6,3
H ₂ O (%)	3,7	4,2	6,1
O ₂ (%)	15	15	15

Tabelle 2: Konzentrationen der wichtigsten Komponenten der Abgase des Prüfstandsmotors

Um den realen Bedingungen im Abgasstrang eines Schiffsdieselmotors möglichst nahe zu kommen, wurden die Plasmaquellen und Rohrleitungen beheizt. Aus den Angaben zu den Gasflüssen am Prüfstandsmotor wurden die notwendigen Strömungsquerschnitte der Plasmaquellen mit Hinblick auf möglichst geringen Gegendruck ermittelt. Mit den so nach den verfügbaren Basisdaten optimierten Laborsystemen wurden erste Versuche zur Stoffwandlung durchgeführt. Ein ausgewähltes Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier sind die gemessenen Konzentrationen von NO und NO₂ über die spezifische Energiedichte (SED) aufgetragen, die nach Gleichung [8] berechnet wird.

$$\text{SED} \left[\frac{\text{J}}{\text{L}} \right] = \frac{\text{in das Plasma dissipierte Leistung [W]} \cdot 3600 \text{s}}{\text{Gasfluss durch die Plasmaquelle} \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]} \quad [8]$$

Es zeigt sich, dass ohne Zugabe des Reaktionsmittels Propen nur eine geringe Wandlung von NO zu NO₂ stattfindet (schwarze Symbole). Mit Zugabe von Propen (rote Symbole) nimmt die Wandlung deutlich zu und schon bei Energiedichten von weniger als 30 J/L wird die maximale Wandlung erreicht. Diese Experimente wurden ebenfalls mit den Gasgemischen für 50 % und 100% Motorlast bei den entsprechenden Temperaturen durchgeführt.

Bei diesen Experimenten wurde neben der Stickoxid-Stoffwandlung auch die Bildung von Nebenprodukten durch direkten Vergleich der Infrarotspektren analysiert. In Abbildung 9 ist ein Ausschnitt der Infrarotspektren, gemessen ohne Plasma (schwarze Linie) und mit Plasma (SED = 72 J/L, 10 %-Last-Gasgemisch, T = 160 °C, rote Linie), gezeigt. Deutlich erkennbar ist die Zunahme der Absorption in der Einstellung „mit Plasma“, die in diesem Fall eine Produktion von Kohlenmonoxid anzeigt. Diese Untersuchungen wurden für alle bemessenen Gasgemische im gesamten Wellenzahlbereich (700 cm⁻¹ – 4500 cm⁻¹) durchgeführt, um alle gebildeten Nebenprodukte identifizieren zu können (N₂O bis 30 ppm, CH₂O unter 150 ppm, C₂H₄ und C₂H₆ unter der Nachweisgrenze^[8]).

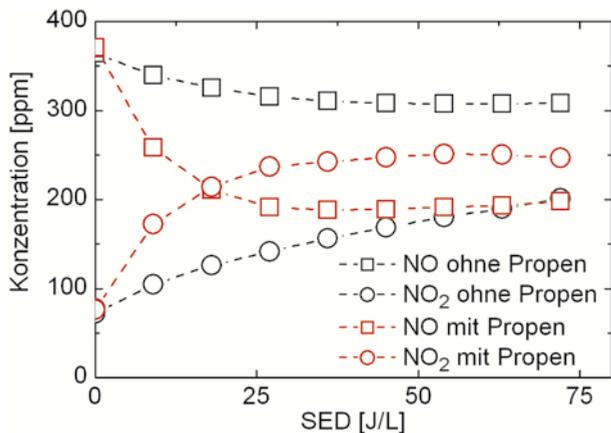


Abbildung 8: Laborergebnis zur NO-zu-NO₂-Wandlung (INP) im 10 %-Last-Gasgemisch bei 160 °C mit und ohne Zugabe von Propen

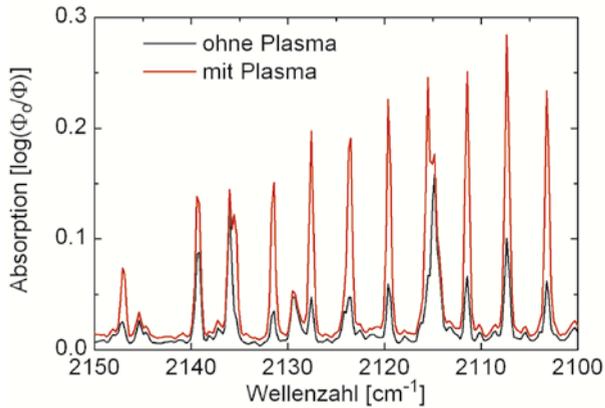


Abbildung 9:
Ausschnitt der Infrarotspektren, gemessen ohne Plasma (schwarze Linie) und mit Plasma (SED = 72 J/L, 10 %-Last-Gasgemisch, T=160 °C, rote Linie)

Die nach vorstehend beschriebenem Verfahren gefundenen Spezies wurden in die Infrarot-Spektren-Auswertungssoftware integriert und während der folgenden Untersuchungen überwacht. Aus diesen Daten konnten unter anderem Stickstoff- und Kohlenstoff-Bilanzen ermittelt und reaktionskinetische Vorgänge ermittelt werden.

Untersuchungen am realen Schiffsdieselmotor

Eine weitere Aufgabe des Projektes war die Applikation eines plasma-katalytischen Systems zur Abgasnachbehandlung an einem realen Schiffsdieselmotor. Dieser wurde vom Projektpartner Maritime Universität in Szczecin zur Verfügung gestellt (Sulzer 6 AL 20/24). Dort wurde eine entsprechend den Strömungsverhältnissen skalierte Plasmaquelle im Bypass des Abgasstranges installiert (Abbildung 10). Mit diesem System wurden verschiedene



Abbildung 10: Thermisch isolierte Plasmaquelle PQ-MUS im Bypass des Prüfstandsmotors

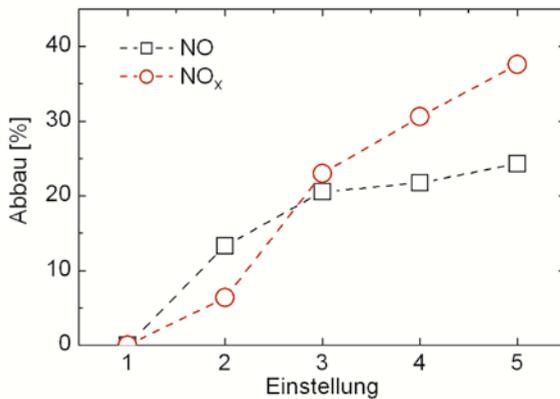


Abbildung 11:
Stickoxidabbau
bei verschiedenen
Einstellungen des
plasma-katalytischen
Abgasnachbehand-
lungssystems im
Bypass des Prüf-
standsmotors (10%
Motorlast)

Parameter des plasma-katalytischen Systems und der Motorsteuerung in gemeinsamen Experimenten der Projektpartner variiert (Plasmaleistung, Propenzufuhr, Gasfluss, Motorleistung).

In Abbildung 11 sind einige Ergebnisse der Messungen gezeigt. Zu verschiedenen Einstellungen, die in Tabelle 3 erläutert sind, konnten unterschiedliche Werte für den Abbau von NO und NO_x ermittelt werden. Durch das Plasma allein wurden etwa 15% Stickstoffmonoxid abgebaut. Zumischen von Propen verbesserte den NO-Abbau auf etwas über 20 %. Den FTIR-Messwerten zu Folge blieb die NO₂-Konzentration konstant bei niedrigen Werten um 100 ppm. Summarisch führt dies zu einer NO_x-Reduzierung um ebenfalls etwas mehr als 20 %. Erhöhen der spezifischen Energiedichte lieferte nur eine geringfügige Erhöhung des NO-Umsatzes, jedoch eine Verbesserung des NO_x-Abbaus auf etwa 38 %. Da die Stoffumsätze die Erwartungen aus den Laborexperimenten und Modellierungen nur teilweise bestätigten, wurde das plasma-katalytische System einer Überprüfung unterzogen, deren Ergebnisse jedoch noch nicht abschließend bewertet werden konnten.

Einstellung	SED	Propenzufuhr
1	0	0
2	41 J/L	0
3	41 J/L	800 L/h
4	76 J/L	800 L/h
5	76 J/L	1500 L/h

Tabelle 3: Angaben der Plasmaleistung und der Propenzufuhr zu den in Abbildung 11 angegebenen Punkten

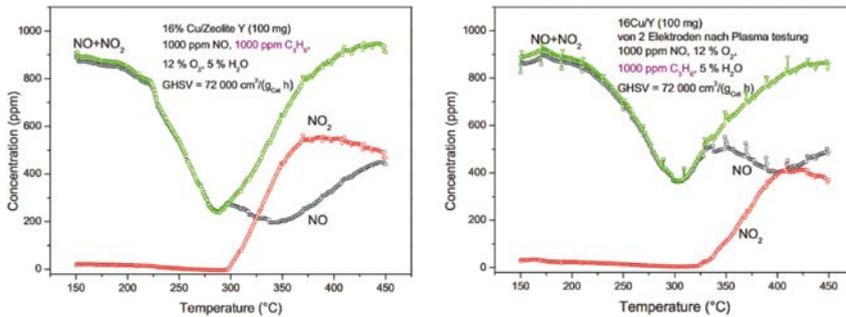


Abbildung 12: Funktionalität des ausgewählten Katalysatormaterials vor (links) und nach (rechts) mehrstündigem Kontakt mit Plasma im reaktiven Gasmischung

Ein Schritt der Überprüfungen war die Bewertung des Katalysatormaterials, nachdem es mehrere Stunden mit Plasma im reaktiven Gasmischung in Kontakt war. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Funktionalität des Katalysators weiterhin gegeben ist und durch die Einwirkung der reaktiven Spezies im Plasma nur wenig beeinträchtigt wird. Weitere mögliche Ursachen wurden diskutiert, konnten aufgrund des komplexen Parameterraumes jedoch im Laufe des Projektes nicht mehr experimentell überprüft werden.

Im Laufe mehrerer Messkampagnen konnte gezeigt werden, dass die Leistungscharakteristik des plasma-katalytischen Systems PQ-MUS bezüglich des strömungsdynamischen Verhaltens und der elektrischen, mechanischen, chemischen und thermischen Stabilität die Anforderungen, die durch die Applikation im Abgasstrang eines realen Motors gestellt werden, vollständig erfüllt. Für die Optimierung der Stoffwandlung sind jedoch weitere Analysen und Experimente notwendig.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Plasma-katalytische Abgasbehandlung für Schiffsdieselmotoren“ wurde eine Plasmaquelle entwickelt, die den Anforderungen im Abgasstrang eines Schiffsdieselmotors genügt und den chemischen, mechanischen und thermischen Belastungen standhält ohne den Motorenbetrieb zu beeinträchtigen. Dazu wurde ein neuartiges Verfahren zur Fertigung und Applikation einer Plasmaquelle entwickelt, mit der Gasflüsse von mehreren hundert Kubikmetern pro Stunde behandelt werden können. Für den Betrieb der Plasmaquelle wurde eine Spannungsversorgung entworfen und gefertigt, die gemeinsam mit der Motorensteuerung geregelt werden kann. Ebenfalls wurde ein Katalysator-Träger-Gemisch entwickelt, das auf Edelmetallzusätze verzichtet und auf keramische und metallische

Oberflächen anhaftend aufgetragen werden kann. Dieses Material wird durch den Kontakt mit dem Plasma und den reaktiven Gasen im Abgas eines Schiffsdieselmotors nur geringfügig beeinträchtigt, ohne jedoch seine katalytische Funktionalität zu verlieren. Das strömungsmechanische Verhalten des plasma-katalytischen Abgasnachbehandlungssystems wurde mit Unterstützung durch CFD-Simulationen optimiert. Die Reaktionskinetik innerhalb einer Plasmaquelle wurde mit einer stöchiometrischen Modellierung analysiert. Mit der auf den Bypass des Prüfstandsmotors optimierten Plasmaquelle PQ-MUS wurden verschiedene Lastzustände des Motors und unterschiedliche Parameter des plasma-katalytischen Systems untersucht und eine NO_x -Reduzierung von bis zu 38 % erreicht.

Quellenangaben

- [1] The Marine Environment Protection Committee (2008) Revised MARPOL Annex VI. International Maritime Organization,
- [2] McAdams R (2007) Pulsed corona treatment of gases: system scaling and efficiency. *Plasma Sources Sci. Technol.* 16: 703-710
- [3] Müller S, Zahn R J (2007) Air Pollution Control by Non-Thermal Plasma. *Contrib. Plasma Phys.* 47: 520-529
- [4] Hołub M, Kalisiak S, Borkowski T, Myśków J, Brandenburg R (2010) The Influence of Direct Non-Thermal Plasma Treatment on Particulate Matter (PM) and NO_x in the Exhaust of Marine Diesel Engines. *Polish J. of Environ. Stud.* 19: 1199-1211
- [5] Penetrante B M, Brusasco R M, Merritt B T, Vogtlin G E (1999) Environmental applications of low-temperature plasmas. *Pure Appl. Chem.* 71: 1829-1835
- [6] Mok Y S, Ravi V, Kang H C, Rajanikanth B S (2003) Abatement of nitrogen oxides in a catalytic reactor enhanced by nonthermal plasma discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science* 31: 157-165
- [7] Okubo M, Arita N, Kuroki T, Yoshida K, Yamamoto T (2008) Total Diesel Emission Control Technology Using Ozone Emission and Plasma Desorption. *Plasma Chem Plasma Process* 28: 173-187
- [8] Schmidt M, Basner R, Brandenburg R (2013) Hydrocarbon Assisted NO Oxidation with Non-thermal Plasma in Simulated Marine Diesel Exhaust Gases. *Plasma Chem Plasma Process* 33: 323-335

PITAS – Piraterie- und Terrorabwehr auf Seeschiffen

Dr. Christoph Zebermann, Dr. Thomas Lehmann (Raytheon Anschütz, Kiel);
Prof. Dr. Boris Culik (F³: Forschung . Fakten . Fantasie, Heikendorf)

Zusammenfassung

Das Piraterie- und Terrorabwehrsystem PITAS ist ein gemeinsames F&E-Projekt unter Federführung der Raytheon Anschütz, Kiel. Ziel des Projekts ist die Verbesserung der Sicherheit auf Handels- und Fahrgastschiffen sowie Luxusyachten. Hierzu wurden verschiedene, ineinandergreifende Systemelemente entwickelt:

- Eine Wissensdatenbank die, basierend auf verschiedenen Kommunikationsnetzen aktuelle Piraterie- und Terrorangriffe analysiert und daraus die wahrscheinlichsten Risikoszenarien ableitet,
- ein integriertes Systemdesign für Sensoren und Effektoren, Alarmer und Reaktionsvorschläge,
- die Integration in die bestehende Schiffs- Infrastruktur und Kommunikationssysteme,
- ein integriertes Track-Management auf der Grundlage von Sonar- und Radardaten,
- spezifische Alarmer, die auf die verschiedenen Kommunikationssystem an Bord aufsetzen,
- ein neuartiges Nahbereichsradar und Sicherheitsmanagement für das gesamte System,
- ein neues Sonar zur Detektion von Unterwasserangriffen sowie neuartige Konzepte für die Sonarsensorik,
- eine ergonomisch optimierte Benutzerschnittstelle (HMI).

Abstract

The Pirate and Terrorist Aversion System PITAS is a joint R&D project led by Raytheon Anschütz, Kiel. The project aims at improving the safety on merchant, passenger and leisure vessels and offshore facilities through a range of interlocking elements:

- a knowledge data base integrating various communication networks to analyze current piracy and terrorism cases and derive up to date threat scenarios
- an integrated systems design for sensors and effectors, alarms and reactions
- integration into ship-based infrastructure and communications
- an integrated track management based on radar and sonar data
- dedicated alarms using various onboard and remote communications
- a reaction system based on an automated pan and tilt platform
- novel optical sensors and repellents
- a novel sonar sensor array capable of diver detection
- a novel closerange RADAR safety and security concepts for the complete system
- an integrated and ergonomic human machine interface

Einleitung

Piraterie zur See bleibt ein weltweites Problem: Bis Anfang Oktober 2013 belief sich die Anzahl der Einträge im „Live Piracy Report“ des ICC bereits wieder auf rund 200. Schwerpunkte sind die tropischen Gewässer rund um den Globus, angeführt von Südostasien, der Westküste Afrikas (Golf von Guinea) und dem Horn von Afrika und gefolgt von den tropischen Küsten Südamerikas. Auch im südlichen Mittelmeer sind Piraten mittlerweile aktiv (ICC Live Piracy Report, 10/2013).

Schiffe deutscher Reeder waren auch im 1. Halbjahr 2013 mit 23 Vorfällen mit am stärksten betroffen und sind bei einem Anteil von nur 7% an der Welt-handelsflotte deutlich überrepräsentiert. Gefährdete Schiffstypen bei Angriffen auf See sind langsam fahrende Schiffe (< 18 kn) mit niedrigem Freibord (< 8m) und ohne erkennbare Abwehrmaßnahmen bzw. Reaktion auf den Angriff. Chemikalien- und Produkttanker sowie Bulk-Carrier stellen die größte Gruppe, gefolgt von Rohöl-Tankern (BP See, 2013). Anbordkommen auf Reede bzw. im Hafen sind die häufigsten Angriffsszenarien weltweit, gefolgt von Anbordkommen bei Schiffen in Fahrt. Eingesetzt werden kleine schnelle Fischerboote, sogenannte Skiffs, häufig auch, zur Vergrößerung der Reichweite, von einem Mutterschiff aus.

Reeder und Seeleute fordern wirkungsvolle technische Hilfsmittel, um diesen Bedrohungen zu begegnen. Im Vorfeld der Routenplanung stehen die Echtzeit-Auswertung piraterierelevanter Webseiten, eine permanent aktualisierte Situationsanalyse sowie Routen-Änderungsvorschläge, um Risikogebiete zu meiden. Während der Fahrt soll ein verbessertes RADAR bei Angriffs-Detektion und Tracking helfen. Mit Hilfe von Video-Überwachungstechnik sollen Nachsichtfähigkeit und eine Dokumentation des Angriffes erfolgen. Schließlich verlangt die Schiffsbesatzung nach ferngesteuerten Reaktionsplattformen, um mit Hilfe von Licht, Schall, Wasser oder anderen Wirkmitteln erfolgreich einen Angriff abzuwehren bzw. mindestens so lange aufzuhalten, bis Hilfe kommt, ohne sich selbst Gefahren auszusetzen.

PITAS-Systemkomponenten

Unter Federführung der Raytheon-Anschütz GmbH wurde in Kiel gemeinsam mit Thales Defence and Security Systems, L-3 Communications ELAC Nautik und der Christian-Albrechts-Universität, sowie WISKA CCTY (Kaltenkirchen) und F³: Forschung . Fakten . Fantasie (Heikendorf) das System PITAS entwickelt. PITAS vereint die von den Reedern geforderten Komponenten: Es besteht aus einer Wissensdatenbank, die auf verschiedene Informationskanäle zurückgreift und eine aktualisierte Szenarienanalyse vornimmt, und vereint Elektrooptische Sensoren sowie die RADAR- und Sonar-Verfolgung kleiner Bewegtziele in einer Steuerkonsole mit Situationskarte und Track-Einordnung. Eine ferngesteuerte Reaktionsplattform ermöglicht es der Mannschaft, das Risiko der Abwehr gering zu halten. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden im September 2013 am Molenkopf der WTD 71 der Bundeswehr in Surendorf an der Ostsee der Öffentlichkeit vorgestellt (WTSH, 2013).

1. Wissens-Datenbank und Managementsystem

Das Wissens-Datenbank und Managementsystem ist das Herzstück von PITAS. Es basiert auf einer Reihe von Bedrohungsszenarien, die von der PITAS-Expertengruppe anhand von Piraterievorfällen der letzten Jahre erarbeitet wurden. Dabei wurden die folgenden Zustände des zu schützende Seeschiffes angenommen: in Fahrt, festgemacht im Hafen und auf Reede. Die Angriffsszenarien gehen dabei von Tauchern, Angreifern in einem oder mehreren kleinen Booten, mit und ohne Unterstützung durch ein Mutterschiff sowie der Anwesenheit unbeteiligter Boote und Schiffe aus.

Die Datenbank erhält sowohl statische als auch dynamische Daten. Diese können manuell eingegeben werden, z.B. die geplante Route, die technischen Schiffseigenschaften, die Ladung oder die Besatzungsliste. Weiterer Input kommt von Web-Crawlern, die Open-Source-Informationen über aktuelle Piraterie-Angriffsfälle auswerten und in das System einfließen lassen (Böhm, 2011). Die Schiffsdatenbanken aus verschiedenen Quellen wurden

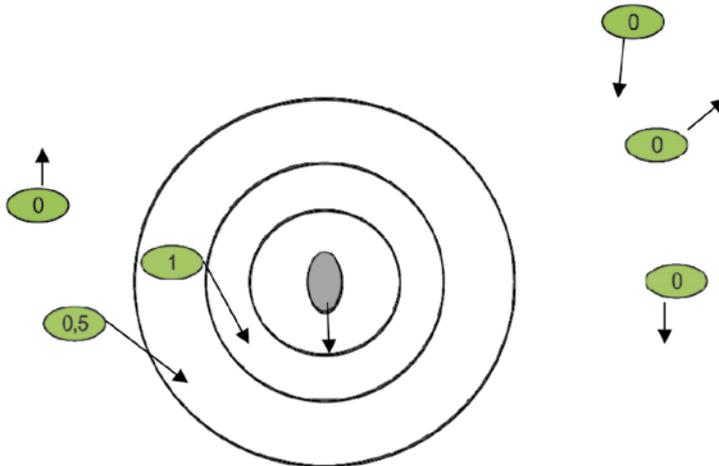


Abb. 1. Umgebung eines Handelsschiffs in dichtem Seeverkehr. Die Bedrohungsanalyse liefert „0“ für harmlose Verkehrsteilnehmer, „0,5“ für unidentifizierte, sich nähernde Boote und „1“ für unidentifizierte, sich nähernde Boote innerhalb des Sicherheitsradius

ebenfalls aufgenommen, um eine Erkennung von gekaperten und als Mutterschiffe eingesetzten Schiffen zu ermöglichen. Schließlich werden dynamische Daten der an Bord befindlichen Navigations-Sensoren wie AIS, RADAR, ECDIS, GPS, GMBSS, Kreisel- und magnetischer Kompass sowie weitere Eigenzustands-Sensoren an Bord des Schiffes (optische und Zustandssensoren von Schotts etc.) abgerufen, um eine Situations- und Bedrohungsanalyse in Echtzeit zu ermöglichen.

Basierend auf diesen Informationen ermittelt das Wissensmanagementsystem das aktuelle Bedrohungsszenario (Abb. 1) und wirft Reaktionsvorschläge aus. Diese reichen, in Abhängigkeit von der Situation, von einer Routenänderung, um ein Risikogebiet zu umfahren, bis hin zur Alarmierung der Besatzung.

2. Integriertes Systemdesign

PITAS ermöglicht die Integration verschiedener Sensoren zur frühzeitigen Entdeckung von Bedrohungen und Angriffen. Diese schließen die auf Handelsschiffen von der IMO vorgeschriebenen X- und S-Band Radare, sowie das AIS ein. Weitere Sensoren wie SONAR zur Taucherdetektion und visuelle Sensoren wie Farb-, Restlicht-, und Infrarot-Kameras können ebenfalls eingebunden werden. Die Identifikation der eigenen Schiffsbesatzung mittels unterschiedlicher Systeme, z.B. an Türen, Schotts und in verschiedenen Schiffssektionen wird zur Zugangskontrolle eingesetzt (Abb. 2).

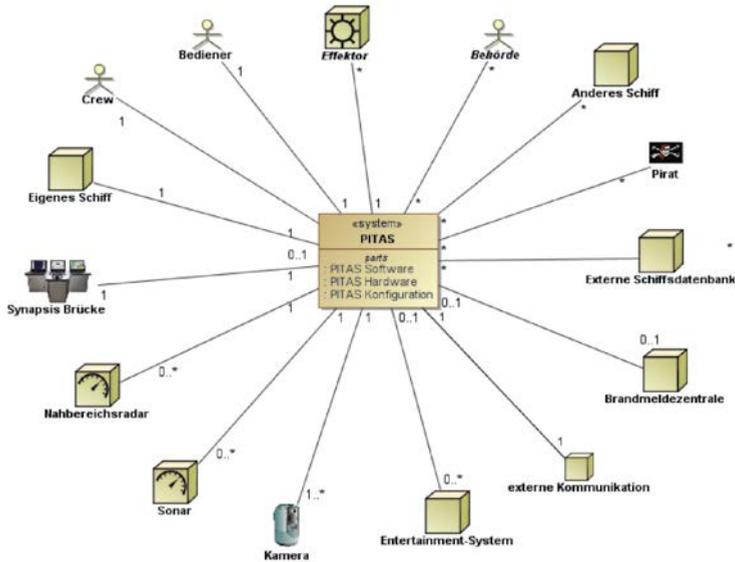


Abb. 2: Integration von Sensoren, Effektoren, Anwendern und Crew in das PITAS-System.

Im Verlauf der PITAS-Entwicklung wurden eine Reihe von Sensoren und Effektoren, ihre Eignung für das System und die dafür erforderliche Datenintegration untersucht. Eine Voraussetzung für die Systemintegration sind entsprechende Schnittstellen. Basierend auf der Fusion und -Analyse der Daten aus verschiedenen Quellen konnte eine logische und abgestufte Kette zur Auslösung von Alarmen und Effektoren erarbeitet werden.

Eine Reihe potentieller Effektoren ist aus der Presse bekannt. Dies können akustische Alarme, die Aktivierung elektrischer Schutzzäune sowie hochintensive akustische und thermische Abwehreinrichtungen wie LRAD oder Mikrowellensender bis hin zu ferngesteuerten Wasserwerfern sein. Während diese Systeme in PITAS integriert werden können, war das Forschungsprojekt darauf konzentriert, eine automatische Zielverfolgung mit Vorhalteberechnung für entsprechende Effektoren sowie eine geeignete mechanische Plattform hierfür zu entwickeln.

3. Track Management

Die Detektion kleiner, schnell fahrender Boote und Skiffs mit Hilfe der an Bord von Handelsschiffen installierten Navigationsradare erforderte die Entwicklung eines neuartigen Trackers. Dieser besteht aus einem handelsüblichen Laptop, der an das Navigationsradar angeschlossen werden kann und mit Hilfe einer speziell entwickelten Software die Erkennung potentieller Angreifer frühzeitig ermöglicht.

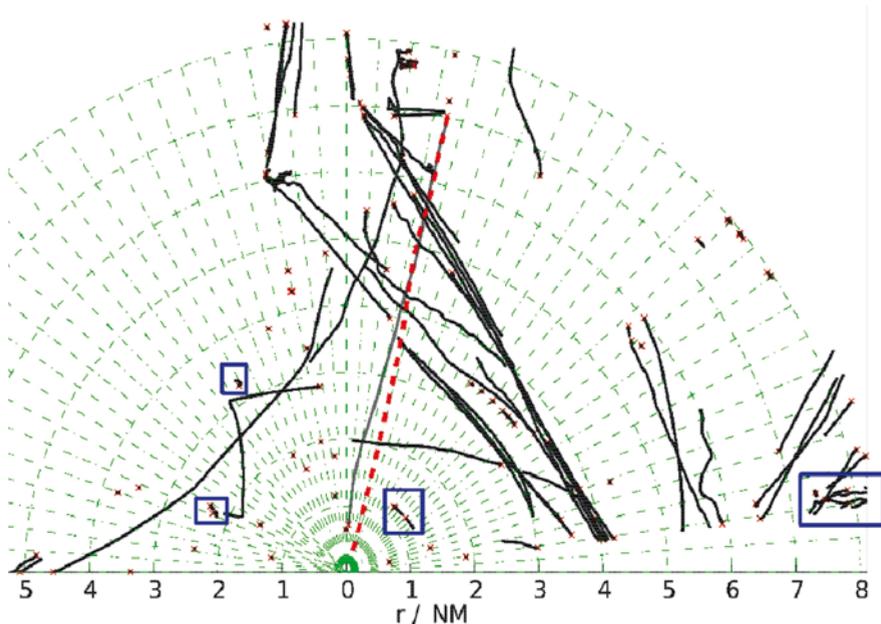


Abb. 3: RADAR-Tracks aufgenommen in der Eckernförder Bucht im Verlauf des Versuchs. Die sich nähernden beiden Schnellboote wurden erstmals in einer Entfernung von 6,7 NM detektiert (Diagonale Linien von 0 ausgehend bis ca. 1 Uhr).

Eine große Herausforderung war dabei die Optimierung der Datenanalyse, um diese in Echtzeit zu bewerkstelligen, sowie die Eliminierung falscher sowie harmloser Tracks. Zwei Algorithmen, CFAR (Constant False Alarm Rate) und MHT (Multi-Hypothesis-Tracking) wurden für diese Aufgabe angewendet. Ferner wurde der GNN-Ansatz (Global Nearest Neighbour) getestet, um die erforderliche Rechenleistung zu minimieren, was sich aber in einer stark echogestörten Umgebung als negativ erwies. MHT wurde daher unter Verwendung eines adaptiven Filters modifiziert, um falsche Tracks zu eliminieren, und mittels eines zweistufigen Gatings wurde die Rechenleistung verringert (Nguyen u. Claussen, 2013). Basierend auf der Auswertung von Targets aufeinanderfolgender Radarbilder können schwache Radarsignaturen jetzt bereits aus einer Entfernung von 6,7 NM erkannt werden (Nguyen, 2012).

Abb. 3 zeigt die Verkehrssituation in der Eckernförder Bucht während des Versuchs. Zwei Schnellboote nähern sich aus 1 Uhr kommend mit einer Geschwindigkeit von > 20 kn der eigenen Position. Ihre Tracks müssen aus der Vielzahl der Tracks anderer Verkehrsteilnehmer herausgefiltert und als Bedrohung identifiziert werden. Dass dies erfolgreich gelöst wurde, zeigten eindrucksvoll die Versuche im September 2013.

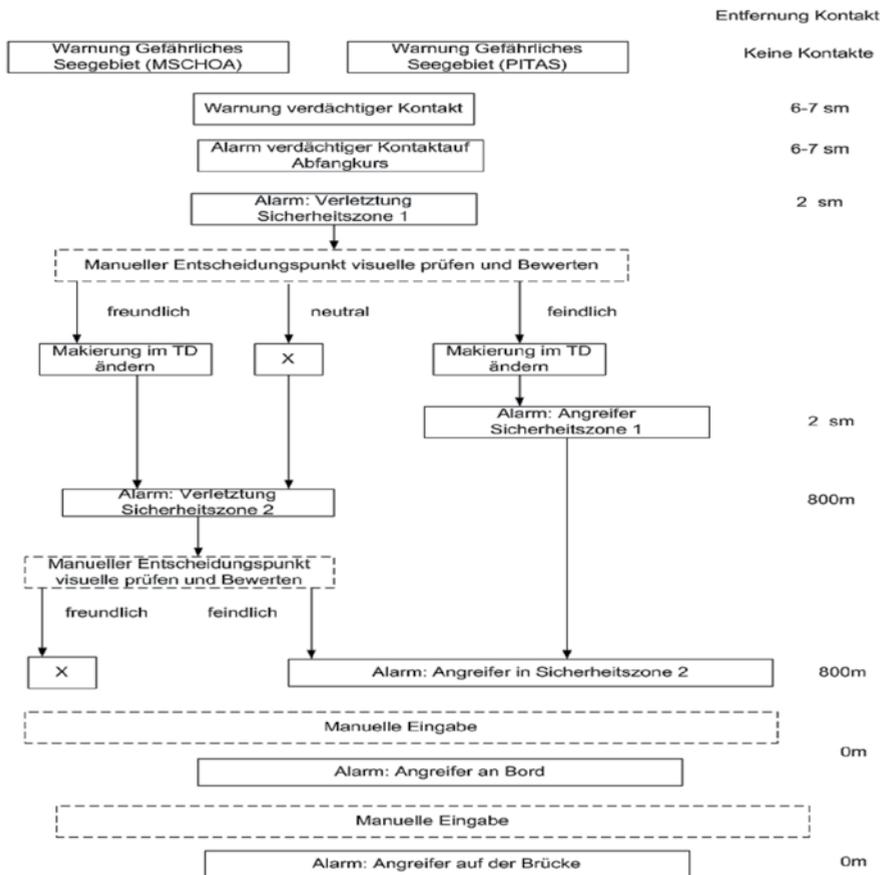


Abb. 4: Abgestufte Alarmzustände in Abhängigkeit von der Entfernung einer Bedrohung und der dynamischen Situationsanalyse.

4. Alarmdoktrin

Die Datenauswertung durch das Wissensmanagementsystem führt zu einer kontinuierlich aktualisierten Situationsanalyse. Diese ermöglicht eine auf den Bedrohungsgrad abgestufte Reaktion (Abb. 4). Die Alarmdoktrin, die Spezifizierung und Klassifizierung der Alarme, ihre Darstellung mit Hilfe der Bedienerchnittstellen (siehe unten) und die einsetzbaren Geräte zu ihrer akustischen und visuellen Darstellung waren die Kernelemente dieses Arbeitspakets.

5. Detektions- und Reaktionssysteme

Bislang werden Piratenangriffe mit Hilfe des schiffseigenen Radars sowie mittels visueller Beobachtung durch die Besatzung detektiert. Zur Unterstützung der Crew und Verbesserung der Detektion wurde im Rahmen von

PITAS eine neuartige Taglicht- und Infrarotkamera mit automatischer Bildanalyse entwickelt. Ziel war die selbständige Fokussierung auf das entdeckte Objekt und seine automatische Verfolgung. Das Objekt kann dabei ein angreifendes Boot oder eine Person sein, die über Bord gegangen und in Seenot ist. Das Kamerasystem wurde auf Fähren in der Ostsee erprobt und erfolgreich in das PITAS-System und das Tracking eingebunden.

Mit Hilfe eines neuartigen optischen Reaktionssystems sollen Angreifer innerhalb eines Radius von 200m kurzfristig geblendet werden, und somit nicht mehr in der Lage sein, das angegriffene Schiff ins Visier zu nehmen. Zusätzlich kann die eingesetzte Lichtquelle ein stark pulsierendes Licht erzeugen, welches temporäre Übelkeit beim Angreifer auslöst (vgl. Hardin et al. 2008). Die eingesetzte 1.000W Xenon-Lampe erreicht 60.000 Candela/cm² (die Leuchtdichte der Sonne erreicht mittags 150.000 Candela/cm²).

Beide Systeme, das Kamera- sowie das optische Reaktionssystem, sind auf dem gleichen Schwenk- und Neigekopf montiert und ermöglichen dadurch die gleichzeitige visuelle Beobachtung und Ausleuchtung des Zielobjekts. Um die Ausrichtung unabhängig von den Gier-, Stampf- und Rollbewegungen des Schiffes zu ermöglichen und um Parallaxenverschiebungen an den verschiedenen Systemstandorten auf dem Schiff zu kompensieren, wurde eine spezielle Hard- und Software entwickelt. Diese beinhaltet eine Vorhaltberechnung, die auch Windrichtung und Geschwindigkeit berücksichtigt, wichtige Parameter zur Ansteuerung zum Beispiel von Hochdruck-Wasserwerfern als Abwehrmaßnahme.

6. Sicherheitskonzept

Das PITAS-Sicherheitskonzept zielt darauf ab, zu vermeiden, dass Passagiere oder Crew von den Abwehrmaßnahmen im Nahbereich versehentlich erfasst oder verletzt werden. Die Sicherheitsanalyse beinhaltet die Bestimmung der Bedrohungsstufen der verschiedenen System-Module aufbauend auf den 4 Sicherheits-Integritätsleveln (SIL). Hierzu wurden Strategien und Methoden zur Reduzierung der potentiellen Gefahren auf ein akzeptierbares Niveau erarbeitet.

7. SONAR-Sensor-Array

Um die Schiffsbesatzung in die Lage zu versetzen, kleine unterseeische Ziele wie z.B. sich nähernde Taucher zu detektieren, wurde ein neuartiges Sonar Sensor Array entwickelt. Hierzu wurden verschiedene Arten von Sendern und Empfängern untersucht, charakterisiert und ausgewählt. Schließlich wurde ein neues Konzept entwickelt, bei dem Sensor-Positionierung und Kopplung im Vordergrund standen. Die Arbeiten bauen auf dem Van-Atta Antennen-Array auf (Van Atta, 1958).

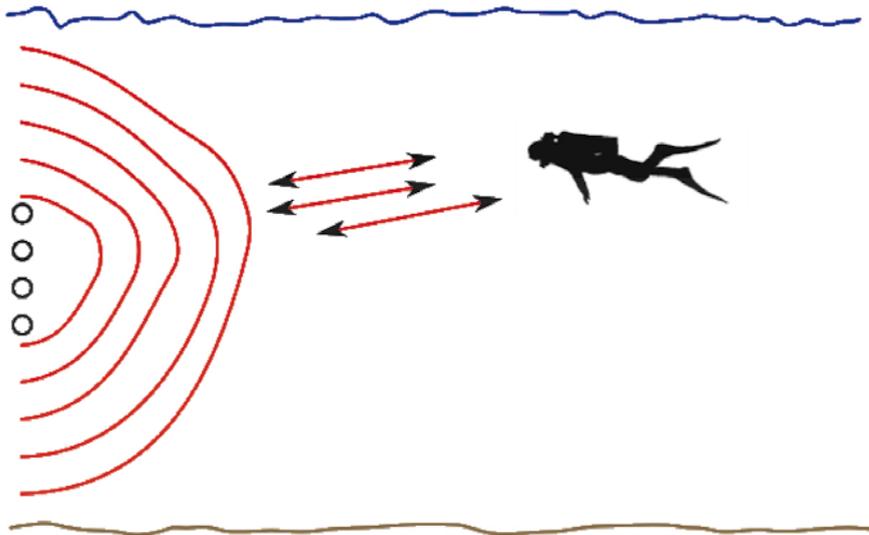


Abb. 5: Taucherdetektion mittels selbst-fokussierendem Sonar nach dem van-Atta-Prinzip.

Die von Van Atta erfundene Antenne ist aus dem Bereich der Satellitenkommunikation und Projektildetektion bekannt. Sie ist in der Lage, automatisch ihre Sendeleistung auf ein Ziel zu fokussieren. In PITAS wurde eine numerische Simulation auf der Grundlage von Matlab und Belhop entwickelt und Versuche mit neuen Signalformen und verringertem Feedback durchgeführt (Abb. 5).

Die Ergebnisse der Simulationen und Feldversuche zeigen eine hohe Detektionsrate für kleine bewegte Ziele und führten zur Einreichung von zwei Patenten. Neue Sendesignale, die Weiterentwicklung von Detektionsalgorithmen, die Entwicklung eines Laborprototyps mit erhöhter Bandbreite und flexibler Nutzbarkeit für weitere Untersuchungen und die erfolgreiche Durchführung von Seeversuchen bildeten den Abschluss des Teilprojekts.

8. Nahbereichs-RADAR

Navigationsradare auf Handelsschiffen sind nicht in der Lage, kleine Ziele im Nahbereich zu detektieren. Da die Anzahl der Besatzungsmitglieder begrenzt ist, besteht in Szenarien mit mehreren, simultan angreifenden Booten die Gefahr, nicht alle Angreifer gleichzeitig und lückenlos in geringer Entfernung erfassen zu können. Um diesem Problem zu begegnen, wurde ein 34 GHz-Nahbereichsradar entwickelt. Die durch die geringe Antennenabmessung besonders hohe Scanrate, ermöglicht ein Zieltracking nahezu in Echtzeit und bringt so einen besonderen Vorteil bei der Detektion und Verfolgung von Zielen im Nahbereich. Die im Vergleich zu einem Navigationsradar deutlich

erhöhte Pulswiederholfrequenz, sowie eine auf Seeclutterunterdrückung optimierte Dopplersignalverarbeitung, führen zu einer erhöhten Abgrenzbarkeit selbst bei Szenarien mit mehreren, unmittelbar benachbarten Zielen. Die Signalverarbeitung, Störunterdrückung sowie die Bewegtzieldetektion sind im Radargerät untergebracht, ein externes Verarbeitungsterminal und damit erhöhter Hardwareaufwand entfällt. Das Nahbereichsradar bietet als Ergänzung zum bestehenden Navigationsradar die Möglichkeit einer erweiterten Gefahrendetektion im Nahbereich und integriert sich dabei nahtlos derart in das PITAS System, dass der Bediener ohne merklichen Mehraufwand einen Zugewinn an Informationen erhält.

9. Bedienerschnittstelle (HMI)

Die Schnittstelle zwischen PITAS und dem Sicherheitspersonal an Bord ist das Human-Machine-Interface (HMI). Dieses kann in die Schiffsbrücke integriert werden oder gemeinsam mit ausgewählten PITAS-Modulen nur für bestimmte Zeit an Bord verfügbar gemacht werden, z.B. auf Basis eines transportablen Sicherheitscontainers (Abb. 6).

Das HMI stellt dem Bediener integrierte Informationen aus Karten, Tracks und Zielinformationen zur Verfügung sowie Warn- und Alarmmeldungen und integriert alle Sensoren und Effektoren des PITAS-Systems. Über das HMI werden Daten eingegeben, angepasste Reaktionsvorschläge angezeigt, automatisierte Prozesse abgearbeitet, Kommunikationskanäle geöffnet und

Alarmer abgesetzt, sowie Bestätigungen für intensivere Abwehrmaßnahmen abgefragt.

Das HMI wurde von Raytheon-Anschütz auf Basis eines aktuellen Schiffsbrückendesigns entwickelt bzw. auf Basis eines mobilen Sicherheitscontainers mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten.



Abb. 6: Die mobile, containerisierte Bedienerschnittstelle integriert alle PITAS-Elemente für den Sicherheitsoffizier an Bord. Sie zeigt Karten, AIS und visuelle Informationen und steuert Effektoren und Reaktionssysteme.

Literatur

Böhm, M.: Integration von Informationen zu Piratenangriffen aus heterogenen Internetquellen mit einer Text-Mining-Komponente, Bachelor Thesis, Christian-Albrechts-University, Kiel (2011).

BP See (2013) Pirateriebericht der Bundespolizei See 2. Quartal 2013. <http://www.bundespolizei.de>

Harding, G., Harding, P., Wilkins, A (2008) Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy: Characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them. *Epilepsia* 49(6), 1095-1098

ICC Live Piracy Report (10/2013) International Chamber of Commerce, Piracy news and figures. www.icc-ccs.org

Nguyen, V. D.: Small-Target Radar Detection and Tracking Within the PITAS Hard- and Software Environment. Proc. of the Future Security Conference, Bonn (2012)

Nguyen, V. D., Claussen, T.: Reducing Computational Complexity of Gating Procedures Using Sorting Algorithms. In proc. of the 16th International Conference on Information Fusion, Istanbul (2013)

Noemm, M., Hoehner, P. A.: CutFM: A Novel Sonar Signal Design, in Proc. Future Security Conference, Berlin (2013)

WTSH (2013) PITAS – Piraterie- und Terrorabwehr auf Seeschiffen Piratenabwehr made in Schleswig-Holstein jetzt erfolgreich im Einsatz. <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/wtsh-gmbh/PITAS-Piraterie-und-Terrorabwehr-auf-Seeschiffen/boxid/622844>

Situationsadaptierte Handlungsempfehlung für Person-über-Bord Unfälle

M. Baldauf (World Maritime University, Forschungsgruppe MaRiSa - Maritime Risk and System Safety, Malmö, Schweden), K.Benedict (Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt, ISSIMS, Rostock-Warnemünde), V. Köhler (MarineSoft GmbH, Rostock-Warnemünde), D. Meißner (Institut für Sicherheitstechnik/ Schiffssicherheit e.V., Rostock-Warnemünde), E. Wilske (SSPA AB Göteborg)

1. Einleitung

In diesem Beitrag werden Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsprojektes ADOPTMAN vorgestellt. Dieses Projekt wurde innerhalb der im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union geförderten MARTEC (Phase I) – Initiative zur Durchführung länderübergreifender Gemeinschaftsprojekte auf dem Gebiet Maritimer Technologien durchgeführt. Unter der Leitung der World Maritime University (WMU) in Malmö arbeiteten private und öffentliche schwedische und deutsche Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen und Unternehmen wie SSPA AB Göteborg, Stenaline Scandinavia AB, MarineSoft GmbH Rostock, Institut für Sicherheitstechnik/ Schiffssicherheit Warnemünde und die Hochschule Wismar (Bereich Seefahrt Warnemünde, Institut für Innovative Schiffs-Simulation und Maritime Systeme) zusammen.

Das Projekt fokussiert auf eine Problemstellung auf dem Gebiet der Maritimen Sicherheit und soll zur effektiveren und gezielteren Unterstützung der Schiffsführung in sicherheitskritischen Situationen bei „Person-über-Bord“ Unfällen sowie bei gegebenenfalls erforderlichen Such- und Rettungsaktionen beitragen.

Zielstellung und Gegenstand von ADOPTMAN sind die Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit bei „Person over Board“ (PoB) Unfällen. Zu dieser Zielstellung soll durch die Entwicklung zuverlässiger Detektionsmethoden für solche Unfälle sowie die Entwicklung entsprechender Handlungshilfen für das Schiffsführungspersonal bei der Rückführung des Schiffes zum Verunfallten beigetragen werden. Die Entwicklung und Anwendung innovativer technischer Lösungen soll schließlich durch die parallele Entwicklung moderner Lernsysteme begleitet werden.

Die Untersuchungen zum sicheren und effizienten Manövrieren von Schiffen in Gefahrensituationen beinhalteten die verbesserte und insbesondere situationsbezogene Manöverassistenz für IAMSAR-Standard-Rückführmanöver

unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Manövriereigenschaften des Schiffes und der zum Unfallzeitpunkt herrschenden Umweltbedingungen.

Mit diesen Inhalten und Zielstellungen ordnet sich das Projekt in die globale Thematik der operativen Schiffssicherheit ein. Inhaltlich befasst sich das Projekt mit Untersuchungen zur Integration neuartiger Informations- und Kommunikationstechnologien zur effektiveren Unterstützung des maritimen Notfallmanagements.

Insbesondere beim Manövrieren hängen sowohl die Sicherheit als auch die Effektivität des Schiffsbetriebes maßgeblich von einer möglichst optimalen Kommunikation zwischen dem menschlichen Akteur und den ihn unterstützenden technischen Systemen ab. Die auf den Mensch-Maschine-Schnittstellen der Schiffsbrücke dargestellten Informationen müssen daher aktuell, präzise verarbeitet, sowie trotz ihrer Komplexität leicht erfassbar sein. Dieser zentralen und auch im globalen Maßstab verfolgten Zielstellung ist u. A. die e-Navigation-Initiative der internationalen Weltschiffahrtsorganisation IMO (International Maritime Organisation) gewidmet, die den Rahmen der in AD-OPTMAN ausgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darstellt.

2. Problemstellung und gegenwärtiger Stand

Wie in der Regel bei allen Not- oder Unfällen muss auch bei einem PoB-Unfall jederzeit und bei allen auftretenden Schiffsbetriebszuständen (charakterisiert u. a. durch Schiffstyp und -form, sowie Windangriffsfläche und Tiefgang, etc.) sowie allen Umweltbedingungen, gekennzeichnet u. a. durch Wassertiefen, Wind und Strömungen, schnell entschieden und zuverlässig gehandelt werden. Beim PoB-Unfall besteht erhöhter Entscheidungs- und Handlungsbedarf, da das Leben der verunglückten Person gerettet werden muss. Neben der möglichst unmittelbaren Erkennung des Unfalls besteht zur Einleitung der Rettungsmaßnahmen insbesondere erhöhter Bedarf an der schnellen Verfügbarkeit situationsbezogen aufbereiteter Informationen, um das Schiff sicher manövrieren und schnell zur Unfallstelle zurückführen zu können. In solchen Situationen geben die Manövrierkennwerte, die in den auf der Brücke angebrachten Brückenpostern ("Wheelhouse Poster") bzw. in den von der IMO empfohlenen Brückenunterlagen enthalten sind, zwar eine erste allgemeine Information. Sie sind aber u. a. wegen der Papierform (z. B. Manövrierakte – Manoeuvring Booklet) ungeeignet, um schnell die notwendigen Informationen aufzufinden, die zudem für den konkreten Fall oft nicht anwendbar sind. Dies gilt insbesondere auch deshalb, weil in diesen Unterlagen in der Regel nur Informationen zu Standardmanövern für ausgewählte Betriebszustände und Umweltbedingungen enthalten sind. Die Untersuchungen zur Entwicklung situationsangepasster Manöverberatungen soll dieses Defizit minimieren.

Situationsangepasste Manöverberatungen ordnen sich global in die aktuell von IMO und IALA verfolgte e-Navigation Strategie ein. Diese sieht u.a. vor, auch neue Ansätze zur Entscheidungsunterstützung für das Manövrieren zu entwickeln. Die Entwicklung und Implementierung von Algorithmen und technischen Lösungen zur integrierten automatischen Erkennung einer außenbords fallenden Person, die Generierung eines entsprechenden Alarms auf der Brücke, der gegebenenfalls bereits mit der automatischen Auslösung des Rettungsringes mit Rauchsignal bzw. Nachtlicht sowie der automatischen Generierung und Anzeige von Handlungsvorschlägen (Manöverplänen) zur schnellstmöglichen und zuverlässigen Rückführung des Schiffes zur Unfallposition oder auf die entgegengesetzte Bahn gekoppelt sind, werden als substantielle Elemente zukünftiger e-Navigation Verfahren und Anwendungen betrachtet.

3. Notwendigkeit und Anforderungen zur Weiterentwicklung technischer Systeme zur Unterstützung des Wachoffiziers

3.1 Aktuelles Unfallgeschehen

Von der World Maritime University (WMU) und vom Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V. (ISV) durchgeführte Analysen zeigen, dass die meisten Person-über-Bord Unfälle einen tödlichen Verlauf nehmen: etwa drei Viertel aller über Bord gefallenen Personen werden nicht oder zu spät aus dem Wasser geborgen. Zahlreiche Presseveröffentlichungen nennen für diese Unfallart mit Verweis auf z. T. nicht prüfbare Quellen, wie z.B. Internetforen, eine durchschnittliche Anzahl von bis zu 1.000 Todesfällen pro Jahr für die gesamte Schifffahrt weltweit.

Nach aktuellen statistischen Erhebungen von Klein¹, ereigneten sich im Zeitraum von 2000 bis 2010 allein bei nordamerikanischen Kreuzschifffahrtsreedereien rund 150 Person-über-Bord Unfälle. Nach den von ISV durchgeführten weiterführenden detaillierten Analysen handelt es sich bei den verunglückten Personen um durchschnittlich 40 Jahre alte männliche Passagiere, die hauptsächlich zwischen 22:00 und 03:00 (Lokaler Zeit) über Bord fallen. Damit einher geht das oftmals erst stark verspätete Erkennen des Unfalls (erst nach Stunden wird eine Person als vermisst gemeldet).

Verglichen mit den Unfallarten „Grundberührung“ und „Kollision“ sind PoB-Unfälle seltener, haben aber aus sicherheitstechnischer Sicht weit reichende Konsequenzen und somit aus analytischer Sicht ein sehr hohes Risiko.

Ein PoB-Ereignis erfordert sofortige Entscheidungen und das unmittelbare korrekte Handeln. Sie beeinflussen den Erfolg oder Misserfolg der Rettungsmaßnahmen maßgeblich. Eine wesentliche Voraussetzung für die Rettung ist daher das rechtzeitige Erkennen des Unfalls, welches insbesondere in

¹www.cruisejunkie.com/Overboard.html

den als besonders wahrscheinlich ermittelten Zeiträumen durch technische Lösungen unterstützt werden muss, damit die erarbeiteten Notfallpläne auch zum Erfolg führen.

3.2 Das Bordgestützte Notfallmanagement und Manöver bei PoB-Unfällen

Das Notfallmanagement für PoB-Unfälle ist seit Beginn der Seefahrt Teil des bordgestützten Sicherheitsmanagements. Es ist basierend auf Erfahrungen und Analysen von Unfällen schrittweise verbessert und unter Einbeziehung jeweils aktueller technisch-technologischer Trends weiterentwickelt worden. Allgemeine und zum Teil standardisierte Notfallpläne gehören zu den im ISM-Code geforderten Safety-Management-Systemen. Nach Modell-Notfallplänen für PoB-Unfälle, siehe z.B. Hahne (2012) ist die erste Aufgabe der Brückenbesatzung nach dem Ereigniseintritt bzw. dessen Bemerkern, die Unfallposition festzuhalten. Als weitere Schritte sind zu nennen: Rettungsring mit Licht- und Rauchsignal werfen, scharfen Ausguck halten und das Schiff zur Position des Unfalls zurückführen, um die verunglückte Person aufzunehmen.

Eine wichtige und essentielle Voraussetzung für die erfolgreiche Rettung des Verunfallten ist die Rückführung des Schiffes zur Unfallposition. Dazu sind in der Literatur verschiedene Standardmanöver beschrieben. Da der Erfolg eines solchen Manövers vom Schiffstyp und den aktuell vorherrschenden Bedingungen (Umweltbedingungen und Schiffsstatus) abhängig ist, sind die Manöverempfehlungen dementsprechend allgemein und empfehlend.

Nach den Ausführungen in den IAMSAR (International Aeronautical and Maritime Search and Rescue) und MERSAR (Merchant Ship Search and Rescue) Handbüchern, die 1970 erstmals durch die IMO veröffentlicht wurden, werden hinsichtlich der Handlungsoptionen zum Manövrieren drei verschiedene Fälle unterschieden:

- „sofortige Maßnahme“
- „verzögerte Maßnahme“
- „vermisste Person“

Als konkrete Schiffsmanöver werden der SINGLE -, der WILLIAMSON -, sowie der SCHARNOW – TURN empfohlen. Diese Manöver haben sich nach langjährigen Erfahrungen im Schiffsbetrieb als die effektivsten erwiesen.

Neben diesen drei Rückführmanövern gibt es noch weitere Rückführmanöver (z.B. Double-Turn oder Andersson-Turn), die in der Handelsschifffahrt aber kaum bzw. nur selten genutzt werden. Prinzipiell gilt, dass der Wachoffizier im Ereignisfall selten über praktische Erfahrungen verfügt.

Bei der Betrachtung des Notfallmanagements erscheint es von Bedeutung, dass die für diesen Bereich vorgeschriebenen Trainingsmaßnahmen zumeist unter guten Umweltbedingungen erfolgen, um die beteiligten Besatzungsmitglieder nicht unnötig zu gefährden. Wie aus den vorliegenden Unfalluntersuchungsberichten hervorgeht, ereignen sich PoB-Unfälle jedoch gerade bei ungünstigen Wetterverhältnissen. Insofern steht das Training eher im Widerspruch zum wahrscheinlich eintretenden Unglücksfall, da es nur unzureichend die realen Bedingungen reflektiert.

Schließlich stehen dem Nautiker auch heute noch keine wirklich befriedigenden technischen Mittel zur Verfügung, z.B. um die Manöverplanung in der erforderlichen Zeit der Situation entsprechend durchzuführen.

3.3 Technische Systeme zur Unterstützung des Manövrierens

Zum aktuellen Ausrüstungsstandard moderner integrierter Navigations- und Brückensysteme, die als Kernelement der zukünftigen Umsetzung des e-Navigation Konzeptes angesehen werden, zählen u.a. elektronische Seekarten (ECDIS) und Satellitennavigationssysteme (wie z. B. GPS). Sie ermöglichen u. a. die Position des PoB-Unfallortes präzise zu erfassen und darzustellen. Die entsprechende Funktion muss jedoch manuell aktiviert werden. Unfalluntersuchungen haben gezeigt, dass gerade diese manuelle Markierung oftmals nicht durchgeführt wurde. Es kann prinzipiell festgehalten werden, dass insbesondere ECDIS allgemein eine große Vielfalt von Funktionen zur Verfügung stellt. Vermutlich werden aber gerade aufgrund dieser Funktionsfülle im Notfall erforderliche Menüs nicht immer schnell und sicher gefunden.

Einige weiterentwickelte Navigationssysteme ermöglichen auch die Anzeige von Suchmustern. Jedoch wird diese Funktionalität erst später benötigt, falls die Sofortmaßnahmen zum Auffinden der Person erfolglos geblieben sind.

Die Berücksichtigung externer Faktoren wie zum Beispiel der Einfluss des Windes auf den zu erwartenden Bahnverlauf eines Schiffes kann aber noch immer nur mittels Abschätzung durch den wachhabenden Offizier erfolgen. Computerbasierte Unterstützung ist dafür in der Regel nicht verfügbar, obwohl sie gerade in Notfällen am dringendsten erforderlich wäre.

Integrierte Navigations- und Brückensysteme, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln, besitzen ein großes Potenzial um Manöverinformationen und -empfehlungen situationsangepasst, das heißt den aktuellen Schiffszustand und die aktuellen Umweltbedingungen berücksichtigen, bereitzustellen. Entsprechende Funktionen werden aber bisher noch nicht angeboten.

4. Integration neuer Technologien zur situationsabhängigen Manöverberatung

4.1 Automatische Erkennung einer über Bord fallenden Person

Zur automatischen und möglichst unmittelbaren Erkennung einer über Bord fallenden Person wurden auf der Basis umfangreicher Detailanalysen von Fallstudien die technisch-funktionellen Anforderungen an ein automatisches Detektionssystem abgeleitet und generisch beschrieben.

Daraus ergab sich u.a., dass ein geeignetes Detektionssystem kontinuierlich ohne jegliche Unterbrechung am Tag und bei Nacht unter allen meteorologischen Bedingungen in Betrieb und funktionsfähig sein muss. Das erfordert insbesondere die Unempfindlichkeit gegenüber den Schiffsschwingungen und den Vibrationen des Schiffskörpers. Weiterhin muss ein solches System robust gegen störende Strahlungen (Radiowellen, Radar u.Ä.) sein. Als wichtigste Grundvoraussetzung muss ein solches Detektionssystem jedoch zuverlässig zwischen Menschen und Objekten unterscheiden können und schließlich auch durch Schiffspassagiere akzeptiert sowie unter ökonomischen Aspekten vertretbar und sinnvoll sein. Hinsichtlich der operationellen Aspekte sollten die leichte Installation und der möglichst wartungsfreie Betrieb im Vordergrund stehen.

Vom Kooperationspartner Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit (ISV) wurden aufbauend auf der Anforderungsdefinition weiterführend verschiedene technische Lösungsansätze zur automatischen Erkennung über Bord fallender Personen betrachtet, in Laborversuchen und bei Feldtests an Bord von Fährschiffen (siehe folgende Abbildung) getestet und hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung für den Einsatz unter realen Bedingungen bewertet.

Im Rahmen aufwändiger und umfangreicher experimenteller Versuchsreihen wurde als aussichtsreichstes Verfahren schließlich die optische Erkennung mittels qualitativ hochwertiger Infrarot-Kameratechnik gekoppelt mit einer entsprechender Analyse-Software identifiziert.

Neben der Kalibrierung der Kameratechnik, die auf definierte Überwachungszonen entlang der Schiffsaußenwände fokussiert sowie auf erwartete Objektgrößen zu justieren ist, musste die Analyse-Software ebenfalls in ihrem Antwortverhalten schrittweise an die Aufgabenstellung adaptiert werden.

Bei mehreren Versuchsreihen, die insbesondere unter realen Bedingungen an Bord erfolgreich durchgeführt wurden, war schließlich nach entsprechenden experimentell vorgenommenen Konfigurationen eine Echtlalarmrate bei der Erkennung über Bord fallender Personen von 95 % möglich. Darüber hinaus konnte außerdem als ein sehr positives Ergebnis der Versuchsreihen eine hundertprozentige Unterdrückung von Fehlalarmen erreicht werden.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein substantieller Beitrag zum schnelleren und zuverlässigeren Erkennen eines solchen Unfalls und damit zur Erreichung des Gesamtprojektziels geleistet.

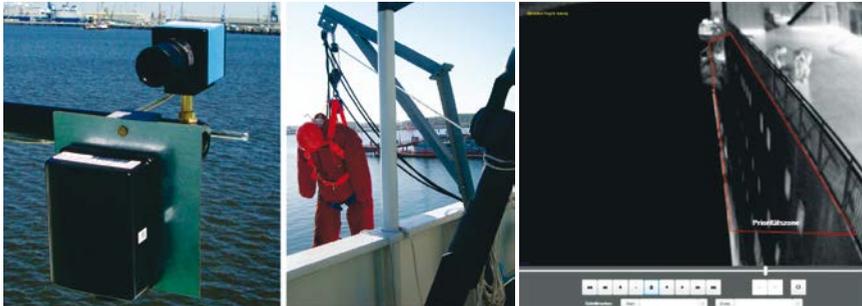


Abbildung 1: Aufbau Versuchsanordnung zur Evaluierung der Detektionsverfahren (links: Messinstrumente IR-Kamera und Radar; Mitte: Versuchsträger, rechts: Darstellung einer Prioritätszone zur Kameraüberwachung)

4.2 Situationsspezifische Manöverhilfe durch dynamisches Brückenposter und elektronisches Manöverhandbuch

Durch die erwähnte e-Navigation Initiative werden wichtige Voraussetzung für die erweiterte und verbesserte sensorische Erfassung aktueller Umgebungs- und Zustandsdaten geschaffen. Im Rahmen von ADOPTMAN wurde darauf aufbauend ein erstes Konzept für ein dynamisches (e-)Wheelhouse Poster sowie eines elektronischen Manöverhandbuches (e-Manoeuvring Booklet) entwickelt und vorgeschlagen.

Dabei sollen durch die Anwendung von verbesserter integrierter Simulationstechnologie die im aktuellen Seegebiet oder Schiffsrevier herrschenden Umweltbedingungen mit dem aktuellen hydrodynamischen Verhalten des Schiffes verknüpft und aktuelle situationsspezifische Manövriekennwerte für Drehkreisparameter, Auslauf- und Stopfstrecken sowie für alle Rückführmanöver elektronisch zur Verfügung gestellt und (idealerweise direkt in einem ECDIS-basierten Display) angezeigt werden. In dieser Weise könnte erforderlichenfalls dem Lotsen vor Ein- und Auslaufmanövern jeweils auch ein aktueller Brückenposter-Ausdruck zur Verfügung gestellt bzw. auf seine „Portable Pilot Unit“ gespielt werden.

Das entworfene Konzept ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Man verwendet die Daten der verschiedenen Umwelteinflüsse in Kombination mit dem aktuellen Schiffstatus und weiteren Informationen, welche z.B. über VDR oder ECDIS verfügbar sind, und integriert ein Berechnungsmodul (in Abb. 2 Fast-Time-Simulation-Modul) zur Vorhersage zukünftiger Zustände.

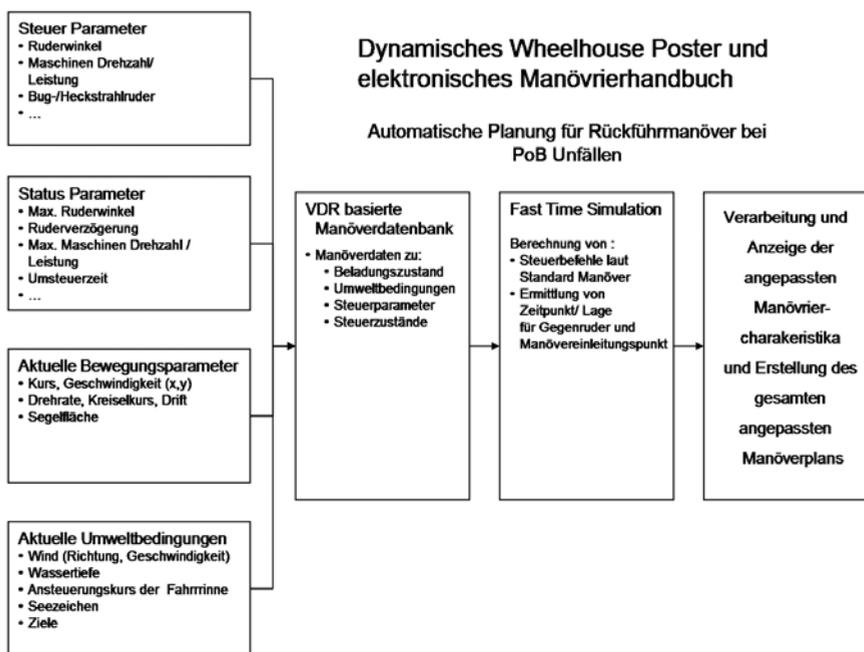


Abbildung 2: Konzeptioneller Ansatz zur Bereitstellung von situationsabhängigen Manöverinformationen in einem dynamischen Wheelhouse Poster

Bei einer PoB-Situation sollte das vorgeschriebene Wheelhouse Poster Informationen über Rückführmanöver enthalten. Bei den im Rahmen von ADOPT-MAN angestellten Feldstudien an Bord und erhobenen Stichproben zeigte sich, dass die in den Brückenpostern enthaltenen Informationen in den meisten Fällen unvollständig bzw. nur teilweise in den Manövrierhandbüchern aufgeführt sind. Dies gilt auch für die geforderten Manöververläufe für beladene und unbeladene Schiffe sowie in Flach- und Tiefwasser. Mit dem vorgeschlagenen e-Wheelhouseposter und der integrierten Berechnung mittels Fast-Time-Simulation (FTS) könnte dieses Defizit komplett überwunden werden.

Bei der FTS wird mittels Bewegungsgleichungen die Schiffsdynamik modelliert, in dem die Kräfte und Momente sowie die Effekte der Massenträgheit beschrieben werden. Zusätzliche Gleichungen sind für das Maschinenmodell und weitere Tabellen für die Repräsentation von automatisierten Systemen vorgesehen. In jeder Sekunde wird eine Lösung für das Gleichungssystem neu berechnet (detaillierte Beschreibung siehe u. a. Benedict et. al. (2010)).

Die Eingangsdaten für das Simulationsmodul können aus Steuerkommandos, Umweltzuständen und dem aktuellen Schiffsstatus bestehen. Die Ergebnisse des Simulationsmoduls werden gespeichert oder direkt über das dynamische Wheelhouse Poster bzw. andere geeignete Medien ausgegeben.

Das Modul kann zur Berechnung von spezifizierten und/oder geplanten Bahnvorhersagen verwendet werden. In dieser Weise kann das Simulationstool zur Planung und Optimierung der Rückführmanöver und zur automatischen Erzeugung situationsangepasster Manöverpläne genutzt werden.

5. Generierung situationsabhängiger Manöverpläne für Rückführmanöver

Die Arbeiten zur Entwicklung und zum Test eines geeigneten Algorithmus zur automatischen Generierung situationsangepasster Manöverpläne wurden vom Projektteam an der World Maritime University in enger Kooperation mit dem Institut für Innovative Schiffs-Simulation und Maritime Systeme der Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt Warnemünde durchgeführt.

Das Ziel der auf Simulation basierten Manöverplanung und -optimierung ist es, die geeignetste zeitoptimale Steuersequenz zur Erreichung des Manöverziels zu gewinnen. Mit der Steuersequenz soll das Manöverziel unter den aktuellen oder in einer zu erwartenden Situation des Schiffsbetriebes erreicht werden. Das wichtigste dabei zu lösende Problem ist die Vielfalt der Möglichkeiten, den Manöververlauf zu beeinflussen. In ADOPTMAN wurde dieses Problem durch die Entwicklung von Datenbanken mit den Standardsteuersequenzen der Rückführmanöver gelöst. Damit kann der Lösungsraum, in dem die optimale situationsadaptierte Steuersequenz zu finden ist, geeignet eingeschränkt und in Echtzeit eine Lösung generiert werden. Dies erfolgt durch den Einsatz der Fast Time Simulation, mittels derer werden verschiedene Manövervarianten berechnet und abgespeichert, und schließlich die optimale, an die Situation angepasste Steuersequenz für das Rückführmanöver ermittelt. Nachfolgend wird zur Darstellung des entwickelten und implementierten Verfahrens beispielhaft die Planung eines Scharnow-Turns beschrieben.

Ziel des Scharnow-Turn Manövers ist die schnellstmögliche Rückführung des Schiffes mit Gegenkurs auf die Ausgangsbahn bei möglichst geringem seitlichem Versatz. In der praktischen Umsetzung wird das Schiff zuerst auf einen Drehkreis gebracht, um nach einer erfolgten Kursänderung von etwa 240° Gegenruder zu legen. Das Schiff dreht dadurch mit einem gewissen seitlichen Versatz auf den Gegenkurs. Der Modellablauf des Manövers ist in der Abbildung 3 dargestellt. Der im Projekt entwickelte Algorithmus zur Adaption der Standardmanöverfolge an die aktuelle Situation bestimmt in der ersten Stufe zunächst die Größe der Kursänderung, bei der das erste Gegenruderlegen erfolgen muss.

Die Variation kann dabei von 210° bis 280° gegenüber dem Ausgangskurs reichen. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Bestimmung des zweiten Gegenrudermanövers zum Einschwingen auf die Ausgangsbahn mit entgegengesetztem Kurs. Der Einfluss externer Störgrößen, wie z.B. Wind (für die

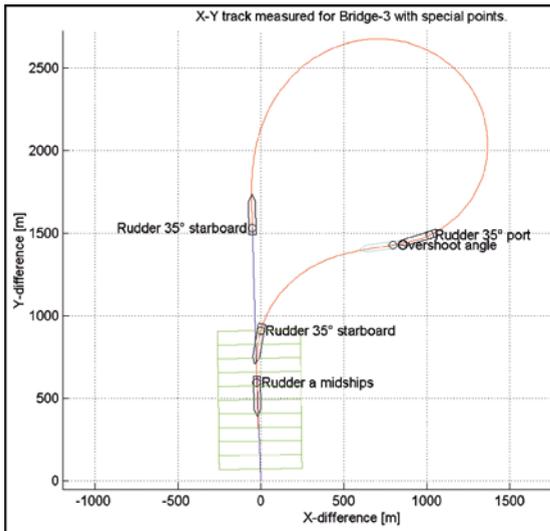


Abbildung 3:
Referenzdarstellung des
Scharnow-Turns

Standardsteuersequenz des Scharnow-Turns beispielhaft dargestellt in Abbildung 4) und aller weiteren Einflussgrößen, wie Wassertiefe, Ausgangsgeschwindigkeit, Beladungszustand usw. erfolgt in den Berechnungen des FTS-Moduls.

Damit wird deutlich, dass die Anpassung des Manöverplans für jede einzelne der möglichen Parameteränderungen durchgeführt werden muss. In der entwickelten Lösung wurde zur Generierung der angepassten Manöversequenzen ein Verfahren gewählt, bei dem ausgehend von der Standard-Steuersequenz ein multikriterieller Optimierungsalgorithmus zur segmentweisen Bestimmung der Manöver-Stellgrößen und des dazugehörigen Zeitpunktes genutzt wird. Der Algorithmus ist so angelegt, dass darin die optimale Vorauspeilung für das Legen des Gegenruders ermittelt wird. Als Abbruchbedingungen gelten, dass der seitliche Versatz auf maximal 10 m reduziert wird und der resultierende Vorkurs höchstens 2° vom berechneten Kurs des

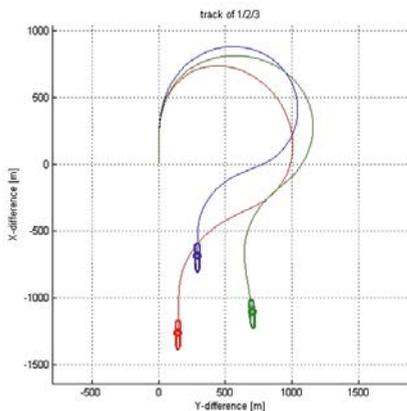


Abbildung 4: Darstellung des Windinflusses, 4600 TEU Containerschiff bei keinem Wind (blau), Bft 6 aus Nord (rot) und Bft 6 aus Nordwest (grün)

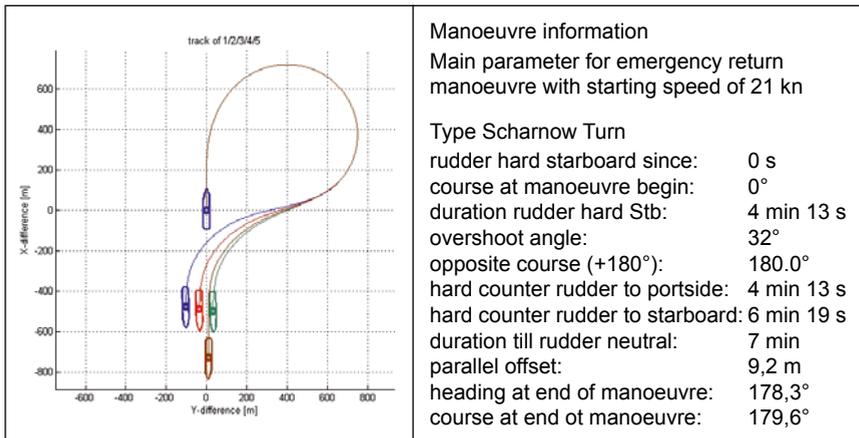


Abbildung 5: Optimierung eines Rückführmanövers (links), sowie die dazu gehörigen Manöverdetails (Tabelle rechts)

Rückführmanövers abweicht. Die vom Algorithmus generierte Lösung ist im Diagramm in Abb. 5 rotbraun dargestellt (die weiteren Bahn- und Schiffskon-turen (blau, rot, grün) repräsentieren vom Algorithmus generierte Zwischen-lösungen). Die Steuersequenz der optimalen Sequenz ist zusätzlich tabella-risch aufbereitet.

Die im Teilprojekt der World Maritime University entwickelten und getesteten Algorithmen zur Auswahl und Adaption der situationsbezogenen günstigsten Manövervariante wurde schließlich exemplarisch in ein Beratungsmodul mit Darstellung eines adaptierten Manöverplanes in einer ECDIS-Um-ggebung implementiert. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen Ergebnisse der



Abbildung 6: Anzeige eines vorgeplanten und an die aktuelle Situation ange-passten Williamson-Turn zur Rückführung bei einem simulierten PoB-Unfall

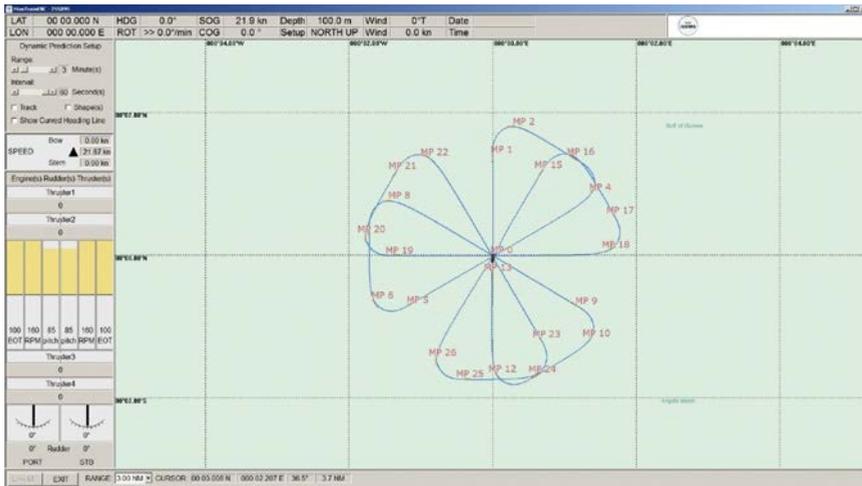


Abbildung 7: Anzeige der vorgeplanten und an die aktuelle Situation angepassten Kursänderungsmanöver für eine simulierte Suche nach einem PoB-Unfall

in Simulationstests verwendeten Lösungen für eine Simulationsübung zum PoB-Unfall bzw. einer Simulationsaufgabe zur Such-und Rettung von Personen.

Mit der Realisierung der Implementierung und der erfolgreich in den Schiffs-führungssimulatoren im MSCW und bei SSPA in Göteborg getesteten Appli-kation eines Manöverberatungsmoduls wurde eine wichtige Voraussetzung zur Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit bei Personen-über-Bord-Unfällen erreicht. Die Anwendung in der kommerziellen Schifffahrt muss gleichwohl durch weitere u.a. legislative Maßnahmen, z.B. der IMO, unter-stützt werden.

Andererseits kann die Anwendung des Moduls durch Trainings- und Lern-system gezielt unterstützt und befördert werden. Der im Rahmen des Projek-tes entwickelte Lösungsansatz wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

6. Trainingslösung für die Besatzung

Für die Demonstration des Manöver – Unterstützungssystems wurde eine eLearning – Lösung als Basis für die Implementierung eines Demonstrators zur Unterstützung der Planung und Umsetzung der entwickelten Manöverstrategien in Notsituationen genutzt, wobei die Ergebnisse auf einem Workshop des Projektteams durch die Fa. MarineSoft den Partnern vorgestellt wurden.

So wurden am 24.04.2013 im Rahmen eines gemeinsamen Workshops an Bord der Fähre „STENA GERMANICA“ die im Rahmen von ADOPTMAN als Demonstrator zu implementierenden Inhalte vorgestellt.

Als Basis für den Demonstrator des Trainingsprogramms wurde die nachfolgende, gemeinsam unter den Partner abgestimmte Modul-Struktur angewendet:

- Modul 1: Ursachen und Einflussfaktoren sowie Basisinformationen zu Schiffssicherheit und einem Seenotfall
- Modul 2: Verhalten im eigenen Seenotfall und Maßnahmen zur Eigenrettung sowie die Evakuierung/Fremdrettung bei eigenem Seenotfall
- Modul 3: Person über Bord einschließlich der Situationsbewertung
- Modul 4: Fremdrettung und Ablauf einer SAR-Aktion
- Modul 5: Nutzung eines rechnergestützten Assistenzsystems als Werkzeug für eine effektive Planung, Simulation und Überwachung des SAR-Prozesses



Abbildung 8: Startseite des Demonstrators

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die erzielten Ergebnisse zur bordgestützten Generierung von situationsabhängigen und an die aktuellen Schiffs- und Umweltparameter angepassten Manöverplänen bei PoB-Unfällen zeigen, dass ein großes Potenzial zur Verbesserung der operativen Sicherheit der Schiffsführung besteht und erschlossen werden kann. Der entwickelte eLearning-Demonstrator kann die leichte Handhabung und die zuverlässige Anwendung des Beratungsmoduls gezielt unterstützen. Dabei kann durch den Einsatz des entwickelten Beratungssystems bereits ohne Vorliegen einer IMO-Ausrüstungspflicht ein Beitrag zur Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit bei Personen-über-Bord-Unfällen erbracht werden.

Es wurde gezeigt, dass der Einsatz von modernerameratechnik mit Bilderkennungssoftware die lebenswichtige sofortige Alarmierung bei einem PoB-Unfall ermöglicht.

Die bisherigen statischen Dokumentationen wie z.B. Brückenposter sind z.T. unvollständig und für die schnelle situationsabhängige Nutzung und Anwendung ungeeignet.

Aus diesem Grund wird die Einführung eines dynamischen Wheelhouse Posters sowie eines elektronischen Manöverhandbuchs empfohlen, die den wachhabenden Schiffsoffizier mit aktuellen Informationen entsprechend der umweltabhängigen Manövriercharakteristik seines Schiffes versorgt. Ein Lösungskonzept wurde entwickelt und beschrieben und in diesem Beitrag beispielhaft auf die Unterstützung bei Person-über-Bord Manövern angewendet und detailliert diskutiert.

Kernelement der technischen Umsetzung ist die innovative Applikation der Fast-Time-Simulation Technologie, die darauf ausgerichtet ist, unter Berücksichtigung des aktuellen Schiffszustandes, ebenso wie der Umweltparameter, spezifische Manöververläufe schneller als in Echtzeit zu berechnen. Eine dieser Nutzungsmöglichkeiten ist die Generierung optimaler Manöverpläne und Sequenzen für Rückführmanöver.

Schwerpunkt zukünftiger weiterführender Untersuchungen wird die Verbesserung und Validierung der Darstellung der simulierten Bahnverläufe zur Entscheidungsunterstützung und Manöverüberwachung u. a. mit Hilfe von ECDIS sein. Dazu werden Untersuchungen erforderlich sein, die insbesondere die Bedeutung des menschlichen Verhaltens berücksichtigen und sich mit dem Nutzerorientierten Design der Mensch-Maschine-Schnittstelle beschäftigen. Zudem ist zu untersuchen, inwieweit das Konzept für weitere Anwendungsfälle angewendet werden kann.

8. Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des deutsch-schwedischen FuE-Projektes ADOPTMAN durchgeführt. Es ist Bestandteil des MARTEC Programms der Europäischen Union. Die Projektausführung in Deutschland wurde durch das BMWi gefördert und durch den Projektträger Jülich (PTJ) betreut. Die Arbeiten der Projektpartner in Schweden wurden durch das schwedische Institut für Innovationen „VINNOVA“ begleitet.

Die Projektpartner bedanken sich insbesondere bei der schwedischen Reederei StenaLine A.S. und der Deutsch-dänischen Fährreederei Scandlines welche die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Projektes mit ihrer Expertise und vor allem durch die Bereitstellung ihrer zwischen Schweden und Deutschland verkehrenden Fährschiffe unterstützten und damit maßgeblich zum Gesamterfolg des Projektes beitrugen.

Literatur

- Baldauf M., Klaes S., Benedict K., Fischer S., Gluch M., Kirchhoff M., Schaub M.: (2012) Application of e-Navigation for Ship Operation Support in Emergency and Routine Situations. *European Journal of Navigation*; (2012), Volume 10 (2): 4-13.
- Baldauf, M.; Benedict, K.; Fischer, S.; Gluch, M.; Kirchhoff, M.; Meißner, D.; Fielitz, U.; Klaes, S.; Schröder-Hinrichs, J.-U.; Wilske, E. (2011) e-Navigation and situation dependent manoeuvring assistance to enhance maritime emergency response. *WMU Journal of Maritime Affairs*, Springer, Heidelberg, – October 2011, Vol. 10 (2): 209-226
- Baldauf, M.; K Benedict, S Fischer, F Motz, & J-U Schröder-Hinrichs. (2011). Collision avoidance systems in air and maritime traffic. *Journal of Risk & Reliability*, August 2011, Vol. 225(3): 333-345 Sage publications, London
- Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Schaub M., Baldauf M. & Klaes. S. (2013): Advanced Ship Handling Using Simulation Augmented Manoeuvring Design & Monitoring – a New Method for Increasing Safety & Efficiency. in A. Weintrit (ed.) *Marine Navigation & Safety of Sea Transportation. Advances in Marine Navigation*. pp. 105-113, CRC Press.
- Benedict K., Baldauf M., Fischer S., Gluch M., Kirchhoff M. (2009) Manoeuvring Prediction Display for Effective Ship Operation On-Board Ships and for Training in Ship Handling Simulators. *IAMU 10th Assembly & Conference 2009 St. Petersburg / Russia at AMSMA*, 19 – 21 Sep. 2009

- Benedict, K.; Kirchhoff, M.; Baldauf, M.; Gluch, M.; Fischer, S. (2007). Concept for Onboard Prediction Displays based on actual Ship Condition and Manoeuvring Simulation for Navigation and Shiphandling. Conference Proceedings IMSF Conference 2007, Busan / Korea
- Hahne, J. (Hrsg.): Handbuch Schiffssicherheit, (2. komplett überarbeitete Auflage), Seehafen Verlag Hamburg 2012 ISBN 978-3877438329
- IMO 2007. Revised performance standards for integrated navigation systems (INS). MSC.252(83). London: International Maritime Organization.
- IMO 2009. Development of Model Procedure for Executing shipboard Emergency Measures. STW 41/12/3. London: International Maritime Organization.
- Kucharzewski, H.; Burg, J.; Clauss, G.F.; Kauffledt, A.; Otten, N.; Sedlacek, D.; Fielitz, U.; Bronsart, R.; Buch, T.; Haase, M.; Ihde, E.; Krüger, A.; Kurowski, M.; Lampe, B.P.; Neubert, S.; Stoll, R.; Wulff, M.; Sichertmann, W.; Richard, T.: AGaPas – Autonome Galileo-gestützte Personenrettung auf See: Schriftenreihe Projektträger Jülich, Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik, Tagungsband 2011, p. 159-194; ISBN 978-3-89336-745-0
- Lloyd, M. (2007). Man overboard. 1: Preparation. Seaways (2007) April, pp. 22-24; 2: Executing the plan. Seaways (2007) May, pp. 27-28
- Patraiko, D., Wake, P., & Weintrit, A. (2010). e-Navigation and the Human Element. TransNav. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.4, Issue 1, 11-16.

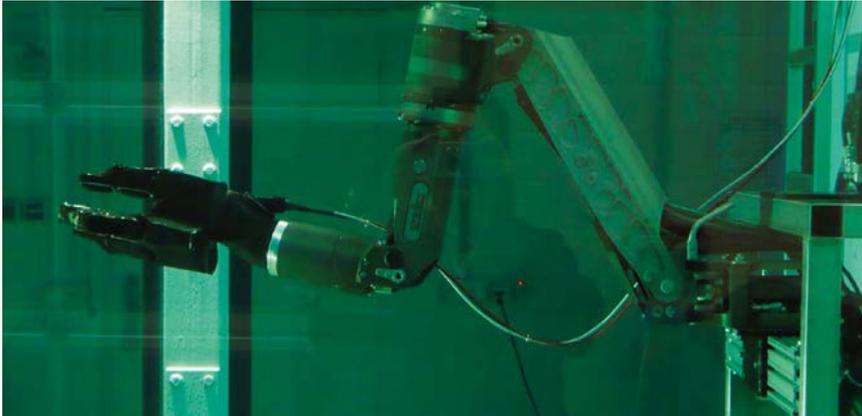


Abbildung 1: Das SeeGrip Greifersystem am Orion 7P

SeeGrip – Ein Greifersystem mit Tastgefühl für die Tiefsee

Peter Kampmann, Frank Kirchner

Einleitung

Hydraulisch aktuierte Tiefseemanipulatoren können eine beachtliche Kraft über ihre Greiferbacken ausüben. Bis zu 5.000N sind hier keine Seltenheit. Informationen zur aufgebrachtten Greifkraft werden jedoch selten an den Operator zurück übermittelt. An dieser Stelle setzt das Vorhaben SeeGrip an. Ziel des Projektes war es, ein Greifersystem mit taktilem Feedback für die Tiefsee zu realisieren und eine Krafrückkopplung für den Operator zur Verfügung zu stellen. Als Tiefseeumgebung definieren wir im Rahmen dieses Projekts Tiefen von mindestens 1.000m. Erfolgreich getestet wurde das System unter Druckumgebungen die Tiefen von bis zu 6.000m entsprechen. Die wissenschaftliche Herausforderung dieses Vorhabens umfasste folgende Punkte, auf deren Bewältigung in den folgenden Kapiteln eingegangen wird:

- Konzeption der Greifermorphologie, Wahl der Aktorik und Integration in die Greiferstruktur
- Wahl geeigneter Kraftsensorik für die Druckbedingungen in der Tiefsee
- Entwicklung von druckneutralen elektronischen Komponenten für das Greifersystem

Die Greifermorphologie

Die Form des entwickelten Greifers richtet sich nach der jeweiligen Aufgabe, die das Greifersystem bewältigen soll. Eine Spezialisierung für eine bestimmte Handhabungsaufgabe wurde hier nicht angestrebt, da die Entwicklung eines taktilen Sensorsystems nur für diesen Anwendungsfall nutzbar wäre. Vielmehr sollte hier ein möglichst universelles Greifwerkzeug entwickelt werden. Betrachtet man die Aufgaben, die typischerweise bei Einsätzen von Tiefseemanipulatoren anfallen, so ist auch hier erkennbar, dass auch die bisherigen Werkzeuge universell eingesetzt werden:

- Verwendung von Werkzeugen
- Betätigen von Hebeln und Knöpfen
- Stecken von Steckern
- Öffnen von Boxen und Türen sowie Transportbeuteln
- Einsammeln von wissenschaftlichem Material
- Auslegen und Einrollen von Kabeln
- Transport von Gegenständen

Herkömmliche Zweibackengreifer geraten jedoch bei dieser Vielseitigkeit an ihre Grenzen, weshalb für die eine oder andere Aufgabe Spezialwerkzeuge genutzt werden.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über mögliche Greiftechniken mit steigender Anzahl an Fingern. Erkennbar ist hier, dass der größte Nutzen von der

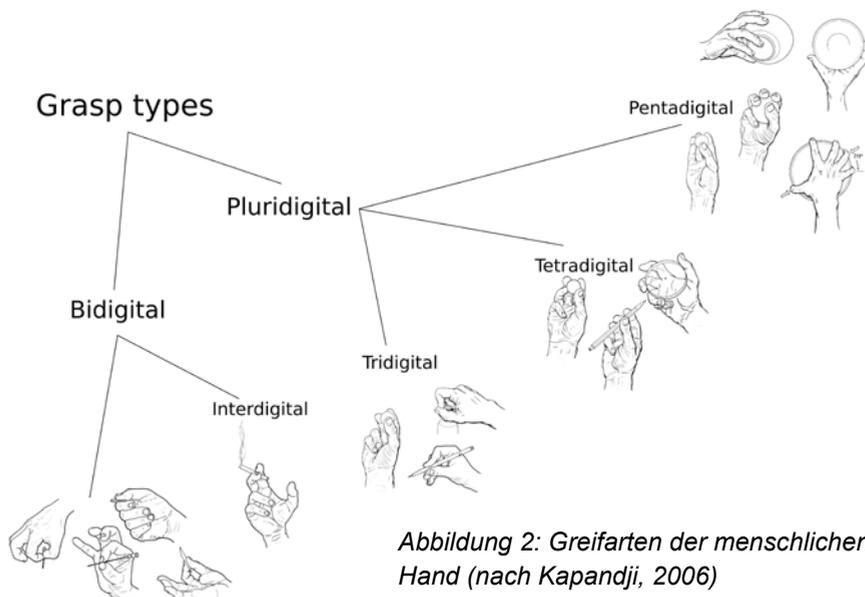


Abbildung 2: Greifarten der menschlichen Hand (nach Kapandji, 2006)

Menge durchführbarer Greitechniken gegenüber der Komplexität des Greifers bei einem Dreifinger-System gegeben ist. Nicht ohne Grund sind viele Industriegreifer genau auf dieser Fingerzahl ausgelegt.

Ein weiterer Parameter ist die Anzahl an Fingerelemente pro Finger des Systems. Hier spielen die verschiedenen Greiftechniken Formschluss und Kraftschluss eine entscheidende Rolle. Bei kraftschlüssigem Greifen ist wie bei einem Zweibackengreifer eine parallele Anordnung eines einzelnen Greiferelementes ausreichend. Zu greifende Objekte werden durch die aufgewendete Greifkraft im Greifer gehalten. Dieses Vorgehen ist zwar hinsichtlich mechanischer Komplexität und Greifstabilität recht effektiv, jedoch besteht die Gefahr einer Beschädigung des gegriffenen Objektes durch zu hohe Greifkräfte. Im Gegensatz dazu steht das so genannte formschlüssige Greifen. Hier wird durch eine Menge an Fingerelementen eine Anpassung der Form des Fingers an die Objektstruktur ermöglicht. Durch diese Anpassung kann das zu greifende Objekt mit deutlich geringerem Kraftaufwand gehalten werden. Für die universelle Handhabung kraftempfindlicher Objekte wäre daher ein Finger mit möglichst vielen Fingerelementen wünschenswert. Ein solches System wäre mechanisch komplex und nicht robust genug für realistische Einsatzzwecke. Im Rahmen des Projekts wurden daher zwei Fingerelemente pro Finger entwickelt.

Krafteinleitung

Um die Kompatibilität des Greifersystems mit herkömmlichen Unterwasser-Manipulatoren zu gewährleisten und die Nutzung des Greifersystems zu vereinfachen, wurde als Aktuationsprinzip die hydraulische Krafteinleitung gewählt. Die meisten Tiefseemanipulatoren arbeiten hydraulisch, weshalb die dazu notwendige Versorgung auf den ROVs bereits vorhanden ist. Eine Herausforderung bei dieser Wahl ist die Integration der notwendigen Ventile in die Greiferstruktur. Abbildung 3 zeigt verschiedene Ventiltypen im maßstabgetreuen Größenvergleich zueinander. Selbst bei der Verwendung der Sub-Miniaturventile der Firma MOOG würde bei der angestrebten Menge von sieben unabhängigen Freiheitsgraden die Dimensionierung des Greifersystems deutlich von der Aktorik beeinflusst werden.

Auf diesem Grunde kommen für das System Dosierventile der Firma Gyger zum Einsatz, welche ursprünglich für die Biotechnologie zur Dosierung auf Nanoliterebene konzipiert wurden. Insgesamt befinden sich 24 Ventile zur Aktuierung im Greifersystem. Mit diesen Ventilen konnte das System so ausgelegt werden, dass eine Nachgiebigkeit des Systems in der Fingerstruktur realisiert werden konnte. Hierdurch erhöht sich die Robustheit des Systems gegenüber Kollisionen und schützt zudem gegriffene Objekte von zu hohen aufgebrauchten Greifkräften.

Für weitere Details bezüglich der Aktuierung der Greifer sei der interessierte Leser an (Johannes Lemburg, 2011) verwiesen.

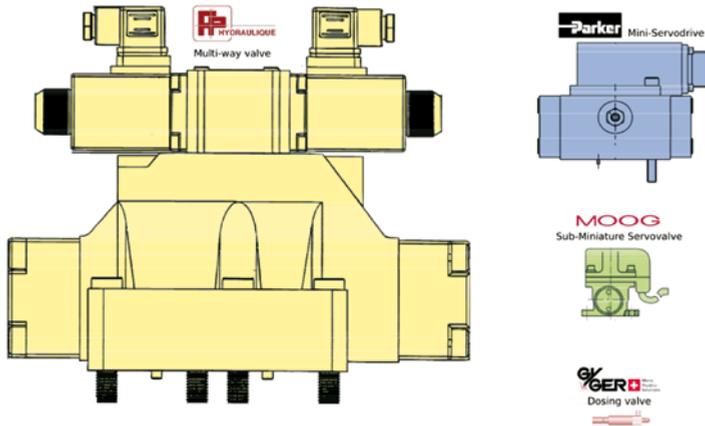


Abbildung 3: Herkömmliche Hydraulikventile und deren relativen Größen zueinander

Taktile Sensorik für die Tiefsee

Mit jedem Meter Tiefe den ein System abtaucht, steigt der Umgebungsdruck auf die Komponenten Systems und übt damit eine Kraft auf die einzelnen Elemente aus. Taktile Sensorelemente werden in robotische Strukturen integriert, um einwirkende Kräfte durch Objekthandhabungsvorgänge zu erfassen. Eine Unterscheidung dieser beiden unterschiedlichen Kraftquellen ist jedoch mit vielen Sensormessprinzipien nicht möglich. Kapazitive oder viele piezoresistive Messaufbauten werden ebenso durch den Umgebungsdruck komprimiert wie durch eine Kraftbeaufschlagung durch Kontakt. Ein taktiles Mess-System für die Tiefsee sollte jedoch auch in großen Tiefen noch empfindlich genug reagieren können, um feinste Kräfteinwirkungen aufnehmen zu können. Bei einem Messprinzip, welches bereits den Umgebungsdruck aufnimmt ist hierzu jedoch nicht mehr in der Lage.

Aus diesem Grunde sind Messprinzipien auszuwählen, die mit einer relativen Kraftmessung arbeiten. Zusätzlich ist ein einzelnes Messprinzip nicht ausreichend, um die verschiedenen Arten von Kräfteinwirkungen zu erfassen. Spezialisierte Messprinzipien sind hier auszuwählen und in die robotische Struktur zu integrieren, sodass statische, dynamische und absolute Kräfte bei Objektkontakt optimal erfasst werden können.

Tabelle zeigt die gewählten Sensoren und deren Anwendung zur Erfassung von Kräften. Die Auswahl der einzelnen

Gewählte Messprinzipien für ein taktiles Tiefseesensorsystem	
Sensortyp	Erfasste Modalität
Dehnungsmesstreifen	Statische Kräfte, Gewicht
Piezoelektrische Sensoren	Dynamische Kräfte, Rutschen und Textur
Faseroptische Sensoren	Form und Kraftverteilung

Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen werden auf Strukturen aufgeklebt oder gedruckt, die bei Krafteinwirkung sich verbiegen. Hierdurch wird die mäanderförmige Struktur des Dehnungsmessstreifens ausgelenkt und ein der Dehnung proportionale Widerstandsänderung ist messbar. Solange die einwirkende Kraft auf der Ober- und Unterseite der Struktur gleich bleibt, wird diese nicht ausgelenkt. Aus diesem Grund bewirkt der Umgebungsdruck durch die Wassersäule keinen Sensorauschlag, das Messprinzip ist daher als Sensor für die Tiefsee einsetzbar. In verschiedenen Anwendungen wie Unterwasserkraftmessdosen wird dies bereits getan (Sylvain Lemieux, 2006).

Piezelektrische Sensoren

Piezelektrische Sensoren erzeugen eine Ausgangsspannung, welche durch die Entstehung eines Dipols innerhalb der Kristallgitterstruktur des piezelektrischen Materials bei dynamischer Krafteinwirkung entsteht. Wie bei Dehnungsmessstreifen befindet sich das Sensormaterial in einem Gleichgewichtszustand solange die umgebende Kraft von allen Seiten gleich ist. Dies ist durch den Druck der Wassersäule gegeben, wodurch sich auch dieses System für den Tiefseeinsatz eignet. Gängige heutige Anwendungen sind Sonare und Bottom-Pressure-Recorder.

Faseroptische Sensoren

Dieses Messprinzip misst die Deformation eines offenporigen Schaums bei Krafteinwirkung. Hier werden in eine Trägerplatte jeweils zwei polymeroptische Fasern als Sensorelement eingebracht. Eine dieser Fasern leitet Licht in den darüberliegenden Schaum ein. Das Licht wird innerhalb des Schaums in den Hohlräumen reflektiert und an die zweite Faser zurückgeworfen. Diese Faser leitet das Licht weiter an ein CMOS Phototransistorfeld, welches die Intensität des eingekoppelten Lichts erfasst. Je nach Kompression des Schaums verringert sich die Fläche, in die das in den Schaum eingeleitete Licht reflektiert. Hieraus resultiert eine stärkere Lichteinkopplung an der messenden Faser. Abbildung 4 stellt dieses Messverfahren schematisch dar.

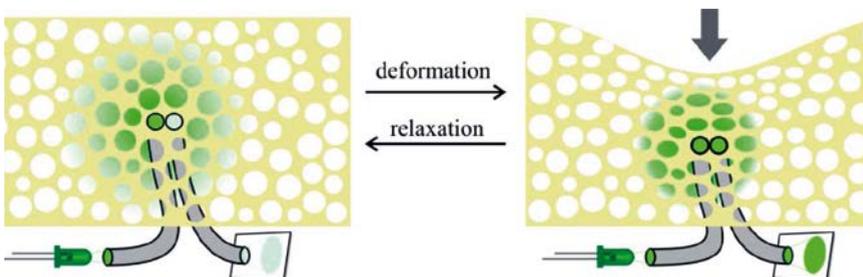


Abbildung 4: Funktionsprinzip des faseroptischen Messprinzips

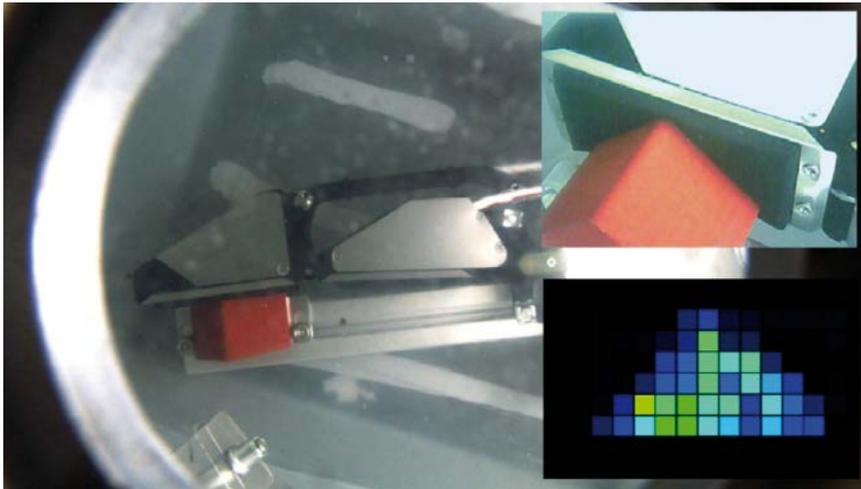


Abbildung 5: Funktionstest des faseroptischen Messprinzips bei 600 bar Umgebungsdruck

Durch dieses Prinzip kann die einwirkende Kraft auf den Schaum gemessen werden. Mit einem Feld von Sensorpunkten kann so die Kontaktfläche des Schaums mit Objekten erfasst werden, wodurch ein Sensorfeld zur Erfassung von Objektgeometrien und Kraftverteilungen realisiert wird.

Dieses Messprinzip ist zuvor nicht unter Tiefseebedingungen zum Einsatz gekommen, zeigt aber viele Eigenschaften, die es für einen Einsatz geeignet erscheinen lassen. Durch den offenporigen Schaum können unter hohem Umgebungsdruck Flüssigkeiten ungehindert fließen, ohne die Hohlräume des Schaumes zu komprimieren und dadurch ein Sensorsignal zu erzeugen. Dadurch, dass das zur Kompression des Schaumes proportionale Heligkeitsignal über Polymerfasern übertragen wird, kann zudem die Elektronik weit entfernt von der eigentlichen Signalquelle liegen. Hierdurch sind geeignete Konzepte zur Abschirmung der Elektronik vor Umgebungsdruck und Wasserkontakt möglich.

Im Rahmen des Projektes wurde die Eignung des Sensorprinzips für einen Einsatz in der Tiefsee untersucht. In der am DFKI im Rahmen des Projektes angeschafften Druckkammer können elektronische Komponenten bis 600 bar während des Betriebs getestet werden.

Abbildung 5 zeigt den Testaufbau der Sensorik aus Sicht der Überwachungskamera im Deckel der Druckkammer bei einem Druck von 600 bar. Die faseroptische Sensorik ist im oberen Fingerelement integriert und vor Fremdlicht durch eine schwarze Schutzhaut geschützt. Das erhaltene Sensorsignal (in der Abbildung unten rechts dargestellt) zeigt die dreieckige

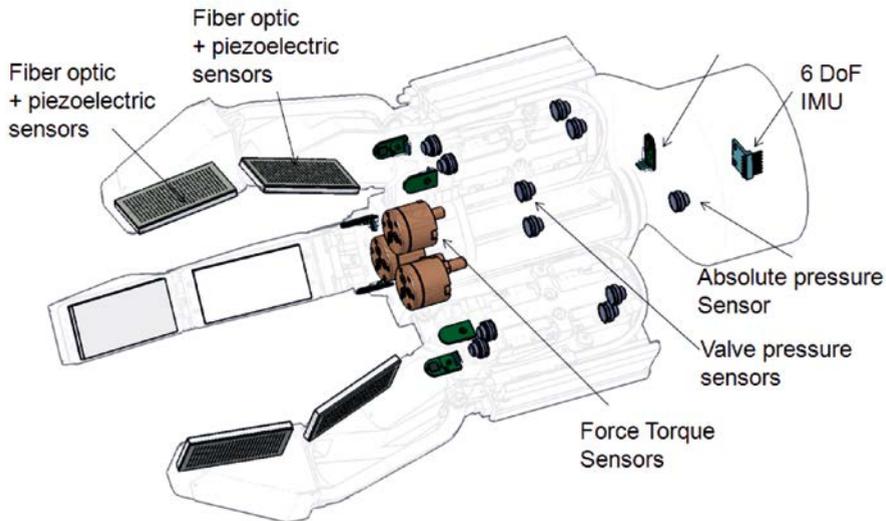


Abbildung 6: Sensoranordnung innerhalb des SeeGrip Greifersystems

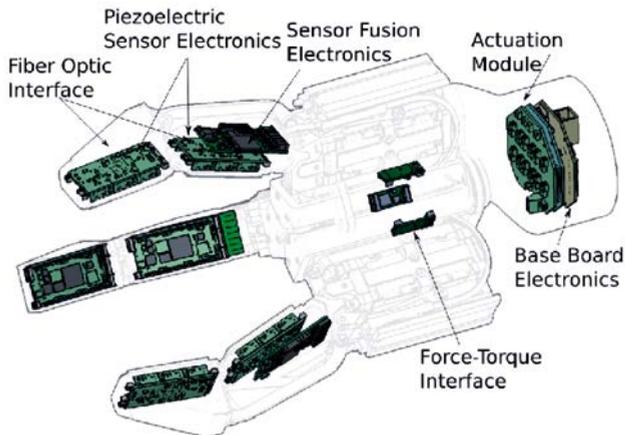
Struktur des Testkörpers. Die unterschiedlichen Farbwerte im Sensorausgabebild resultieren aus unterschiedlichem Anpressdruck und der Inhomogenität des Schaummaterials. Weitere Versuche zur Langzeitstabilität und Wiederholgenauigkeit wurden durchgeführt, wobei beachtliche Ergebnisse mit einer Fehlerrate von unter einem Prozent erzielt wurden. Weitere Informationen zu diesen Experimenten können in (Peter Kampmann, 2012) nachgelesen werden.

Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Greifersystems und die Platzierung der unterschiedlichen Sensormodalitäten.

Druckneutrale Elektronik für das Tiefseegreifersystem

Um das Greifersystem möglichst modular und damit unabhängig von externen Komponenten zu halten, ist die Steuerung des Greifersystems zusammen mit der Ansteuerung und Auswertung der integrierten Sensorkomponenten innerhalb des Greifersystems untergebracht. Als Schnittstelle nach außen besteht lediglich eine Ethernetverbindung, eine 24V Stromversorgung sowie die Hydraulikanschlüsse. Dadurch kann das System an jeden Tiefseemaneipulatorarm mit Hydraulikversorgung angeschlossen werden. Auf Operatorseite ist lediglich eine Interfacesoftware auf einem handelsüblichen PC zu installieren.

Die im Greifersystem befindlichen elektronischen Komponenten (vgl. Abbildung 7) können jedoch auf Grund der dafür erforderlichen Baugröße nicht in druckkompensierte Kompartments untergebracht werden. Die elektronischen



*Abbildung 7:
Die Verarbeitungselektronik im See-Grip Greifer*

Komponenten müssen daher also druckneutral aufgebaut werden. Hierzu wurden während der Projektphase verschiedene Tests mit einzelnen elektronischen Bauteilen durchgeführt. Da die meisten elektrischen Komponenten des Systems auf Basis der SMD Technik gefertigt wurden, welches inhärent frei von Luftporen ist, konnten bereits viele Bauteile ohne direkte Anpassungen für ein druckkompensiertes System übernommen werden. Spezielle Bausteine wie Impulstransformatoren oder Quartz-Oszillatoren bedurften jedoch tiefergehenden Untersuchungen, um hier mittels geeigneter Arbeitsprinzipien, Einhausungstechniken oder Packagematerialien eine unter 600 bar Umgebungsdruck funktionierende Schaltung zu realisieren.

Um die Wartbarkeit des Systems zu erhöhen, wurden die einzelnen Platinen abschließend nicht mit einer Silikonschicht überzogen, die vor Wasserkontakt schützen würde. Stattdessen wurde das gesamte System mit einem biokompatiblen Öl geflutet. Weitere Informationen zu den Ergebnissen zu drucktoleranter Elektronik im Rahmen des Projektes könnten in (Peter Kampmann, 2012) nachgelesen werden.

Feinmanipulation in der Tiefsee mit bis zu 2.082 taktile Sensoren

Abbildung 8 zeigt das integrierte Greifersystem an einem Manipulatorarm der Firma Schilling Robotics. Je nach Konfiguration werden bis zu 2.082 taktile Sensorelemente ausgelesen und verarbeitet. Weitere 49 Sensoren überwachen den internen Zustand des Systems. Abbildung 9 zeigt das Greifersystem in der Druckkammer bei 600bar im Kontakt mit einem runden Testkörper. Das Sensorsignal der faseroptischen Sensoren ist in der Graphik unten rechts eingeblendet.

Mit dem entwickelten Greifersystem konnte der derzeitige Stand der Technik im Bereich Tiefseegreifer mit taktilem Feedback deutlich erweitert werden



Abbildung 8: Das SeeGrip Greifersystem während der Objekt-handhabung am Orion 7P

(vgl. hierzu (D. Lane, 1999) und (Q. Meng, 2006)). Zusammen mit der realisierten Sensordatenvorverarbeitung und High-Level Auswertung zur Realisation von autonomen Explorationsverfahren stellt das System das derzeit technisch realisierbare dar. Nach unserem Kenntnisstand stellt dieses System das erste Tiefseemanipulationssystem mit taktilem Feedback dar. In weiteren Schritten ist geplant, dass System einem Feldtest an einem Tiefseeroboter zu unterziehen. Durch den modularen Aufbau kann dabei nicht nur das Gesamtsystem sondern auch dessen Einzelkomponenten wie die Aktorik, Sensorik und Algorithmik getestet werden. Um den Übergang von einem Forschungsobjekt in die industrielle Anwendung zu beschleunigen wird derzeit an einem Greiferbackenmodul für herkömmliche Tiefseegreifer gearbeitet, welches die gewonnen Erkenntnisse in reduziertem Umfang umsetzt.

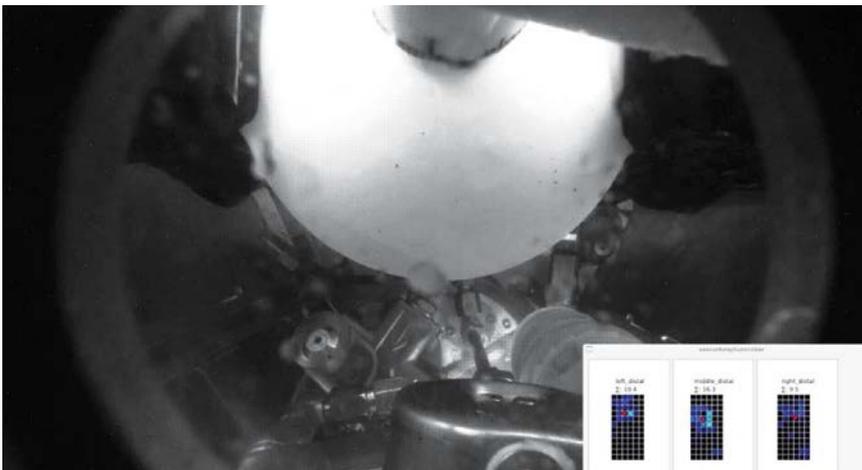


Abbildung 9: Das SeeGrip Greifersystem in der Druckkammer bei 600 bar

Literaturverzeichnis

- D. Lane J. Davies, G. Robinson, D. O'Brien, J. Sneddon, E. Seaton, A. Elfstrom The AMADEUS dextrous subsea hand: design, modeling, and sensor processing [Conference] // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1999. – pp. 96-111.
- H. Wang X. Huang, X. Qi, Q. Meng Development of Underwater Robot Hand and Its Finger Tracking Control [Konferenz] // IEEE International Conference on Automation and Logistics. – 2007.
- I.A. Kapandji J. Koebke Funktionelle Anatomie der Gelenke: Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik [Buch]. – [s.l.] : Thieme, 2006.
- Johannes Lemburg Peter Kampmann, Frank Kirchner A small-scale actuator with passive-compliance for a fine-manipulation deep-sea manipulator [Conference] // OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA Conference & Exhibition, (OCEANS-11). – Kona, Hawaii, USA : [s.n.], 2011. – p. 4.
- Peter Kampmann Frank Kirchner A Tactile Sensing System for Underwater Manipulators [Conference] // Workshop on: Advances in Tactile Sensing and Touch based Human-Robot Interaction to be held in conjunction with the 7th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2012. – Boston, MA, USA : [s.n.], 2012. – p. 4.
- Peter Kampmann Frank Kirchner Towards a fine manipulation system for deep-sea environments, to appear [Conference] // Robots and Autonomous System, Special Issue „Advances in Autonomous Underwater Robotics". – 2011. – p. 7.
- Peter Kampmann Johannes Lemburg, Hendrik Hanff, Frank Kirchner Hybrid Pressure-Tolerant Electronics [Conference] // Oceans 2012 MTS/IEEE Hampton Roads Conference & Exhibition. – Virginia, USA : [s.n.], 2012. – p. 5.
- Q. Meng H. Wang, P. Li, L. Wang, Z. He Dexterous Underwater Robot Hand: HEU Hand II [Konferenz] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – 2006.
- Sylvain Lemieux Julien Beaudry, Michel Blain Force Control Test Bench for Underwater Vehicle-Manipulator System Applications [Conference] // 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. – 2006. – pp. 3046-4042.

Druckneutrale Systeme Tiefsee

Gerhard Körner (ENITECH GmbH), Rudolf Bannasch (EvoLogics GmbH), Heinz Lehr (TUB), Siegfried Krüger (IOW), Karsten Breddermann URO, Joanna Waniek (IOW)

Abstrakt

Das Fördervorhaben Druckneutrale Systeme Tiefsee (Förderkennzeichen 03SX276) wurde am 1.10.2009 begonnen und endet am 31.12.2013.

Das Projekt Druckneutrale Systeme Tiefsee „Gestaltung, Umsetzung und Erprobung von druckneutralen Systemen und Einrichtungen für den Langzeitunterwasserbetrieb in Fahrzeugen und Unterwasserbauwerken in der Tiefsee“ wurde durch nachfolgende Projektpartner bearbeitet:

Teilvorhaben 1, Enitech GmbH, Systemführer

Druckneutrale Energieversorgungen, -Antriebe und -elektronische Systeme für die Tiefsee

Teilvorhaben 2, EvoLogics GmbH

Druckneutrales Navigations-, Kommunikations- und Monitoringnetzwerk für die Tiefsee

Teilvorhaben 3, Technische Universität Berlin – TU-Berlin, Fachgebiet

Mikrotechnik, Fak. V Druckneutrale mechanische Systeme für die Tiefsee

Teilvorhaben 4, Institut für Ostseeforschung Warnemünde – IOW

Verankerungssysteme, Langzeittest und Seeveruche

Teilvorhaben 5, Universität Rostock, Meerestechnik

Isolationseigenschaften von silikonartigen Vergusswerkstoffen und Isoliermaterialien in der Tiefsee

wissenschaftl. Partner außerhalb des Verbundes,

Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Dr. habil. Joanna J. Waniek, Biogeochemie des Nordostatlantiks

Dieser Beitrag stellt das Verbundprojekt vor und ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.

Einleitung

Aufbauend auf die Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem vorhergehenden Vorhaben Druckneutrale Systeme (03SX220) wurde die weitere Grundlagenbearbeitung und die Erarbeitung neuer Technologien für druckneutrale Systeme in der Tiefsee durchgeführt.

Weiterhin wurden für typischen Unterwasserbaugruppen und Fahrzeuge Lösungswege erarbeitet sowie die Entwicklung, Konstruktion und der Musterbau von nachfolgenden Erprobungseinrichtungen durchgeführt:

- Druckneutrales Erprobungs- und Notbergesystem (ERNO) in Form eines einfachen ROV ähnlichen Fahrzeuges, welches an dem üblicherweise an Bord verwendeten Einleiterkabel für CTD/Rosetten betrieben werden kann
- Druckneutrales akustisches Navigations-, Kommunikations- und Monitoringnetzwerk bestehend aus 4 feststehenden Akustikmodemverankerungen (Accesspoints) und mehreren mobilen Netzwerkteilnehmern einschließlich Forschungsschiff. Das Netzwerkgebiet soll ein hohes Maß an Sicherheit zur Navigation und Kommunikation für die Erprobungen in der Tiefsee sichern
- Nahezu druckkörperlose Erprobungsplattform „Tiefseefisch“ (AUV) mit einer Payload, die zum Beispiel für hydrographische Messungen genutzt werden kann. Entwicklung und Konstruktion eines Aussetz- und Bergesystem für verschiedene Forschungsfahrzeuge

Die oben genannten Erprobungsfahrzeuge und -einrichtungen sind für Tauchtiefen von mindestens 6.000 m ausgelegt. Sie wurden im Hafenbecken, in der Ostsee und in der Tiefsee getestet und erprobt. Dabei sind neue Sicherheitskonzeptionen erarbeiten und erprobt worden, die die Kontrolle und Überwachung der Tiefseerprobungen und im Störfall ein Notauf-tauchen ermöglichen sowie jederzeit über und unter Wasser den aktuellen Standort des Fahrzeuges bzw. der Einrichtung darstellen. Im Erprobungsgebiet erfolgten exemplarisch hydrographische Messungen für den wissenschaftlichen Partner. An der Tiefseeverankerung Kiel 276 wurden Langzeittests über einen Zeitraum von zwei Jahren unter ozeanischen Bedingungen durchgeführt:

- Tests von Vergussmaterialien, Auftriebsschäumen und Klebeverbindungen
- Tests von Vergusstechnologien
- Tests von druckneutral vergossenen Lithium Polymerzellen verschiedener Größe und von unterschiedlichen Herstellern

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Teilprojekte dargestellt.

Teilvorhaben 1, Druckneutrale Energieversorgungen, -Antriebe und -elektronische Systeme für die Tiefsee

Das Teilprojekt 1 wurde durch die ENITECH GmbH bearbeitet. Bearbeitungsschwerpunkte:

- Erarbeitung und Erprobung neuer Technologien und grundsätzlicher Lösungen
- Erarbeitung von Lösungswegen, Entwicklung und Erprobung von typischen Unterwasserbaugruppen für Fahrzeuge und Unterwasser-einrichtungen:
 - für eine Erprobungs- und Notbergeeinrichtung (ERNO-System) bestehend aus einem TMS und einem ROV,
 - für ein akustisches Navigations-, Kommunikations- und Monitoring-netzwerk
 - für die AUV ähnliche Erprobungsplattform PreToS
- Systembearbeitung, Entwicklung und Konstruktion der Energie-versorgungssysteme, Antriebe, Schiffsführungs- und Kommunikationssysteme für die AUV ähnliche Erprobungsplattform PreToS
- Entwicklung und Konstruktion des ERNO-Systems,
- Erprobung und Weiterentwicklung der Technologien und Systeme sowie der Fahrzeuge und Einrichtungen im Hafenbecken, in der Ostsee und in der Tiefsee.

Nachfolgende wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse wurden erreicht:

Für druckneutrale Systeme geeignete elektrische und elektronische Bauelemente

Für Tauchtiefen bis 6.000 m und ozeanischen Bedingungen gibt es eine ausreichende Auswahl geeigneter Bauelemente, um alle notwendigen druckneutralen Schaltungsstrukturen zu realisieren. Für viele geeignete Bauelemente und Konstruktionselemente zeichnet sich eine Einsatzmöglichkeit über 600 bar ab. Die Eignungsgrenzen oberhalb von 600 bar wurden nicht weiter ermittelt. Für einige Bauelementegruppen ist der Einsatz in druckneutralen Schaltungsstrukturen kritisch und hängt nicht nur vom Druck

sondern auch von den ozeanischen und den konkreten elektrischen Belastungen in der Schaltung ab. So wurden Schaltungsstrukturen mehrfach erfolgreich im Drucktank bis 700 bar geprüft, die aber unter realen Bedingungen in der Tiefsee fast systematisch ausfielen. Zu diesen Bauelementegruppen zählen alle funktionsbedingt selbst druckkammerbildenden Bauelemente wie Quarze, Beschleunigungsaufnehmer und vorvergossene bewickelte Bauelemente mit Keramikkerne.

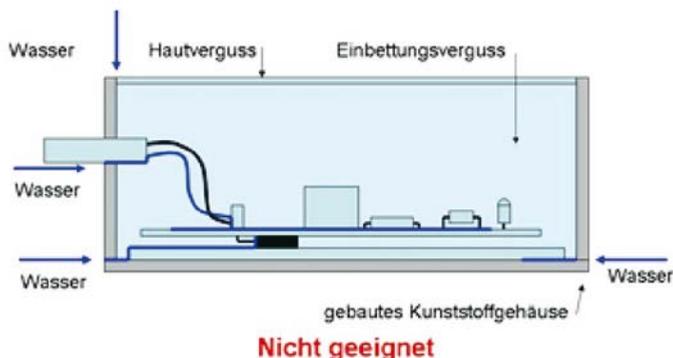
Insbesondere Kondensatoren sind kritische Bauelemente, von denen nur wenige Untergruppen geeignet sind. Nicht bewährt haben sich Kondensatoren die aufgrund ihrer Bauform Gaseinschlüsse beinhalten wie Elektrolytkondensatoren, Tantalkondensatoren, einige Folienkondensatoren sowie teilweise Keramik Kondensatoren. Bewährt haben sich einige wenige nicht vorvergossenen Folienkondensatorarten, die mit überdimensionierter Betriebsspannung insbesondere in Hochstromschaltungsstrukturen wie Energiewandler und Antriebssteller zuverlässig betrieben werden können.

Es war sehr schwierig und aufwendig, die realen ozeanischen Tiefseebedingungen im Drucktank nachzubilden, um die beobachteten Ausfallerscheinungen reproduzierbar im Labor nachzuvollziehen. Der Testdrucktank musste gekühlt und mit entsprechenden Penetratoren versehen werden um die reale funktionelle Belastung nachzubilden wobei dabei immer noch nicht die realen mechanischen Belastungen nachbildbar waren.

Druckneutraler Verguss

Als Vergussmaterialien haben sich Silikonvergussysteme bei den Erprobungen und Langzeiterprobungen bewährt. Sie zeigten die günstigsten Eigenschaften. Für druckneutrale Verkabelungen haben sich gebaute und druckneutral vergossene Kabel mit Silikonadern mit einem Mindestquerschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$, auch in Kombination mit PUR-Angüssen im Steckverbinderbereich bewährt.

Nach den ersten Tiefseeerprobungen stellten sich konstruktionsbedingte und vergusstechnologisch bedingte Ausfälle bei elektronischen Baugruppen



heraus. Dabei wurde festgestellt, dass der einfache Verguss einer Baugruppe in einem gebauten Kunststoffgehäuse mit Einbettungsverguss und abschließenden Hautverguss als Membran nicht geeignet ist und nach einigen Tauchversuchen bei den meisten Baugruppen ausfiel.

Nach Umstellung der Vergusstechnologie auf geschlossene Vergusssysteme mit großen Membranflächen (Tütenkonzept) konnten zuverlässige elektronische Baugruppen hergestellt und ohne Ausfälle betrieben werden.



Unterwasserantriebe

Für die Unterwasserfahrzeuge und -einrichtungen wurden alle Unterwasserantriebe grundlegend bearbeitet. Dabei entstanden hocheffiziente Haupt- und Fahrtriebe für das ROV des ERNO – Systems und für PreToS. Es wurde für die gegenläufigen Hauptantriebe von PRETOS ein Gesamtwirkungsgrad von Motor mit Steller im Wasser von über 82 % erreicht. Weiterhin entstanden eine Vielzahl von Stell- und Ruderantrieben, getriebelose Windenmotoren, Steuerthruster sowie binäre Antriebe. Neben der effizienten Gestaltung der Unterwassermotoren war die Entwicklung einer entsprechenden Robustheit und Zuverlässigkeit notwendig. Dies konnte nur anhand vieler Erprobungen insbesondere in der Ostsee und Tiefsee durchgeführt werden. Wichtigste Bearbeitungsergebnisse sind die Weiterentwicklung von zwei-strängigen elektronisch kommutierten Motoren zu robusten Unterwassermotoren mit hohem Wirkungsgrad. Dies war nur erreichbar durch:

1. die effizienter Gestaltung der bidirektionalen Steller – Motor-Energie-wandlung bei den notwendigen relativ großen Wasserspaltmaßen zwischen 1 bis 2 mm.
2. die Anzugskräftekompensation von strömungsgünstigen Läufern auf beiden Ständerseiten, wodurch der Einsatz dynamischer Wassergleitlager möglich wurde.
3. Konstruktion von Ständer und Läufer als geschlossenes Vergusssystem mit wasserundurchlässigen und in den Verguss integrierbaren Kunststoffmembranen

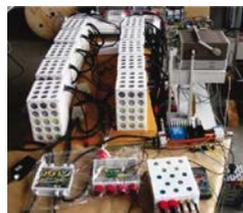
Diese Motoren können durch den entwickelten elektronisch kommutierten Schrittmotorenbetrieb mit kleinsten Drehzahlen betrieben werden. Hierdurch wird eine gute Steuerbarkeit erreicht.

Energieversorgungssysteme

Bei der grundlegenden Bearbeitung von druckneutralen Energieversorgungssystemen wurden umfangreiche Tests und Langzeittests mit Lithium-Polymerzellen durchgeführt. Sie sind aufgrund ihres Aufbaus als druckneutrale Bauelemente von Energieversorgungssystemen geeignet. Durch die hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichte können leichte und kleine Energieversorgungssysteme ohne Druckkörper bis mindestens 600 bar aufgebaut werden. Die Zellen müssen für diese Anwendungen ein robustes Zellmembransystem und einen geringen Restgasinhalt besitzen. Sie dürfen über längere Zeit nicht zum Ausgasen neigen und durch eine maschinelle Massenfertigung möglichst sehr einheitlich bezüglich Kapazität, Selbstentladung und Temperaturverhalten sein. Die Strombelastbarkeit spielt bei diesen Anwendungen meist eine untergeordnete Rolle.

Das Langzeitverhalten druckneutral vergossener Lithium-Polymerzellen wurde an der Tiefseeverankerung Kiel 276 mit Testzeiten von 2 Jahren sowie an den Testfahrzeugen untersucht. Es wurden Zellen von 4 verschiedenen Herstellern mit Speicherkapazitäten im Bereich zwischen 10 Ah und 40 Ah mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen untersucht und langzeitgetestet.

Die zu 26 V Blöcken zusammengeschalteten Zellgruppen müssen mit einer besonderen Vergusstechnologie vergossen werden, um die Volumenänderung durch den Restgasinhalt der Zellen bei Druckänderungen auszugleichen. Im Inneren der Blöcke dürfen keine größeren Differenzdrücke entstehen. Weiterhin müssen ein Batteriemanagement mit Kommunikationsanschlüssen und Sicherheitsfunktionen sowie der Zerstörerschutz (Kurzschlusschutz) in den Block mit integriert werden. Insbesondere bei diesen Baugruppen muss ein geschlossenes Vergussystem (Tütenkonzept) mit extrarobustem Hautverguss, speziellem weichem Einbettungsverguss und allseitigen Membranflächen eingesetzt werden. Die doppelten Hauptstromanschlüsse, die elektronisch abgesicherten Zellanschlüsse zum externen Nivellieren, die Sicherheitsstromkreise und die Anschlüsse zur maximalen Zellspannungsregelung wurden in einem druckneutralen 14 poligen Hoch-



stromschraubklemmverbinder nach außen geführt. Dieser Schraubklemmverbinder wird mit speziellem Silikonfett gefettet und gepresst. Er ist bis zu 100 A belastbar und hat sich seit Jahren bei vielen Tiefsee-Einsätzen bis 6.000 m bewährt.

Die Batterieblöcke sind über weitere druckneutrale Baugruppen zu Batteriebänken und ganzen Stromversorgungssystemen mit verschiedenen Spannungsebenen zusammenschaltbar. 24 V oder 48 V Hilfsstromversorgungsebenen können über Energiewandler und Pufferbatterien gepuffert und potentialgetrennt betrieben werden. Durch druckneutrale Leistungsschalter und Verteilungsbaugruppen sowie optische Ein-Ausschalter sind beliebige Energieverteilungssysteme aufbaubar. Durch den transparenten Verguss hindurch werden wichtige Systemzustände optisch angezeigt. Die vergossenen druckneutralen Baugruppen können auch nach längerer Zeit wieder geöffnet und nach Änderung bzw. Reparatur in der Werkstatt notfalls auch unter Vakuum wieder neuwertig verschlossen werden. Behelfsreparaturen unter Bordbedingung können mit einfachen Mitteln durchgeführt werden. Elektrische Messungen mit speziellen gefetteten Messnadeln durch den Haut- und Einbettungsverguss sind ebenfalls möglich. Der Einstechkanal verschließt sich nach der Messung selbständig durch den weichen klebrigen Einbettungsverguss und das Gleitmaterial der Nadeln.

Auftriebsschaum auf Silikonbasis

Erstmals konnte eine Technologie zur Herstellung von mechanisch vergieß-, schneid- und bearbeitbaren Silikon-Bubbles-Schäumen erarbeitet werden. Der Schaum wurde als Auftriebskörper der Access Points erfolgreich eingesetzt und erwies sich bei den Tiefseeerprobungen als sehr robust und zuverlässig. Die Dichtewerte von 0,68 bis 0,7 kg /dm³ könnten mit besseren Bubbles wesentlich verbessert werden.

Teilvorhaben 2, Navigations-, Kommunikations- und Monitoring-netzwerk für die Tiefsee

Auf Basis der bionischen S2C (Sweep Spread Carrier) Technologie hat EvoLogics ein intelligentes **Navigations-, Kommunikations- und Monitoring-Netzwerk (NAVKOMON)** für die Tiefsee entwickelt. Dieses ermöglicht die hochpräzise (georeferenzierte) Positionierung und Navigation mobiler Einheiten (AUV, ROV), die telemetrische Überwachung der Betriebsparameter und bei Bedarf auch die sichere interaktive Steuerung aller Funktionsabläufe. Das NAVKOMON ist vielfältig erweiterbar. Die im Projekt erfolgreich erprobte Basiskonfiguration vereinte ein akustisches NF-Netz (7-17 kHz, Übertragungreichweite bis 8 km): Schiffsmodem mit integrierter USBL-Funktion, stationäres Bodennetzwerk mit 4 akustischen Access-Points und 2 USBL-

Modems auf dem Tiefsee-AUV. Hinzu kamen ein weiteres Niederfrequenz-modem/Pinger auf dem Tether Management System (TMS) sowie ein HF-Kommunikations- und USBL-Ortungssystem (48-78 kHz, Reichweite bis 2 km) zwischen TMS und ROV.

Zur optimalen Steuerung der komplexen Kommunikationsabläufe im UW-Datennetzwerk wurde ein spezielles Protokoll (D-MAC) und, für die oberflächenbasierten Überwachungs-, Steuerungs-, Tracking- und Positionierungsaufgaben eine Bedienkonsole und ein spezielles Softwarepaket (SiNAPS), das die Anbindung an die Schiffssensorik (GPS, AHRS) ermöglicht, entwickelt. Damit wird die bestmögliche Präzision der akustischen Messungen erreicht. Die ermittelten Positionen können sofort in Absolut-Koordinaten umgerechnet und die Tracks georeferenziert abgebildet werden (wichtige Grundlage u.a. auch für die Einbettung in elektronische Seekarten). Die neuen Software-Module sind auf heterogenen Betriebsplattformen (Windows, iOS, Linux, Android etc.) lauffähig. Somit können z.B. über WLAN auch verschiedenartige Peripheriegeräte (bis zum Smartphone, Panel-PCs usw.) in das Kontrollsystem einbezogen, alle Prozesse parallel auch an Deck und/oder auf der Brücke mit verfolgt und ggf. auch von dort aktiv gesteuert werden.



Topside USBL-Modem:

Das schiffseitige Hochleistungs-USBL-Modem wurde an der Moon-Pool-Halterung des Forschungsschiffes befestigt. Unter dem Kiel fungiert es als Gate zum gesamten NAVKOMON Netzwerk, wobei sämtliche Knoten über die jeweilige IP-Adresse individuell angesprochen werden können. Das Gerät ermöglicht den zuverlässigen (fehlerfreien!) bidirektionalen Datentransfer und mittels der integrierten USBL (Ultra Short Base Line) Antenne bei jedem Kontakt zugleich auch die Bestimmung der genauen 3D-Position (Relativabstand und 3D-Winkellage)

der betreffenden Gegenstation. Es verfügt über einen eingebauten Lage- und Richtungssensor und kann zudem auch an die Bewegungs- und Navigationssensorik des Schiffes angeschlossen werden, so dass die USBL-Messungen in Absolut-Koordinaten umgerechnet werden können.

Stationäres Bodennetzwerk mit 4 Access-Points

Die autonomen Access-Points (AP) dienen als akustische „Leuchfeuer“, die nach Bedarf aktiviert werden können, um in der Tiefe des Ozeans die präzise Navigation des AUVs zu ermöglichen. Sie werden „frei fallend“ oder mittels TMS vom Schiff ausgesetzt, am Meeresboden verankert, die Koordinaten mittels GPS und USBL-Modem von Schiff aus bestimmt und in den APs gespeichert. Durch ihre Verknüpfung zu einem UW-Netzwerk mit Auto-Routing Funktion wird gewährleistet, dass das AUV und alle anderen Systemkomponenten im



gesamten Einsatzgebiet stets sicher erreichbar sind und alle Daten in optimaler Qualität übertragen werden. Zudem können in den APs Messages hinterlegt (Briefkasten-Funktion) und relevante Betriebsdaten, Umgebungsparameter und missionsspezifische Abläufe protokolliert werden (Monitoring-Funktion).

Kernelement ist jeweils ein akustisches NF-Modem mit integriertem Datenspeicher, das auch zur Ansteuerung eines externen Releaser-Moduls genutzt wird. Die Stromversorgung erfolgt über ein Batteriemodul am Boden des Access Points. Ein zweiter Akustik-Releaser sorgt für redundante Sicherheit (Lösen von der Ankerplatte) und syntaktische Schaum-Elemente für den Auftrieb. Das Auftauchen wird zentimetergenau mit dem USBL Schiffsmodem verfolgt, die Bergung durch einen Surface-Marker erleichtert.

HF USBL-System

Zur Bestimmung der ROV Position bezüglich des TMS wurde ein Akustik-Modem auf dem Fahrzeug und installiert und mittels USBL-Modem vom TMS aus geortet. Während der Missionen wurden die vom TMS gemessenen XYZ Koordinaten des ROVs fortlaufend über das Einleiterkabel (mit DSL-Modem) zum Schiff übertragen und für spätere



Analysen parallel auch im Modem-Speicher geloggt. Mit diesem System wird zugleich eine bidirektionale Hochgeschwindigkeits-Datenverbindung zwischen ROV und TMS bereitgestellt, die als redundanter Kommunikationskanal genutzt werden kann und im Fall einer Störung der Kabelverbindung die telemetrische Steuerung des ROVs ermöglicht (redundante Sicherheit). Last but not least wurde in unserem Teilprojekt ein bionischer Fang- und Greifapparat für die Bergungsmissionen des ROVs entwickelt.

Teilvorhaben 3: Druckneutrale mechanische Systeme für die Tiefsee

PreToS und LARS

Das druckneutrale AUV PreToS ist für Tauchtiefen von 6.000 Metern ausgelegt. Das Konzept der druckneutralen Systeme ermöglicht auch bei einem hohen Umgebungsdruck von über 600 bar eine Gestaltung von Komponenten ohne teure und schwere Druckkörper.



Die Verwendung des druckneutralen Ansatzes gestattet eine offene Struktur, so dass die äußere Hülle keine Druckkräfte aufnehmen muss. Die Einbauteile werden von Meerwasser umspült und sind dem Umgebungsdruck direkt ausgesetzt. Der innere Aufbau der PreToS setzt sich aus einem Titangerüst, syntaktischem Auftriebsschaum und Einbaukomponenten zusammen. Der Tragrahmen gewährleistet eine steife und korrosionsfeste Grundstruktur bei geringer Eigenmasse. Er ist so aufgebaut, dass eine Trennung in Geräte- und Schaumsektion entlang der Fahrzeuglängsachse entsteht, damit ein stabiles Fahrverhalten des AUVs und eine gute Erreichbarkeit der Einbauteile sichergestellt sind.

Um ein AUV trotz eingeschränktem Energievorrat mit möglichst großem Aktionsradius und hoher Einsatzzeit zu entwickeln, lag ein besonderes Augenmerk auf einer optimierten Strömungsform. Hierzu wurden typische Strömungskörper für AUVs (Torpedo und Laminarspindel) mit in der Natur auftretenden Formen (Thunfisch, Pinguin, Hai) verglichen. CFD-Simulationen ergaben, dass die Pinguin-Form die geringsten Widerstandskräfte erzeugt und somit lange Einsätze des AUVs ermöglicht. Darüber hinaus

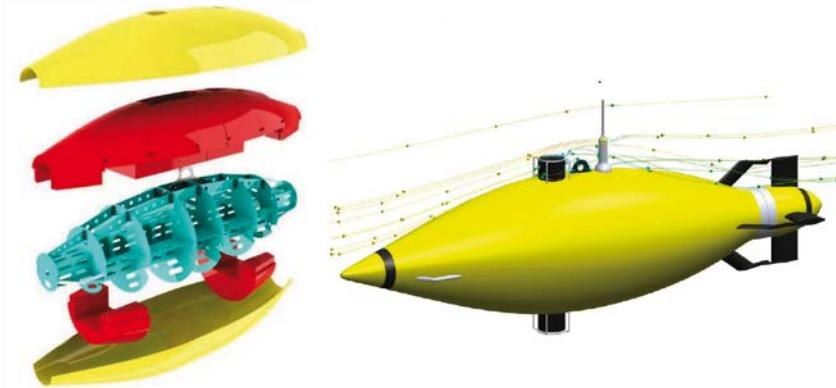


Abbildung links: offene Struktur des PreToS (Strömungshülle: gelb, Auftriebsmaterial: rot, Tragrahmen: türkis); Strömungssimulation der Pinguinform mit Anbauteilen

zeigten die Erprobungen in der Ostsee und im Atlantik, dass die PreToS eine sehr hohe Dynamik aufweist. Besonders hervorzuheben sind die geringen Durchmesser bei Kreisfahrten und die gute Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs.

Da das Aussetzen und Bergen eines AUVs bei Seegang Schwierigkeiten bereitet, wurde ein neuartiges Launch and Recovery System (LARS) entwickelt und erprobt. Der Ansatz beruht auf der Entkopplung der Bewegung von Forschungsschiff und AUV. Die Entkopplung gelingt durch den Einsatz eines schwimmenden Bergekäfigs. Dieser lässt sich wahlweise mithilfe von zwei Schwenkarmen und Lagerböcken mit dem Forschungsschiff verbinden oder als eigenständiges LARS auf kleinen Forschungsschiffen einsetzen. Die Erprobungen zeigten, dass besonders bei starken Roll- und Nickbewegungen des Forschungsschiffs, wie sie auf dem Atlantik auftreten, die Verwendung der Schwenkarme ein sicheres Aussetzen und Bergen ermöglichen.

Die Abbildung 3 zeigt das LARS und die PreToS während des Bergevorgangs im Atlantik bei einem Wellengang von 2 Metern.



Links: PreToS wird in den schwimmenden Bergekäfig gezogen; rechts: Bergen nach erfolgreicher Sicherung des AUVs im Bergekäfig mit Schwenkarmen

Teilvorhaben 4: Verankerungssysteme, Langzeittest und Seeversuche

Das IOW trägt innerhalb des Projektes „Druckneutrale Systeme für die Tiefsee“ die Verantwortung für die Begleitung aller Teilentwicklungen des Projektes aus maritimer und ozeanographischer Sicht, die Gestaltung spezieller Verankerungssysteme sowie die aktive Realisierung aller Seeverprobungen in der Ostsee sowie im Atlantik.



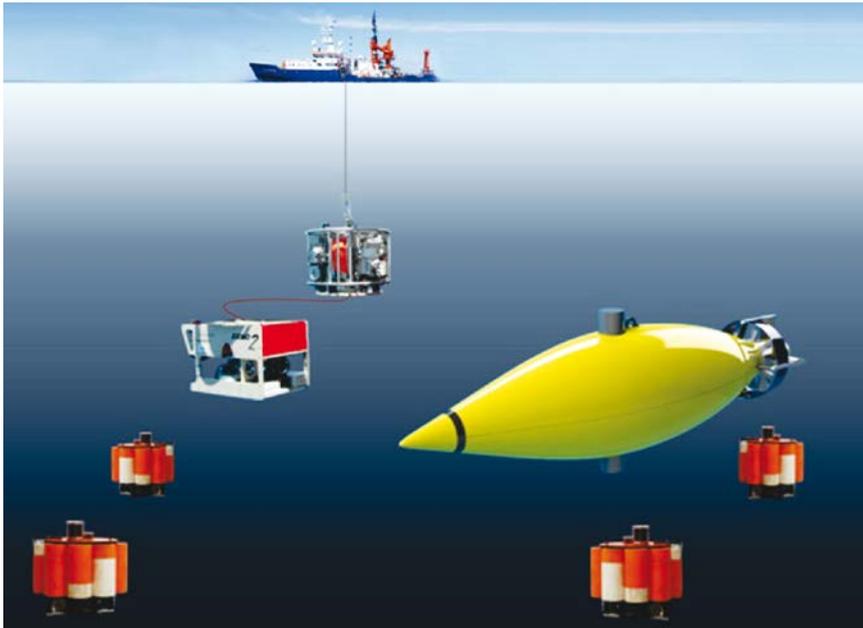
FS „Elisabeth M. Borgese“



FS „Poseidon“

Zum Einsatz kommen dabei in der Ostsee eigene Forschungsschiffe wie z.Z. „Elisabeth Mann Borgese“ sowie Schiffe des deutschen Forschungsschiffspools, im Bereich der Tiefsee vorrangig FS „Poseidon“. Das IOW trägt somit entscheidend zur Entwicklung und Optimierung von druckneutralen Systemen für maritime Anwendungen in verschiedensten Ausführungen bei, vom Sensor, Auslöser über druckneutrale Energieversorgungskomponenten, Antriebe, druckneutrale akustische Modems bis hin zu kompletten Testfahrzeugen (ROV/AUV). Durch IOW werden eine möglichst breite Anwendung druckneutraler Systeme in der Meeresforschung sowie erste Ansätze für neuartige Lösungen meereswissenschaftlicher Aufgabenstellungen mit Hilfe druckneutraler Systeme angestrebt. Das IOW bearbeitete innerhalb des Projektes konkret:

- die notwendige Erprobungs-Logistik und kombinierte diese mit den eigenen Schiffseinsatzplänen des FS „Prof. A. Penck“ sowie der neuen „Elisabeth M. Borgese“,
- realisierte die Schiffszeitanträge für Schiffe des deutschen Forschungsschiffspools,
- entwickelte Verankerungs- und Haltesysteme mit integrierten akustischen Accesspoints, sowie Komponenten von Orientierungssystemen für autonome Unterwasserfahrzeuge und
- begleitete direkt die Entwicklungen zur Unterwasser-Informationsübertragung (UW-Netz).



Im Laufe des Projektes „Druckneutrale Systeme für die Tiefsee“ gelang es, alle Teilkomponenten des oben dargestellten Gesamtsystems in der Gemeinschaft der Projektpartner bis zur Einsatzreife in See zu entwickeln und letztlich im Verbund, sowohl in der Ostsee, als auch in der Tiefsee bei rd. 6.000 m Wassertiefe *) erfolgreich zu erproben:

2010 2x PENCK, 1x POSEIDON*), 2011 1x MERIAN *), 1x BORGESSE, 2012 1x ALKOR, 3x BORGESSE, 1x POSEIDON*), 2013 3x ALKOR, 1x BORGESSE, 1x POSEIDON*).

Zahlreiche druckneutrale Einzelkomponenten und Systeme aus dem Projekt werden zukünftig erfolgreich Anwendungen in der Meerestechnik und Meeresmesstechnik finden. Aus der Sicht des IOW sind dies unmittelbar nach Abschluss des Projektes insbesondere:

- eigenständige Energieversorgungssysteme, Antriebe, Releaser, Steuer- und IT-Komponenten, Kabel, Beleuchtungssysteme usw.
- das an klassischen Einleiterkabeln auf praktisch allen Forschungsschiffen betreibbare ROV-/Dockingstationssystem TMS/ERNO
- netzwerkfähige, akustische Modem- und Accesspointssystem mit Orientierungs-, Tracking- und vernetzten Datenübertragungsfunktionen
- druckneutrale, autonome und vernetzungsfähige Unterwasserfahrzeuge zur neuartigen Lösung meereswissenschaftlicher Aufgaben (ROV/AUV).

Teilvorhaben 5, Isolationseigenschaften von silikonartigen Vergusswerkstoffen und Isoliermaterialien in der Tiefsee

Gegenstand des Teilprojekts ist die systematische Analyse des Langzeit-Verhaltens von Vergussmaterialien bezüglich Temperatur- und Druckbeständigkeit sowie elektrischer Eigenschaften für druckneutrale elektronische Baugruppen und Kabel im seewassergesättigten Zustand unter Tiefseebedingungen. Die Arbeit fokussiert sich dabei auf folgende 3 Schwerpunkte:

1. Wasseraufnahme-Tests und Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Haut- und Einbettungsvergüssen,
2. Durchführung von Messungen an verschiedenen Vergussmassen zum Verhalten des elektrischen Widerstands bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen,
3. Drucktests an kompletten Gehäusen mit vergossenen druckneutralen elektronischen Baugruppen zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Vergussmasse und Baugruppengehäuse hinsichtlich Wasserdichtigkeit.

Wasseraufnahme-Tests und Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Haut- und Einbettungsvergüssen

Grundsätzlich wurden drei Silikone bzw. Silikonmischungen, ein Polyurethan und ein syntaktischer Schaum (Silikon + Mikrohohlkugeln) untersucht. Als Probenform wurde der Schulterstab 2 laut DIN 53504 gewählt.

Die Ergebnisse aus der Wasseraufnahme zeigen, dass die Massenzunahme bei den untersuchten Materialien unter 7 Gew.-% liegt. Der in deionisiertem Wasser gelagerte syntaktische Schaum stellt hierbei die Ausnahme dar, da hier die Zunahme bei 60 Gew.-% (75 °C) bis zu 110 Gew.-% (30 °C) lag. Diese Proben wiesen auch einen hohen Quellgrad auf.

Die Silikonproben verloren bei erhöhten Temperaturen und Lagerung in deionisiertem Wasser an Gewicht und fielen zum Teil unter das Ausgangsniveau. Das Polyurethan hat eine höhere Wasseraufnahme als das Silikon.

Die mechanischen Eigenschaften wurden im Zugversuch nach der DIN 53504 und einer Härtemessung mittels eines Shore-A Durometers bestimmt. Die Proben wurden erst unmittelbar vor der Prüfung aus ihrem Einlagerungsmedium entnommen. Generell ist bei allen Materialien nach 5 Wochen eine Abnahme der Zugfestigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand zu beobachten. Nach anfänglicher Abnahme von der Zugfestigkeit stabilisierten sich die Messwerte mit zunehmender Einlagerungszeit.

Grundsätzlich konnte bei keinem Material ein signifikanter Werteabfall beobachtet werden. Die Härtemessung ergab bei den Silikonen und dem Polyurethan keine bedeutenden Veränderungen. Bei dem syntaktischen Schaum hingegen ist ein klarer Unterschied zwischen den Einlagerungsmedien zu erkennen.

Elektrische Prüfung an verschiedenen Vergussmassen

Um zu gewährleisten, dass vergossene elektronische Baugruppen ordnungsgemäß funktionieren, muss sichergestellt werden, dass das Isolationsmaterial die elektronischen Komponenten über die Einsatzdauer mechanisch schützt und, insbesondere bei einem Unterwassereinsatz, elektrisch von der Umgebung isoliert. Durch die Entwicklung einer Testschaltung soll es möglich werden, den Isolationswiderstand innerhalb eines Vergussmaterials zu messen.

Mit insgesamt 10 Funktionsmustern wurden bisher 5 Testreihen bei einer Einlagerungsdauer von bis zu 78 Tagen durchgeführt. Die durchgeführten Testreihen unterscheiden sich in der Einlagerungstemperatur (ca. -3°C, ca. 20 °C und 50 °C), dem Einlagerungsmedium (Leitungswasser, deionisiertes Wasser und künstliches Seewasser) und der Vergussart.

Die grundlegende Funktionsfähigkeit der Schaltung konnte nachgewiesen werden und erste qualitative Ergebnisse bezüglich der Vergussdicke konnten erlangt werden. Die Ergebnisse einer weiteren Testreihe zur Prüfung der entwickelten Testschaltung unter hohen Drücken – bis zu 600 bar – werden Mitte November 2013 erwartet.

Drucktests an kompletten Gehäusen mit vergossenen druckneutralen elektronischen Baugruppen zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Vergussmasse und Baugruppengehäuse hinsichtlich Wasserdichtheit

Zur Untersuchung hinsichtlich Wasserdichtheit werden im Drucktank verschiedene Testobjekte eingelagert und harmonisch schwellendem Druck bis 600 bar ausgesetzt.

Die Ergebnisse der Drucktests sind erst zum Ende des Projektes verfügbar.

Wichtigste Ergebnisse der Hafen-, Ostsee- und Tiefseeerprobungen

Die ersten Erprobungen wurden mit dem ERNO 1 System und Komponenten des Navigations-, Kommunikations- und Monitoring Netzwerkes durchgeführt. Das ERNO-System ermöglicht die Kontrolle und Überwachung der Erprobungen in der Tiefsee. Dabei wurden viele Fahrten über Grund durch-



geführt und Videos aufgezeichnet. Die Tiefseerprobungen brachten dabei sehr wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen zum Einsatz druckneutraler Systeme in der Tiefsee. Bei der Tiefseerprobung im Frühjahr 2011 ging das ROV des ERNO 1-Systems unter ungünstigen Witterungsbedingungen verloren. Die Verbundpartnern und Vertretern des BMWi beschlossen schnellstmöglich ein überarbeitetes ROV neu zu bauen sowie die TMS auf Basis der bisherigen Erkenntnisse zu überarbeiten. Durch dieses Tiefseewerkzeug wurde die Weiterführung der Tiefseerprobungen ermöglicht.

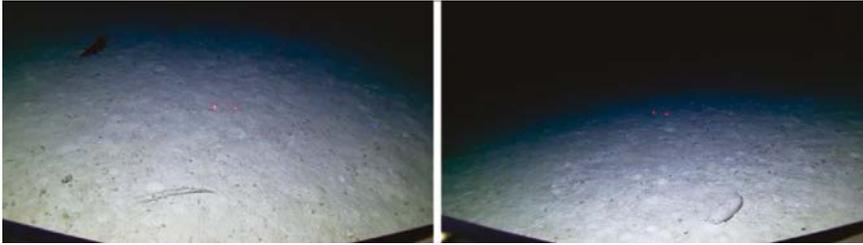
Das ERNO 2-System ermöglichte in einer Erprobungsphase mit neuen Vergusstechnologien und neuen Bauelementen bei hoher Ausfallwahrscheinlichkeit von Testbaugruppen das relativ sichere Testen in der Tiefsee. Es wurden umfangreiche Tests mit verschiedenen Komponenten von allen Partnern durchgeführt.



ROV und TMS

TMS und Accesspoint

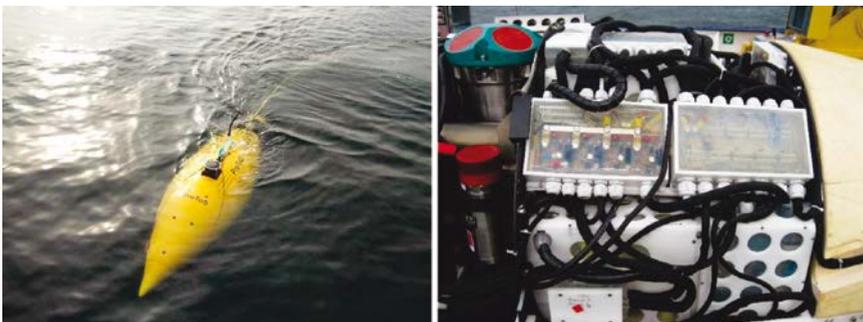
TMS, Testbaugruppe



Mit dem ERNO 2 wurden viele Testfahrten über Grund durchgeführt

Wichtige Erprobungsergebnisse 2012

- Erstmals keine systematischen Ausfälle bzw. Mängel bei Vergusstechnologien und Materialien über die gesamte Erprobungsphase.
- In mehreren Testfahrten über Grund wurden die Fahreigenschaften am neuen ROV-Kabel ermittelt und das Andock- sowie Kamerasystem ausgiebig unter schwierigen Seebedingungen erfolgreich getestet.
- Das Bergen mit abgekoppeltem ROV aus über 5000 m Wassertiefe konnte sicher und erfolgreich durchgeführt werden (in diesem Zustand verloren wir, ebenfalls bei schlechtem Wetter, das erste ROV).
- Durch Energienachspeisung konnte eine unbegrenzte Einsatzdauer gewährleistet werden. (Erprobungen teilweise über 8h ununterbrochen in der Tiefsee).
- Die Access-Points und Langstrecken USBL Akustikmodems wurden unter Tiefseebedingungen getestet.
- Ein druckneutrales Akustikmodem konnte erfolgreich getestet werden
- Erfolgreiche Ostseeerprobung mit PreToS in der Ostsee





Bei den Ostseeerprobungen im Herbst 2012 wurde das Fahrzeug schwer beschädigt. Das Fahrzeug wurde zum Aussetzen über das Heck angehoben und sollte durch Schwenken des A-Rahmens in die Aussetzposition gebracht werden. Auf halbem Weg zum Heck brach das Stahlseil des Assistenzkranes. Das Fahrzeug fiel aus einer Höhe von ca. 1,5 m mit dem Heck auf das Deck und mit dem Bug auf die Helling.

Im Oktober 2012 wurde die neue Situation mit dem Projektträger und mit dem BMWi beraten und die weiteren Arbeiten und Seeerprobungen insbesondere für das Jahr 2013 festgelegt:

- Die Tiefseeerprobung mit PreToS im Frühjahr 2013 ist nicht möglich
- Programm für die Tiefseeerprobung im Herbst 2013:
 - Ermittlung der Lage der Azorenfront über CTD-Sondenmessung
 - Erprobung PreToS im Atlantik mit festem positiven Auftriebstrimm
 - Erprobung des Lars Systems
 - Steuerung und Überwachung der Unterwasserfahrt über Schiffsakustikmodem mit querab fahrendem Schiff
 - Erprobung der Temperaturgradientenregelung bei Kursfahrt
- Querschnittsvermessung der Azorenfront mit PreToS
- Aussetzen des Netzwerkes mit ERNO 2
- Netzwerkfahrt mit PreToS

Nach der Havarie wurde PreToS komplett demontiert. Nach Reparatur der defekten Teile musste PreToS erneut integriert und in Betrieb genommen werden. Die Erprobungsmöglichkeiten im Frühjahr 2013 konnten somit für PreToS nicht wie geplant genutzt werden. Um dennoch die notwendigen Erprobungen zur Herausfindung und Beseitigung von Schwachstellen durchführen zu können, wurden mit hohem Aufwand ab 7.6.2013 wöchentliche Hafenerprobungen durchgeführt.

Wichtige Erprobungsergebnisse 2013

- Im Frühjahr 2013 konnten die Tiefseeerprobungen wegen schlechtem Wetter nicht wie geplant durchgeführt werden. Es war nur eine Testtauchfahrt mit ERNO bei 50 m möglich.
- Bei der Tiefseeerprobung im Herbst 2013 wurden nachfolgende Erprobungen durchgeführt:
 - Erprobung PreToS im Atlantik mit festem positiven Auftriebstrimm
 - Erprobung Lars System
 - Steuerung und Überwachung der Unterwasserfahrt über Schiffsakustikmodem mit querab fahrendem Schiff
 - Aussetzen des Netzwerkes

Die Erprobung der Temperaturgradientenregelung bei Kursfahrt an der Azorenfront sowie die Querschnittsvermessung der Azorenfront wurden nicht durchgeführt. Mit PreToS konnten lediglich eine kürzere Testfahrt in Oberflächennähe und eine Erprobungsfahrt in Fronttiefe zwischen 200 und 250 m aber nicht an der Azorenfront durchgeführt werden. Es wurden lediglich exemplarisch hydrographische Messungen für den wissenschaftlichen Partner durchgeführt. Bei den Erprobungen gab es keine Hardwareausfälle von druckneutralen Baugruppen und Komponenten.

Langzeittest an der Tiefseeverankerung Kiel 276

Nachfolgende Tests über zwei Jahren wurden durchgeführt:

- Test Vergussmaterialien, Auftriebsschäume und Klebeverbindungen
- Test von Vergusstechnologien und druckneutrale Kabel
- Test von druckneutral vergossenen Lithium Polymerzellen verschiedener Größe und von unterschiedlichen Herstellern

Zusammenfassung und Ausblick

Druckneutrale Systeme bilden eine echte Alternative zu Druckkammerlösungen und druckkompensierten Systemen in Fahrzeugen und Einrichtungen der Tiefsee. In vielen Fällen sind sie kleiner, leichter und kostengünstiger und lassen sich besser handhaben. Alle wichtigen Teilsysteme lassen sich druckneutral realisieren. Die Bauelemente hierfür sind vorhanden und zum Aufbau der notwendigen Schaltungsstrukturen geeignet. Bei richtiger Konstruktion und Einsatz geeigneter Vergusstechnologien und Materialien lassen sich

zuverlässige Baugruppen, Antriebe und Energieversorgungssysteme für Unterwasserfahrzeuge und andere Tiefseeeinrichtungen realisieren. Druckneutrale Systeme sowie die im Rahmen der Projektbearbeitung entstandenen Fahrzeuge und das Navigations-, Kommunikations- und Monitoring Netzwerk bieten weiterhin ein enormes Weiterentwicklungspotential. Schon heute haben sich viele druckneutrale Baugruppen, Antriebe, Energieversorgungssysteme und Unterwassernetzwerkkomponenten etabliert. Sie werden teilweise in Serie gefertigt und vielfach für die unterschiedlichsten Anwendungen in der Meerestechnik produziert und verkauft. Viele der erarbeiteten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse werden in anderen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben weiter genutzt und weiterentwickelt. So sind im FuE-Vorhaben SMIS die Entwicklung weitestgehend druckneutraler Mess-AUV's, eines Oberflächenfahrzeuges und einer Tiefseestation geplant.

HISEM – Ein „High Sensitive Deep Sea Methane Monitoring“ System für Unterwasser-Leckagemessungen

Daniel Esser (CONTROS Systems & Solutions GmbH Kiel);
Mark Schmidt, Peter Linke (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Kurzfassung

Ein neuartiges Unterwasser-Messsystem, welches sowohl für die Leckagemessungen im Bereich der Offshore Öl- und Gasförderung, als auch für ozeanographisch-wissenschaftliche Fragestellungen anwendbar ist, konnte im Rahmen der MARTECH-Förderung entwickelt werden. Das Messprinzip basiert auf der Konzentrationsbestimmung von Methan (oder höherer Kohlenwasserstoffe) mittels durchstimmbarer Laserdioden Infrarot Spektrometrie. Das Messsystem deckt zurzeit einen Konzentrationsbereich von 1-15.000 ppm CH₄ ab und hat eine Reproduzierbarkeit von ± 1 ppm. Der Konzentrationsbereich entspricht einer im Meerwasser gelösten Methan-Konzentration von ca. 1 bis 20.000 nmol/l. Die Einsatztiefe beträgt zurzeit 3.000 m und das System wurde erfolgreich im Rahmen einer ROV-Messkampagne (Simulation einer Leckage-Detektion im Santa Barbara Channel, USA) und einer Lander-gestützten Dauermesseinrichtung (Blowout in der Nordsee, GB) getestet.

Einleitung

Die ersten deutschen Erfolge bei der insitu Messung von geringsten (~ 2 nmol/l) Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Ozean (z.B. CH₄), konnten mit der Entwicklung des sogenannten MEDUSA Systems in den 90er Jahren erzielt werden (Methane Detection for Undersea Applications – Michaelis and Weitkamp, 1990; Wernicke et al., 1991). Die Messungen wurden mittels eines HeNe-Laser Absorptionsspektrometers, welches in einem druckdichten Metallgehäuse gelagert war, durchgeführt. Allerdings führte die fehlende Tiefseetauglichkeit (Einsatztiefe >300m) und die enormen Dimensionen des MEDUSA-Systems (0.8m x 4.0m) erforderten allerdings eine Weiterentwicklung für den kommerziellen Markt. Während der folgenden 2 Jahrzehnte wurden Tiefsee-Methansensorsysteme in Deutschland entwickelt, die zwar wesentlich kleiner aber unempfindlicher als MEDUSA waren, z.T. hohe Querempfindlichkeiten gegenüber anderen Spurengasen aufwiesen, oder geringe Langzeitstabilitäten aufwiesen (z.B. Marx, 1994; Esser, 2008). Entscheidend aber für einen internationalen Durchbruch ist ein Unterwasser-Messsystem,

welches breite Anwendungsmöglichkeiten, einerseits im Bereich der Off-shore Leckage-Überwachung der Öl- und Gas-Industrie (z.B. stationäre Langzeitüberwachung, mobile Leckagesuche), andererseits im Bereich der ozeanographischen Monitoring Programme (z.B. kalte und heiße natürliche Methanaustritte; Ozean/Meerwasser-Austausch von Treibhausgasen), bietet. Das bedeutet, sowohl Konzentrationen im Bereich der natürlichen Methangehalte im Meerwasser (2-3 nmol/l) als auch erhöhte CH₄-Werte im Bereich mehrerer 1.000 nmol/l müssen detektiert werden können um bei einer Leckagesuche, vom ersten Anzeichen erhöhten Methans bis zur eigentlichen Quelle zu gelangen (ohne frühzeitige Sättigung des Sensors). Eine entsprechende Analysetechnik muss daher in der Lage sein, in einer atmosphärischen Gasphase Methankonzentrationen von ca. 1 ppm bis zu mehreren 1.000 ppm reproduzierbar messen zu können. Neben Spurengas-analysemethoden wie z.B. Massenspektrometrie, IR/Raman-Spektrometrie, Cavity-Ring Down Spektrometrie, oder photoakustische Spektrometrie, hat sich vor allem die Diodenlaser-IR Spektrometrie in den letzten Jahren etabliert. Robuste, kleine, und kosteneffiziente Diodenlaser-Absorptionssysteme stehen auf dem freien Markt zur Verfügung. Nicht zuletzt aus dem letztgenannten Grund wurde diese Technik als Grundlage für das in diesem Projekt entwickelte HISEM System (High Sensitive Methane Monitoring System) gewählt.

Technische Realisierung des Sensormoduls

Die hier verwendete Sensortechnologie basiert auf der Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie im IR-Bereich, welche hervorragende Nachweisempfindlichkeiten für Kohlenwasserstoffe (hier v.a. CH₄) bietet. Die hier beschriebene Konfiguration des HISEM (Abb. 1) entspricht einer Version für 3.000 m Wassertiefe, ausgestattet mit einer gasdurchlässigen Membran (CONTROS HydroC™). Das System wurde unter Laborbedingungen in einem temperierten Kalibrierbecken (4-15 °C Wassertemperatur), welches vor dem Sensortest mit Standardgasen (1-20.000 ppm CH₄ in synth. Luft) equilibriert wurde, getestet. Ansprechzeit, Equilibrierverhalten, Nachweisgrenzen und Langzeitstabilität konnten so untersucht und optimiert werden. Das HISEM System hat innerhalb von 2 s eine Konzentrationsänderung in der Wasserphase detektiert und das Equilibrierverhalten liegt bei ca. 10 Minuten (t₆₃; Abb. 2). Die untere Nachweisgrenze des HISEM liegt bei 1 ppm mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von 5. Der Ausgabewert des Sensors (in ppm) zeigt eine gute Linearität ($R^2 = 0,99998$) gegen die bekannten Konzentrationen der Standardgase (in ppm) sowie einen Offset von ~1 ppm (Abb. 2). Dieser Zusammenhang wurde durch parallel durchgeführte Bestimmung der Konzentration von gelöstem Methan mittels diskreter Proben aus dem Equilibriertank bestätigt. Die Konzentration in den diskreten Proben wurde mittels Head Space Gaschromatographie bestimmt.

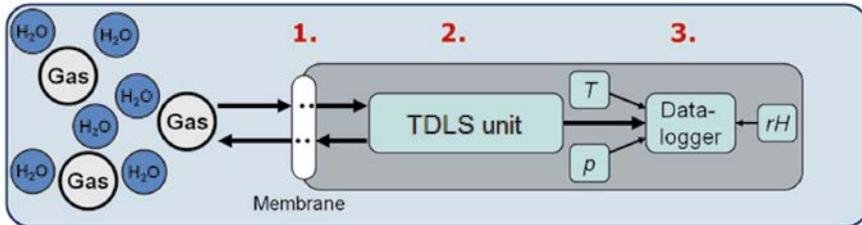


Abb. 1: (oben) Foto der druckdichten (3.000 m WT) HISEM Sensoreinheit; (unten) Prinzipskizze der internen Messzelle: 1. Austausch von Wasserdampf und Gasen durch eine hydrophobe Membran; 2. Bestimmung der Methankonzentration im Gaskreislauf durch Infrarot Absorptions Spektrometrie (Tunable Diode Laser IR Spectrometry); 3. Interne Speicherung der Konzentrationsdaten sowie relevanter physikalischer Daten (interner Druck, Aussentemperaturen, Innentemperaturen, Luftfeuchte).

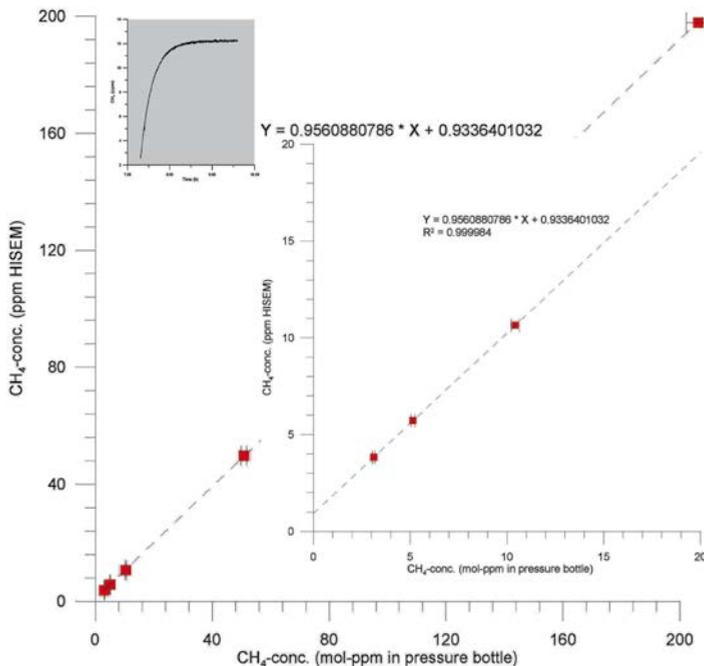


Abb. 2: Das HISEM-Signal (in ppm) ist dargestellt gegen die im Kalibrier-tank mittels Standardgasen (Konzentration in der Druckflasche in ppm) eingestellte CH₄-Konzentration. In grau unterlegt ist das Equilibrierverhalten des Sensors in dem mit 12 ppm CH₄ equilibrierten Tank.

Offshore Tests

ROV gestützte Leckagemessung an einer natürlichen submarinen Methanquelle (Santa Barbara Channel, USA)

Um die Leistungsfähigkeit des HISEM-Systems in Bezug auf die Detektion von untermeerisch ausströmenden Methans und die Integrationsmöglichkeiten beim Einsatz an einem ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug (z.B. HYSUB 20 ROV) zu testen, wurde im November 2012 in der Nähe von Santa Barbara (Südkalifornien, USA) eine dreitägige Offshore-Testfahrt durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind im Wesentlichen auch international unter Schmidt et al. (2013) publiziert. Die Messreihen fanden am „Farrar Seep“ statt, einer natürlichen am Meeresboden liegenden Kohlenwasserstoffaustrittsstelle, welche etwa 1.5 km offshore der University of California, Santa Barbara liegt (Abb. 3). Der Gasaustritt bei ca. 22m Wassertiefe ist von geringer Aktivität, und die freiwerdenden Gase setzen sich aus bis zu 90% Methan und 10% höheren Kohlenwasserstoffen zusammen (z.B. Leifer et al., 2006). Da sich die Gasblasen auflösen und ihren gasförmigen Inhalt während des Aufstiegs mit der Umgebung austauschen, bilden sich in der Wassersäule sogenannte plumes von gelöstem Methan, während der Gehalt an Kohlenwasserstoffen in den Blasen abnimmt (z.B. McGinnis et al., 2011).



Abb. 3: Offshore Testgebiet (rotes Rechteck) im Santa Barbara Channel (Südliches Kalifornien).

Im Santa Barbara Channel gibt es zahlreiche Gas- und Ölaustritte, die für die grundsätzlich erhöhte Hintergrundkonzentration von gelöstem Methan (20-100 nmol/l; Clark et al., 2000) verantwortlich sind. Um die Konzentration von gelöstem Methan während der ROV-Tauchgänge zu messen, wurde der HISEM-Sensor parallel hinter der oberen Stoßstange des HYSUB 20 montiert (Abb. 4). Die SeaBird-Pumpe am Membrankopf des HISEM hatte eine flexible Schlauchverbindung zur Ansaugöffnung im vorderen Bereich des ROVs. Mit dieser Konstruktion kann auch mittels Manipulatorarm gezielt, an ausgewählten Oberflächen, Wasser angesaugt werden, und dessen Methankonzentration bestimmt werden. Der Einstrombereich war mit einem Metallnetzfilter gegen größere Partikel geschützt und wurde kontinuierlich durch digitale Kameras online überwacht. Ein zweiter Schlauch verband die Ansaugöffnung per Y-Adapter mit einer CTD und einem kommerziellen Gerät zur Leckagedetektion (Kombination von HydroC-CH4 und Fluorometer). Ein konstanter Durchfluss im Schlauch konnte durch den Einsatz zweier SeaBird-Pumpen gewährleistet werden.



Abb. 4: (a) Einsatz des „HYSUB 20“ ROVs von Steuerbord der M/V Danny C; (b) Die HISEM Sensoreinheit (innerhalb der weißen Umrandung) konnte stossicher hinter dem vorderen ROV-Fänger montiert werden.

Am 28. und 29. November 2012 wurden am Farrar Seep zwei ROV-Tauchgänge in Nord-Süd- sowie vier Tauchgänge in West-Ost-Richtung durchgeführt (Abb. 5). Die durchschnittliche Länge eines solchen Tauchgangs betrug etwa 250 m. Außerdem wurde ein vertikaler ROV-Tauchgang im Zentrum des vermuteten Gasaustritts durchgeführt. Bei allen Tauchgängen wurden fortwährend Wassertiefe, Temperatur und Leitfähigkeit (SV48CTD, Sea and Sun Technology) sowie Daten der Methan-Sensorik (HISEM) aufgezeichnet. Dennoch wurde das ROV alle 15 m angehalten um die Gesamtmessdauer zu verlängern. Die homogene Temperatur von etwa 15.8 °C und Salinität von etwa 33.4 PSU während der Tauchgänge im November 2012 zeugt von einer gut durchmischten Wassersäule in dieser Küstenregion. Die Wassertiefe in dem Gebiet beträgt zwischen 16 und 30 Meter und die in Abbildung 5 gezeigten Tauchfahrten wurden ca. 2 bzw. 12 Meter über dem Meeresboden durchgeführt. Starke Strömungen und vor allem Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen der Strömung zwischen dem 28. und 29. November 2012 (Daten der Goleta Point-Boje, SCCOOS.org) machten die Navigation des ROVs zur Herausforderung, so dass Abweichungen vom vorgesehenen Kurs bis zu 15 m betragen.

Die Koordinaten des Farrar Seeps konnten bei 119°49.836'W und 34°24.157'N (WGS84) bestätigt werden, da CH₄-Messungen dort ein Konzentrationsmaximum zeigten, während das ROV das Gebiet in 2 m Höhe überquerte

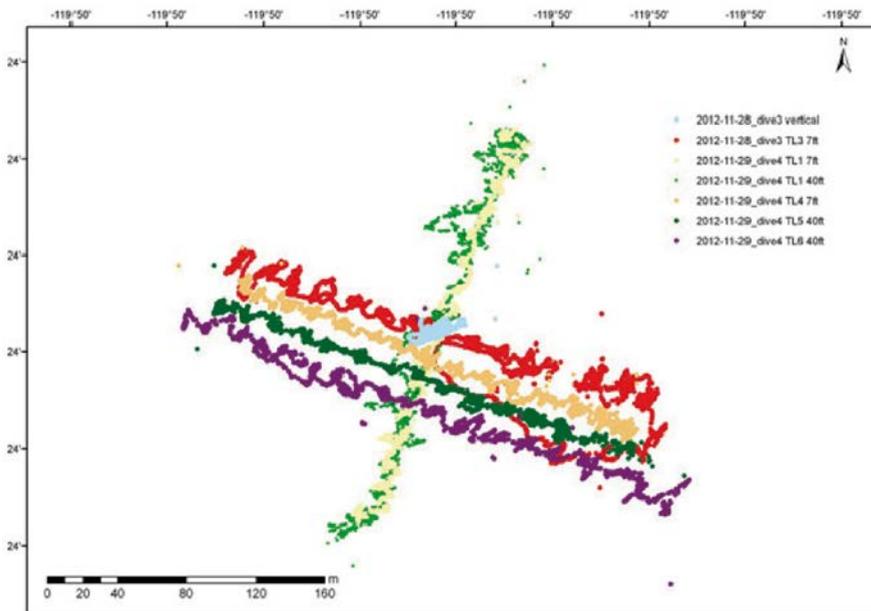


Abb. 5: Positionierungsdaten der ROV-Tauchgänge vom 28. und 29. November 2012.

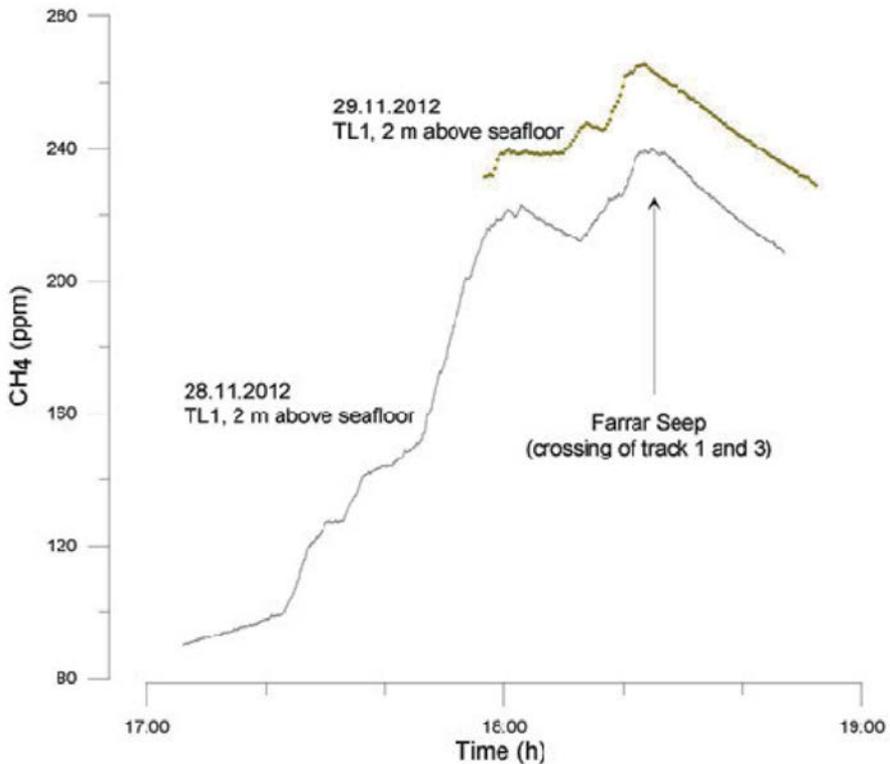


Abb. 6: Methankonzentrationsverlauf gemessen mit dem HISEM System ca. 2 m über dem Meeresboden während des ROV Tauchgangs; Track line 1 (TL1, N-S Profil) am 28. und 29. November 2012.

(bis zu 260 ppm bzw. 334 nmol/l; Abb. 6). Die Minimalkonzentration von gelöstem Methan im Testgebiet betrug ~50 nmol/l. Das Zentrum des Farrar Seeps wurde weiterhin durch Echolotmessungen des Schiffes sowie Video Aufzeichnungen über das ROV bestätigt. Zu beachten ist hierbei, dass während der Messungen im aufsteigenden Strom der Gasblasen kein Anstieg im Signal des HISEM-Sensor zu beobachten war. Der Konzentrationsverlauf vom 28. November konnte durch erneutes Abfahren der Route am 29. verifiziert werden (Abb. 6).

Abweichungen in Höhe von etwa 25 nmol/l zwischen den aufgezeichneten Methankonzentrationen im Zentralbereich des Gebietes sind wahrscheinlich den abschwächenden lokalen Strömungen geschuldet (<http://sccoos.org>). Die meeresbodennahen Wassermassen mit erhöhtem gelöstem Methan konnten bis ca. 50-150 m von der Austrittsstelle entfernt detektiert werden (Abb. 7).

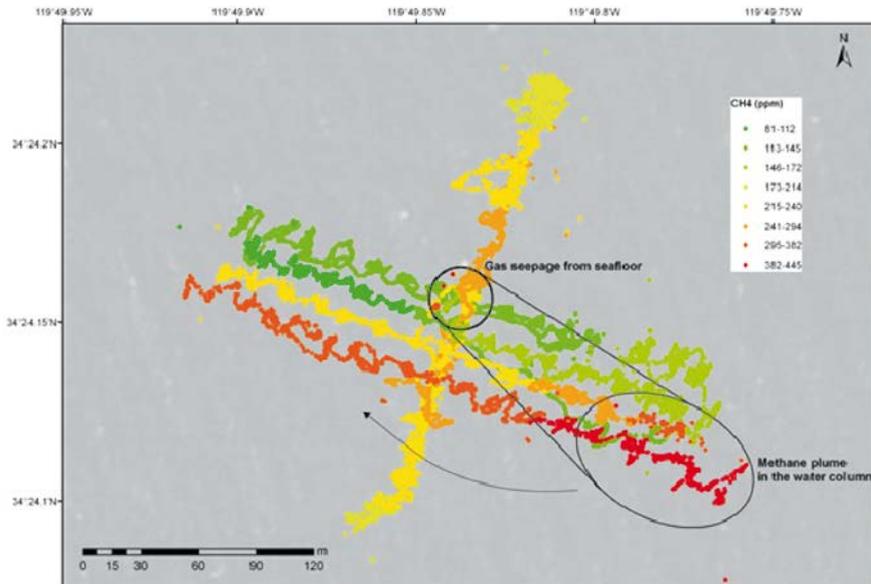


Abb. 7: Methankonzentrationsverteilung an der natürlichen Kohlenwasserstoff-Austrittsquelle „Farrar Seep“. Die mit dem HISEM System gemessenen Methankonzentrationen (ppm) entsprechen einem Konzentrationsbereich von 50-560 nmol/l bei den vorherrschenden Temperatur- und Salinitätsbedingungen.

Zusätzlich wurden Wassermassen mit hohen Methankonzentrationen (bis zu 560 nmol/l) auch östlich und südlich in etwa 12 m Höhe über dem Meeresboden nachgewiesen (Abb. 7). Grundsätzlich traten die höheren Methankonzentrationen dabei eher in südlichen Richtungen auf, was für eine vorherrschende strömungsbedingte Rotation der vom Meeresboden aufsteigenden Wassermassen von Ost über Süd nach West spricht.

Landergestützte untermeerische Langzeitmessungen von Methan an einem Blowout-Krater (Well 22/4b, GB)

Im Rahmen der Forschungsfahrt AL412 in die zentrale Nordsee wurde ein 10-tägiger Monitoring Test (27.03.-6.4.2013) für das HISEM-System durchgeführt (Linke et al., 2013). Das Testgebiet befand sich an einem durch eine Fehlbohrung erzeugten Blowout-Krater in der britischen Wirtschaftszone (Abb. 8). Aus dem Blowout strömt seit nunmehr 23 Jahren immer noch kontinuierlich Methan aus (z.B. Sommer et al., 2012) und wichtige Untersuchungsziele in den letzten Jahren sind die Quantifizierung des dort am Meeresboden ausströmenden Methans (Gasblasen), die Beschreibung der Verteilungsmuster des gelösten Methans in der Wassersäule und das Bestimmen des Beitrags zum atmosphärischen Methanhaushalt.

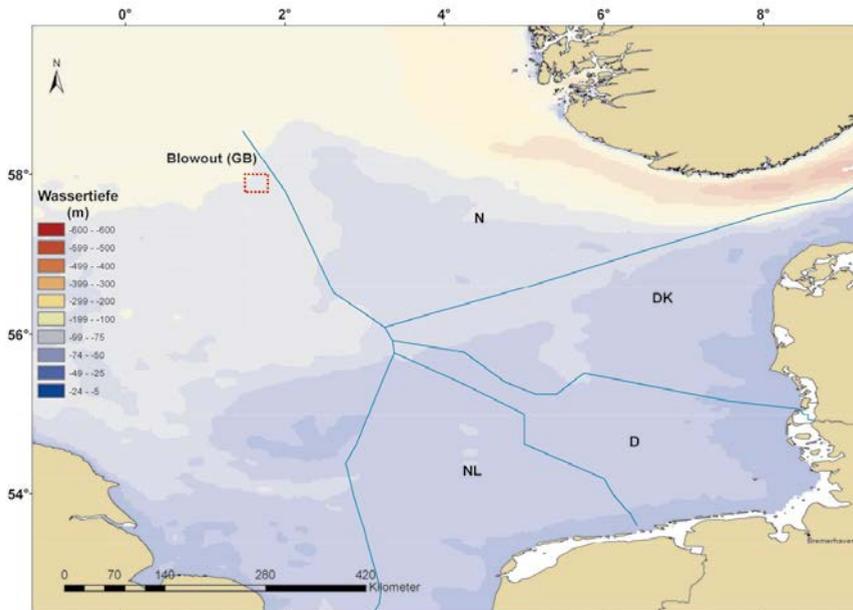


Abb. 8: Lokation des Blowout-Kraters in der britischen Nordsee (rotes Rechteck). Blaue Linien kennzeichnen die Wirtschaftszonen der einzelnen Anrainerstaaten.

Zur Charakterisierung des sich am Meeresboden ausbreitenden gelösten Methans, im Zusammenspiel mit der generell vorherrschenden Strömung, Tidenzyklen, Salz- und Temperaturverteilung in der Wassersäule, wurde am Rand des Kraters ein Lander (Abb. 9a), mit gekoppeltem CTD (SBE 37SM, SeaBird) und HISEM-System (Abb. 9b), ausgesetzt. Der Lander war zusätzlich mit einem 300 kHz ADCP (Teledyne) und mit einem Hydrofon (icListen LF, Ocean Sonics) ausgestattet. Alle Sensoren waren mit der zentralen Landereinheit verbunden, so dass mittels eines akustischen Auslösers das Gesamtsystem vom Forschungsschiff nach dem Langzeiteinsatz geborgen werden konnte.

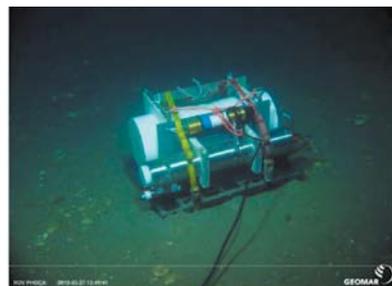


Abb. 9: (a) Zentrale Landereinheit (geeignet auch für Fischereigebiete); (b) HISEM System (Sensoreinheit und Energieversorgung).

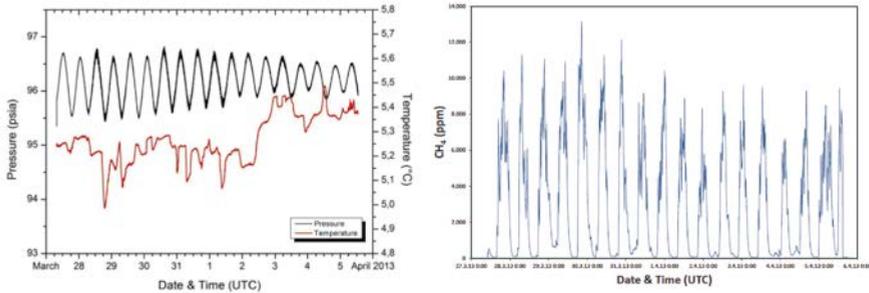


Abb. 10: (a) Mittels Speicher-CTD aufgenommene Druckmesswerte und Temperaturdaten, gemessen im Bodenwasser am Blowout-Kraterand bei 96 m WT; (b) Methan-Konzentrationsverlauf während des 10-tägigen Messeinsatzes von HISEM am Blowout.

Vorläufige Auswertungen der HISEM und CTD-Daten zeigen eine starke Abhängigkeit der CH₄-Konzentration im Bodenwasser von den Gezeitenströmungen (Abb. 10a und 10b). Die Gezeiten werden durch die Druckänderungen (Abb. 10a) exakt nachgezeichnet und Gezeitenwechsel, Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeiten können mit den ADCP-Daten (Linke et al., 2013) verifiziert werden. Die HISEM-Messungen im Bodenwasser variieren zwischen 40 und 14.000 ppm innerhalb eines Tidenzyklus (Abb. 10b). Das entspricht in etwa einem Konzentrationsbereich von 60-22.000 nmol/l. Dieser Konzentrationsverlauf konnte innerhalb des 10-tägigen Messeinsatzes wiederholt und reproduzierbar nachverfolgt werden (Abb. 10b). Eine leichte Abnahme der Konzentrationsmaxima trat ab dem 2. April 2013 auf, und korreliert ungefähr mit einer leichten Temperaturzunahme im Bodenwasser. Ob dieses mit einem geänderten lateralen Einstrom von warmen Wassermassen, oder mit vertikalen turbulenten Strömungen am Kraterand in Zusammenhang steht, muss eine detaillierte Auswertung aller physikalischen und chemischen Sensordaten zeigen. Diese befinden sich derzeit noch in der genauen Analyse.

Zusammenfassung und Ausblick

Das HISEM-System ist in erster Linie sowohl für die sogenannten „Pre-site Environmental Surveys“ als auch für die Früherkennung von Öl- und Gasleckagen an untermeerischen Installationen der Öl- und Gasindustrie entwickelt worden. Dort wo es zu keinen akustisch/optisch sichtbaren Gasblasen kommt, sondern lediglich zu geringsten Konzentrationsanreicherungen von Methan, über dem normalen Hintergrund (2-3 nmol/l), kann das System hervorragend als Überwachungssystem verwendet werden. Das HISEM-System kann u.a. an ROVs, AUVs, geschleppten Videoschlitten, sowie Dauermessstationen angepasst und entsprechend integriert werden. Eine

derartige Kopplung von hochempfindlicher Sensorik mit Standard-Offshore Unterwasserplattformen ist allerdings sowohl für die Offshore Industrie als auch für die marine Forschung interessant. Dies wird durch vorliegende Anfragen aus diesen beiden Märkten bereits bestätigt.

Da das gefertigte HISEM-System als langzeitstabiles CH₄-Nachweissystem entwickelt worden ist, sehen wir spezielle Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der nationalen/internationalen marinen Forschung. Eine Integration der Sensorik in Dauermessstationen, wie z.B. das in Deutschland zurzeit entstehende Modulare multidisziplinäre Meeresboden-Observatorium (MoLab) liegt nahe. Standardsensorsysteme für höhere CH₄-Konzentrationen sind für die dort geforderten Wassertiefen von bis zu 6.000 m marktreif, aber für wissenschaftliche Fragestellungen, wie z.B. die Untersuchungen der Ausbreitungscharakteristiken von CH₄ an natürlichen Kalten und Heißen Quellen in der Tiefsee, nicht ausreichend empfindlich.

Weiterhin kann das Küstennahe Monitoring an Messpfählen (Nationales Nordsee-Küstenmonitoring wie COSYNA; Internationales Ostsee Monitoring Netzwerk) um einen wertvollen Parameter zur Indikation von Sediment/ Organik Akkumulationen, Faulschlamm-bildung, Eutrophierung etc. erweitert werden.

Wir erwarten ebenfalls den Einsatz des HISEM-Systems bei der Langzeitbeobachtung von Gashydratlagerstätten am Meeresboden. Das HISEM-System kann hier wertvolle Informationen zur Früherkennung von Gashydrat-Destabilisierungsprozessen geben, die in der Folge zu untermeerischen Hangrutschungen oder Gas-Blowouts führen können.

Danksagungen

Die in diesem Beitrag zusammengefasste HISEM-Entwicklung wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Förderkennzeichen 03SX301(A) gefördert. Wir danken dem Projektträger Jülich (R. Fiedler) für die Projektbetreuung. Logistische Unterstützung bei den ROV-Adaptionen und den Offshore Tests wurden von Wintershall Noordzee, Chevron und ExxonMobil geleistet. Viele Hände im Labor, „Back-office“ und auf den Forschungsschiffen haben zum Gelingen dieser Entwicklung beigetragen (u.a. A. Bodenbinder, J. Bohlen, S. Cheridnichenko, P. Fietzek, S. Marx, D. Saturov).

Literatur

Clark J.F., Washburn L., Hornafius, J.S., Luyendyk, B.P. (2000) Dissolved hydrocarbon flux from natural marine seeps to the Southern California Bight. *Journal of Geophysical Research*, 105 (C5), 11509-11522.

Esser, D. (2008) „Vorrichtung zur Erfassung von Messdaten.“ Patent number: DE10 2006 035 788 A1, filing date: 28. Juli. 2006, Issue date 31. Jan. 2008.

Leifer, I., Clark, J., Luyendyk, B. (2006) Simulation of a Subsurface Oil Spill by a Marine Hydrocarbon Seep. MMS OCS Study 2006-050. Coastal Research Center, Marine Science Institute, University of California, Santa Barbara, California. MMS Cooperative Agreement Number 14-35-01-00-CA-31063. 81pages

Linke, P. and Shipboard Scientific Party (2013) RV ALKOR Fahrtbericht/ Cruise Report AL412 22.03.-08.04.2013 Kiel – Kiel GEOMAR Report, N. Ser. 009. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel, Germany, 33 pp. DOI 10.3289/GEOMAR_REP_NS_9_2013.

Marx, S. (1994) „Untersuchung von Methansensoren zur Entwicklung eines Methandetektors im Meerwasser“. Diplomarbeit an der Fachhochschule Lübeck im Studiengang Physikalische Technik/Fachbereich Angewandte Naturwissenschaften Durchgeführt am Institut für Physikalische Technik/GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH.

McGinnis, D. F., M. Schmidt, T. DelSontro, S. Themann, L. Rovelli, A. Reitz, and P. Linke (2011) Discovery of a natural CO₂ seep in the German North Sea: Implications for shallow dissolved gas and seep detection, *J. Geophys. Res. (Oceans)* 116, C03013, doi: 10.1029/2010JC006557.

Michaelis, W. and Weitkamp, C. (1990) Method and apparatus for the de-tecton of hydrocarbons dissolved in boddies of water. Patent number: 4943161; filling date: 29. Nov. 1988; issue date 24. Jul. 1990.

Schmidt M., Linke P., Esser D. (2013) Recent development in IR-sensor technology for monitoring subsea methane discharge. *Marine Technology Society Journal* 47 (3), 27-35.

Sommer, S., Schmidt, M., Linke, P. (2012) Dissolved methane plume mapping using Membrane Inlet Mass-Spectrometry (MIMS) at a blowout site in the North Sea. EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria. *Geophysical Research Letters*; 11118.

Wernicke, G., Flöser, G., Korn, S., Michaelis, W., Weitkamp, C. (1991) „Device for the insitu determination of methane in sea water“. Report GKSS 91/E/44, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH.

DYPIC – Dynamic Positioning in Ice

Andrea Haase und Peter Jochmann,
Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA)

1 Einleitung

Laut Schätzungen des U.S. Geological Survey (USGS) liegen in der Arktis ca. 22% der weltweit unentdeckten und technisch förderbaren Öl- und Gasvorkommen. Die Erschließung dieser Quellen ist ein Hauptantriebsmotor der Offshore- und Schifffahrtsaktivitäten in der Arktis. Aktuelle Projekte befinden sich im westlichen und östlichen Teil der russischen Arktis, der kanadischen Arktis, der US-amerikanischen Beaufort See sowie in den eisbedeckten Regionen des Kaspischen Meeres und des Golfs von Bohai, China. Die möglichen Öl- und Gasvorkommen befinden sich zum Teil auch in tieferen Gewässern, in denen das Verankern (z.B. von Bohrschiffen und Versorgungsschiffen) aufwändig und unpraktisch bzw. unmöglich ist, und lässt somit die Nachfrage nach „Station Keeping“ (dt. = die Position halten) unter Eisbedingungen ansteigen. Aber auch in der sonstigen Erforschung der Arktis und Antarktis müssen Schiffe während ihrer Arbeit in eisbedeckten Gewässern ihre Position halten können. In nicht eisbedeckten Gebieten wird zum „Station Keeping“ dynamisches Positionieren (DP) eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein computergesteuertes System mit dessen Hilfe ein Schiff seine Position in drei Freiheitsgraden (Längsbewegung, Querbewegung und Gieren (Drehung um die Hochachse)) hält und dazu ausschließlich sein eigenes Propulsionssystem nutzt. Im Gegensatz zur Anwendung im offenen Wasser ist die Anwendung von DP in eisbedeckten Gewässern wenig bis gar nicht erprobt. Das Vorhaben „Entwicklung, Herstellung und Test eines Systems zum dynamischen Positionieren im Eis“, ist Teil des ERA-NET MARTEC Verbundvorhabens „DYPIC – Dynamic Positioning in Ice“ und soll die Lücke zwischen DP im Wasser und DP im Eis ein Stück weit schließen. Im Folgenden wird das Verbundvorhaben als „Verbundvorhaben“ oder „DYPIC“ bezeichnet und das darin enthaltene Vorhaben als „Vorhaben“. Dieser Beitrag bezieht sich dabei vorrangig auf die Beschreibung und Ergebnisse des Vorhabens. Eine detaillierte Beschreibung ist in [12] zu finden.

2 Projektbeschreibung

2.1 Allgemeines zum Verbundvorhaben

Um die Lücke zwischen DP im Wasser und DP im Eis zu verkleinern, soll im Rahmen des Verbundvorhabens ein Werkzeugkasten erstellt werden, der es ermöglicht, im Modellversuch die DP „Station Keeping“ Möglichkeiten für

unterschiedliche Schiffe und Offshore Strukturen unter verschiedenen Eisbedingungen vorherzusagen. Das Kernstück des Werkzeugkastens ist dabei ein DP System für Modellversuche, das über die Veränderung bestimmter Parameter an unterschiedliche Bedingungen angepasst werden kann. Es soll ermöglicht werden, ein DP-System für die Großausführung schon anzupassen, bevor sich das Schiff in Gewässern mit Eisvorkommen bewegt und somit die Kosten für die Inbetriebnahme dramatisch zu senken. Das oben genannte Modell DP System existiert zu Beginn des Verbundvorhabens noch nicht – es ist also Kernziel ein solches System zu entwickeln, zu bauen und zu erproben. Die inhaltliche Arbeit teilt sich dabei in insgesamt fünf Arbeitspakete mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Diese werden im Verbundvorhaben von sechs internationalen Partnern in einem Zeitraum von drei Jahren (2010 bis 2012) bearbeitet. Es handelt sich um Partner aus Industrie und Forschung aus Frankreich, Norwegen und Deutschland – namentlich um die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA), Kongsberg Maritime AS (Kongsberg), Statoil Petroleum AS (Statoil), Det Norske Veritas (DNV), die Norwegian University of Science and Technology (NTNU) und Sirehna. Die Arbeit eines jeden Partners wird dabei auf nationaler Ebene gefördert. Die Aufgaben der HSVA im Rahmen des nationalen Vorhabens beziehen sich dabei naturgemäß sehr auf Modellversuche im Eis, die an vielen Stellen für die Entwicklung und Erprobung des DP Systems benötigt werden.

2.2 Inhaltliche Arbeiten des Verbundvorhabens und des nationalen Vorhabens

Das Arbeitspaket 1 beschäftigt sich mit der Analyse derzeitiger Methoden und Techniken in Bezug auf DP. Die HSVA widmet sich hierbei insbesondere den Grenzen des Einsatzes von DP Systemen in Eisversuchsbecken. In Arbeitspaket 2 werden die wissenschaftlichen und technischen Anforderungen an das DP System definiert. Die HSVA stellt dabei die Anforderungen an DP Versuche im Eisversuchsbecken zusammen. Dazu werden auch bereits durchgeführte Modellversuche nachausgewertet. Im dritten Arbeitspaket wird der Einfluss verschiedener Eisformationen auf das dynamische Positionieren untersucht. Hauptaufgabe der HSVA ist es hierbei ihre Erfahrung aus Modellversuchen und Großausführungsmessungen einzubringen und bei der Definition von Parametern für DP Systeme aus Modellversuchen und deren Ermittlungstechniken mitzuwirken. Das Arbeitspaket 4 beinhaltet das Kernziel des Verbundvorhabens, nämlich die eigentliche Entwicklung und Fertigung des DP Systems. Die HSVA trägt dazu bei indem sie das Anforderungsprofil an das System sowie Hard- und Software Schnittstellen zu bestehendem Versuchszubehör definiert. Auch ist eine wichtige Leistung der HSVA in Arbeitspaket 4 die Durchführung von Modellversuchen um die benötigten Parameter für die Entwicklung des DP Systems zu ermitteln. Im fünften und letzten Arbeitspaket geht es um die Optimierung und den Test des DP Systems. Die HSVA rüstet dazu ihre bestehende Versuchseinrichtung dahingehend

auf, dass Versuche mit Modellen mit bis zu sechs Ruderpropellereinheiten im kabellosen Betrieb möglich sind, definiert Testprozeduren und führt die eigentlichen Versuche durch. Das DP System besteht dabei aus einem Rechner, indem Soll- und Ist-Position des Modells abgeglichen werden und der Schub, der benötigt wird um die Position zu halten, auf die einzelnen Propulsionseinheiten umverteilt wird. Neben diesem Herzstück gehören zum DP System ein Touchscreen der das MMI (Man Machine Interface) darstellt, ein Joystick und ein Schaltschrank, der auch die Hardware für die digitalen und analogen Schnittstellen zu Mess- und Steuerungssystemen der HSVA beherbergt. Alle Schnittstellen sind analog und digital verfügbar. Im Wesentlichen werden Ist-Position des Modells, Propellerdrehzahl und Ruderwinkel der Antriebe vom HSVA System an das DP System übergeben. Zurückgeliefert werden Sollwerte für Propellerdrehzahl und Ruderwinkel mit denen das Modell dann gesteuert wird. Angepasst wird das DP System an die jeweiligen Bedingungen hauptsächlich über Schiffs- und Propulsionseinheiten bezogene Größen.

3 Modellversuche

3.1 Allgemeines zu den durchgeführten Modelversuchen

Im Rahmen von DYPIC wurden zwei verschiedene Modelle untersucht: Ein Bohrschiff, das Arctic Drill Ship (ADS) und ein Forschungsschiff, das Polar Research Vessel (RV). Somit ist aus jedem Hauptanwendungsbereich – kommerzielles Fördern von Öl und Gas und allgemeine Forschung – ein Schiffstyp vertreten. Die Hauptschiffsdaten der untersuchten Modelle sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen. Neben Typ und Geometrie unterscheiden sich die Schiffe durch die Anzahl und Anordnung ihrer Propulsionseinheiten. Schematisch sind diese in Abbildung 1 (rechts) skizziert. Weiter sind in Abbildung 1 (links) die untersuchten Test Setups dargestellt. In den Versuchsanordnungen 1, 2 und im Fixed Mode wird dabei die Relativbewegung zwischen Eis und Modell durch eine Bewegung des Schiffes durch Eis abgebildet. In der Modellversuchspraxis gibt ein Schleppwagen die Bewegung vor und das Modell soll relativ zu diesem seine Position halten. Dazu wird in den Versuchsanordnungen 1 und 2 ein Optical Motion Capture System eingesetzt (im „Fixed Mode“ entfällt dieses, da das Modell fest mit dem Schleppwagen verbunden ist). Versuchsanordnung 1 und 2 unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, dass in Versuchsanordnung 1 der Schleppwagen die Bewegung in nur einem Freiheitsgrad (engl.= degree of freedom (DOF)) – nämlich in Tanklängsrichtung vorgibt während in Versuchsanordnung 2 zwei Freiheitsgrade – Längs und Querbewegung – vorgegeben werden. In Setup 3 wird das Eis relativ zum Modell bewegt, das in der Mitte des Tanks ruht und dort seine Position halten soll. Der Schleppwagen ist in Abbildung 1 schematisch als grauer Kasten dargestellt. Die Versuchsanordnungen mit ihren Vor- und Nachteilen sind im Detail in [9] beschrieben.

Tabelle 1: Hauptschiffsdaten des Polar Research Vessel

Hauptschiffsdaten		Model (HSVA Nr. 4638)	Schiff
Maßstab	λ [-]	18.6	
Länge	LPP [m]	4.682	87.09
Breite	BDWL [m]	1.061	19.74
Tiefgang	TDWL [m]	0.403	7.5
Verdrängung	VolM [m ³]	1.341	8626
Metazentrische Höhe	GM [m]	0.24	4.48

Tabelle 2: Hauptschiffsdaten des Arctic Drill Ships

Hauptschiffsdaten		Modell (HSVA Nr. 4469)	Schiff
Maßstab	λ [-]	30	
Länge	LPP [m]	6.13	184
Breite	BDWL [m]	1.37	41.33
Tiefgang	TDWL [m]	0.4	12
Verdrängung	VolM [m ³]	2.535	68457
Metazentrische Höhe	GM [m]	0.357	10.71

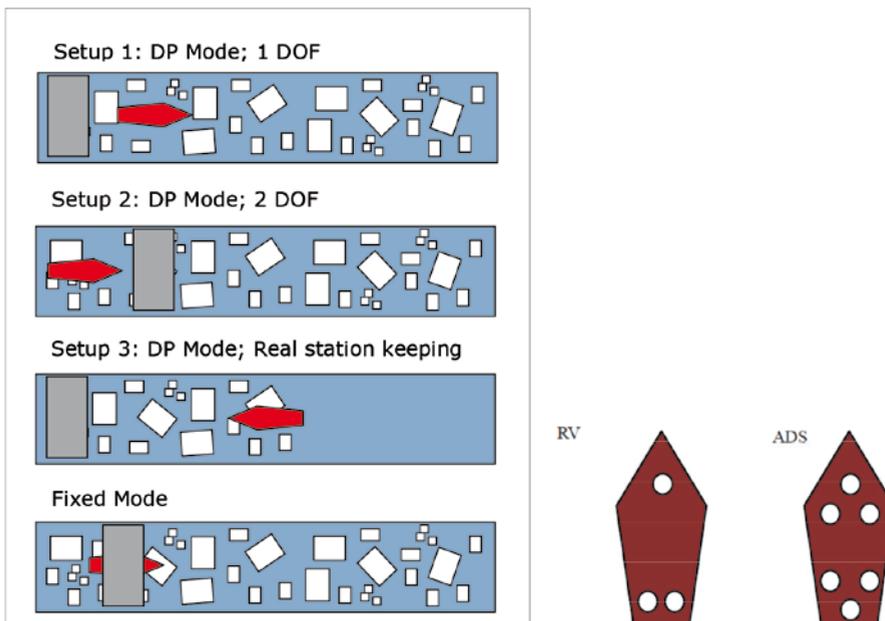


Abbildung 1: Skizze mit der untersuchten Versuchsanordnung (links) und Anordnung der Antriebe bei den verwendeten Modellen (rechts), [10]

3.2 Modellversuche Phase I

Die Versuche der DYPIC Phase I beziehen sich auf die Arbeiten des Arbeitspaketes 4. Kernaufgabe ist es hierbei, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, das DP System zu entwickeln. Vorrangiges Ziel der Versuche war es somit zunächst über eine Parameterstudie die auf das Modell wirkenden Eislasten unter unterschiedlichen Bedingungen zu ermitteln. Die Zeitschriebe der Eislasten werden im Anschluss an die Versuche genutzt um einen Simulator zu speisen mit Hilfe dessen die Algorithmen des DP Systems entwickelt werden. Nebenziel der Versuche ist es Daten zu erfassen mit denen ein numerisches Eislastenmodell verifiziert werden kann. Dieses numerische Modell wird von der NTNU entwickelt und dient auch der späteren Optimierung des DP Systems. Details zum Modell sind [3], [4], [5] und [6] zu entnehmen. Da in Phase I die Eislastenermittlung im Vordergrund stand wurden Versuche im Setup 1 und im „Fixed Mode“ durchgeführt. Es wurden beide Modell (ADS und RV) untersucht. Für beide Schiffsvarianten wurden jeweils 5 Eisdecken hergestellt. In 3 Eisdecken wurden freifahrende Propulsionsversuche durchgeführt während der Schrägschleppwiderstand jeweils in 2 Eisdecken bestimmt wurde. Es wurden insgesamt pro Schiffstyp 52 Versuche durchgeführt. Variiert wurden hierbei die Parameter Schollengröße (große rechteckige Schollen und kleine dreieckige Schollen), Bedeckungsgrad (7/10 und 9/10), Eisdriftgeschwindigkeit (0.25 und 0.5 Knoten) und die Eisdrift-richtung (0°, 5° und 10°). Die Eisparameter, Eisdicke und Biegefestigkeit, wurden für jeden Versuch bestimmt und so gut es der Versuchsbetrieb erlaubt konstant gehalten. In Abbildung 2 sind Impressionen der Versuche der Phase I zu sehen. In Abbildung 3 sind die vier untersuchten „Managed Ice“ Felder abgebildet (Feld 1 = große Schollen, 9/10 Bedeckung, Feld 2= große Schollen, 7/10 Bedeckung, Feld 3 = kleine Schollen, 7/10 Bedeckung, Feld 4 = kleine Schollen, 9/10 Bedeckung). Details zu Phase I sind in [2] zu finden.



Abbildung 2: Impressionen aus den Versuchen der Phase I; Modell im „Fixed Mode“ (Phase I, Run 5400) (links) und Modell im DP Mode (Phase I, Run) (rechts), [12]

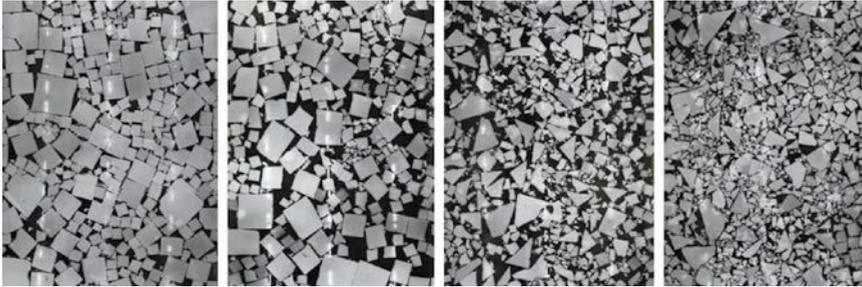


Abbildung 3: Untersuchte „Managed Ice“ Felder in der Phase I

3.3 Modellversuche Phase II

Nach den Versuchen der Phase I wurden wie oben erwähnt mit Hilfe der in Phase I gewonnenen Daten Simulationen unterschiedlicher Art durchgeführt. Sie dienen der Entwicklung des eigentlichen DP Systems, das nun zu den Versuchen der Phase II zur Verfügung steht. Kernziel der Phase II ist die Erprobung und Optimierung des DP Systems. Nebenziele sind die weitere Sammlung von Daten zur Verifizierung des oben genannten Eislastenmodells aber auch die Entwicklung von Versuchsprozeduren zur Ermittlung der „Station Keeping“ Möglichkeiten von Schiffen. Dazu wurde neben dem Setup 1 und dem „Fixed Mode“ zusätzlich mit den Setups 2 und 3 experimentiert. Insgesamt wurden in Phase II 14 Testserien je ca. 4 Testläufen durchgeführt. Wieder wurden beide Modelle untersucht, wobei mehr Augenmerk auf dem ADS lag. Neben „Managed Ice“ Feldern wurde diesmal auch Level Ice, Brash Ice und Presawn Ice untersucht. Bei den variierten Parametern handelt es sich wie in Phase I vorrangig um Eisdriftwinkel und die Driftgeschwindigkeit, aber auch die Eisdicke wurde diesmal variiert. Die Driftwinkel betragen vorrangig wieder 0° , 5° und 10° ; in einigen Versuchen in denen es darum ging, die Grenze des DP Systems und des Schiffes zu ermitteln, wurde der Eisdriftwinkel bis auf 90° (also lateraler Eisangriff) erhöht; als Geschwindigkeiten wurden 0.25 und 0.5 Knoten untersucht. Die meisten der oben genannten Versuche wurden mit dem neuen DP System der Firma Sirehna durchgeführt, einige Versuche zum Benchmark wurden mit einem System der Firma Kongsberg wiederholt. In Abbildung 4 sind Impressionen der Versuche der Phase II zu sehen. In Abbildung 5 sind die vier untersuchten „Managed Ice“ Felder abgebildet. Sie unterscheiden sich von den Feldern der Phase I dadurch, dass sie einen Brash Ice Anteil enthalten, der die Felder realistischer aussehen lässt. Auch wurde auf eine Veränderung der Schollenform (von rechteckig zu dreieckig) verzichtet. Details zu Phase II sind in [10] zu finden.

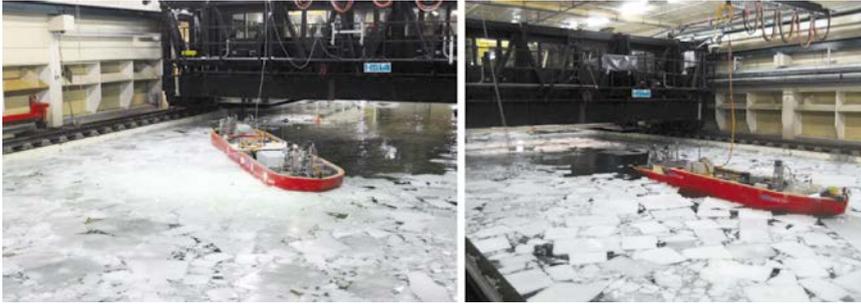


Abbildung 4: Impressionen aus den Versuchen der Phase II; Bohrschiff hält im Modelversuch per DP seine Position unter erheblichem Rafted Ice Bedingungen (Phase IIB, Run 12300) (links). Eindruck eines Versuchs aus TA 5.4 (Phase IIA Run 03300) (rechts), [12]

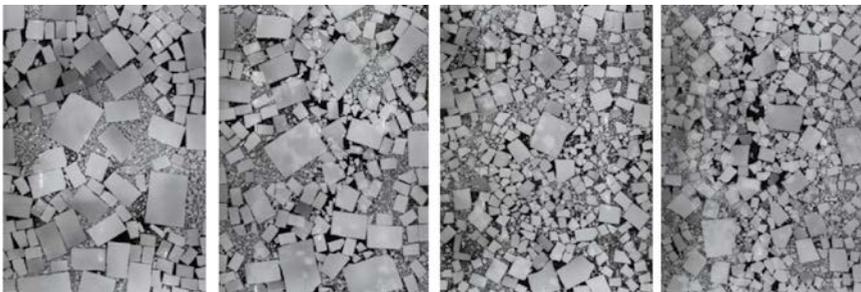


Abbildung 5: Untersuchte „Managed Ice“ Felder mit Brash Ice Anteil in der Phase II

4 Hauptergebnisse des Projektes

4.1 Hauptergebnis: DP System für Modelversuche im Eis

Das unter 2.2 bereits umrissene DP System ist wie erwähnt Kernstück des Verbundvorhabens. Es zeichnet sich gegenüber anderen DP Systemen dadurch aus, dass es variabel für Eis und offen Wasser genutzt werden kann – dazu werden einfach die unterschiedlichen Kontrollalgorithmen aktiviert – und dadurch, dass es über einen Satz von Parametern an unterschiedliche Schiffsmodelle angepasst werden kann. Die Parameter, die letztendlich definiert wurden um das DP System anpassbar zu machen, sind im Wesentlichen geometrische Angaben des Schiffes und Angaben zum Propulsionssystem. Um den Einfluss des Ruderwinkels zu berücksichtigen können im gelieferten Modell DP System sogenannte „Forbidden Zones“ definiert werden. Diese verbieten dem Ruderpropeller schlichtweg einige Positionen einzunehmen, in denen er die anderen Ruderpropeller ungünstig beeinflussen könnte. Eine Liste der einzustellenden Parameter ist in Tabelle 2 zu finden.

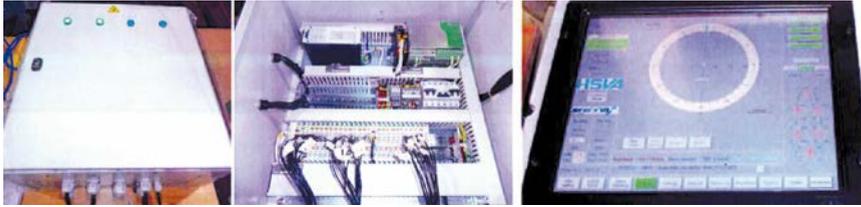


Abbildung 6: Haupt-Hardware-Komponenten des DP Systems : Das Kabinett geschlossen (links) und geöffnet (Mitte) und der Touchscreen der MMI (Man Machine Interface) (rechts)

Tabelle 3: Individuell einstellbare Parameter für DP-Modellversuche im Eis

Allgemeine Parameter:
Maßstabsfaktor
Parameter vom Schiff:
Schiffstyp (Anzahl und Art der Propulsionseinheiten und deren prinzipielle Lage)
Massenschwerpunkt
Länge zwischen den Loten
Länge über Alles
Breite in der Wasserlinie
Tiefgang
Verdrängung
Massenträgheitsmoment um die Hochachse
Hydrodynamische Masse in Längs- und Querrichtung und um die Hochachse
Parameter der Propulsionseinheit
Typ der Propulsionseinheit (Tunnel Thruster oder Azimuth Thruster)
Position der Einheit bezogen auf die Schiffslängs- und Querachse
Maximale Drehzahl des Propellers
Schub/Drehzahl-Relation des Propellers
Leistung/Drehzahl-Relation des Propellers
Maximale Steigung der Propellerdrehrate
Maximale Steigung der Azimutwinkeldrehrate (für Azimuth Thruster ausschließlich)
Verbotene Zone beim Azimutwinkel (für Azimuth Thruster ausschließlich)
Hydrodynamische Parameter
Lineare hydrodynamisch Dämpfung in Schiffslängs- und Querachse und um die Gierachse
Manövrierkoeffizienten

Bilder von der DP Hardware sind in Abbildung 6 zu sehen. Zur Kommunikation bzw. Datenaustausch zwischen dem DP-Computer, dem HSVA Regelungssystem, das auf Basis einer Siemens S7 Steuerung aufgebaut ist und dem HSVA Messwerterfassungssystem bedarf es der Definition einer Hardware und einer Software Schnittstelle. Es wurde entschieden zwei vollwertige parallele Schnittstellen zur Verfügung zu stellen. Eine Analoge und eine Digitale mittels einer Kombination aus RT-Protokoll und Modbus. Beide Schnittstellen werden voll hard- und softwaremäßig unterstützt. Details zum DP System und dessen Entwicklung sind in [1], [7], [8] und [11] zu finden.

4.2 Hauptergebnis: Versuchsverfahren zur Ermittlung der „DP Station Keeping Capability“ von Schiffen im Modellversuch

Im Rahmen von DYPIC wurden verschiedene Versuchsprozeduren zu verschiedenen Zwecken entwickelt. Zur Ermittlung von Eislasten werden systematische Parametervariationen wie in Phase I empfohlen. Wobei sich hier der Einsatz von DP dadurch auszeichnet, dass die Propulsor realistisch laufen und trotzdem ein bestimmter Punkt gut untersucht werden kann (bei manueller Steuerung ist die Einhaltung eines bestimmten Driftwinkel z.B. kaum möglich, im „Fixed Mode“ wiederum wird die Eis-Modell-Interaktion zum Teil verfälscht). Zur Ermittlung der „Station Keeping“ Möglichkeiten eines Schiffes werden wie in Phase II Versuche empfohlen, in denen ähnlich wie in Phase I Parameterstudien durchgeführt werden. Dazu werden zunächst Punkte untersucht bei denen man davon ausgeht, dass das DP System sie bewältigen kann. Die Abweichung von Ist- und Sollposition kann dann grafisch wie in Abbildung 7 gezeigt, gut dargestellt und bewertet werden. Zeichnet sich ab, dass das Gesamtsystem mehr leisten kann, können Extrempunkte wie der laterale Eisangriff untersucht werden. Um die Möglichkeiten noch weiter auszuloten haben sich Versuche bewehrt, in denen die Eisbedingungen weiter verschärft werden (dickeres und festeres Eis) oder die Schiffsmanöver komplizierter werden wie z.B. bei Drehkreisen und Sternmanövern. So war im

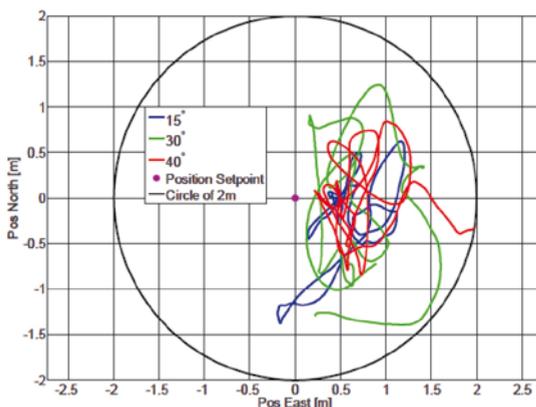


Abbildung 7: Beispiel einer Darstellung von Soll- und Ist Position eines Modells im Versuch bei Driftwinkeln von 15°(blau), 30° (grün) und 40° (rot), [6]



Abbildung 8: Drehkreis im „Station Keeping“ Mode des DP Systems mit dem Bohrschiff (Phase IIA, Run 06100; Photo: Trondlsaksen / Statoil) (links) und Sternmanöver im Joystick Mode des DP Systems mit dem Forschungsschiff (Phase IIA, Run) (rechts), [12]

Modellversuch mit dem Bohrschiff ein Drehkreis in Level Ice im „Station Keeping Mode“ machbar, für das Forschungsschiff jedoch nicht. Hier gelang noch ein mit dem Joystick Mode des DP System gefahrenes Sternmanöver. Impressionen dieser Versuche sind in Abbildung 8 zu sehen.

5 Nebenergebnisse des Projektes

5.1 Nebenergebnis: Verfahren zur Herstellung, Dokumentation und Auswertung von Managed Ice

Um die vier verschiedenen „Managed Ice“ Felder wie oben erwähnt an einem Tag zu ermöglichen wurde ein eigenes Verfahren entwickelt. Zunächst wird eine geschlossene Eisdecke gefroren. Eine definierte Länge an Eis wird dann aus dem Versuchsbecken entfernt. Der Rest wird entsprechend eines Schnittplanes in Schollen geschnitten. Die Schollen werden auf einer definierten Fläche des Tanks verteilt um eine definierte Bedeckung zu erzielen. Es wird der erste Versuch gefahren. Danach werden die Schollen auf einer

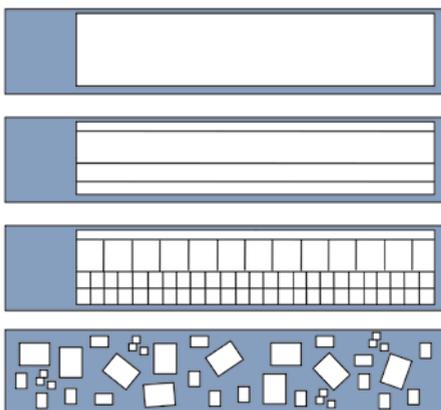


Abbildung 9: Skizze zur Herstellung von definierten „Managed Ice“ Feldern in Eisversuchsbecken

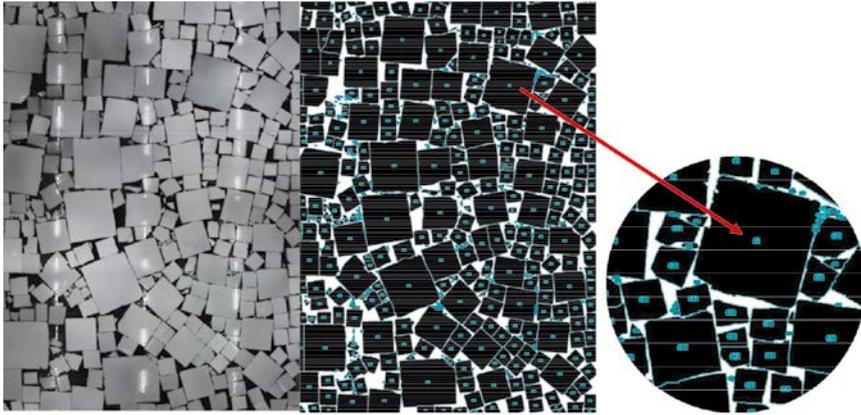


Abbildung 10: Dokumentation vom „Managed Ice“ Feld und deren Bildanalyse

größeren Fläche neu verteilt um eine niedrigere Konzentration zu erzielen. Es wird der zweite Versuch gefahren. Anschließend werden für den dritten Versuch die Schollen in kleinere geschnitten. Für den vierten Versuch werden diese dann wieder auf einer kleineren Versuchsfläche verteilt. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Zur Dokumentation der Felder werden Fotos vom Tank aus der Vogelperspektive gemacht. Die Einzelbilder werden zu einem großen Bild zusammengefügt (siehe Abbildung 10 (links)). Das Bild wird in schwarz weiß gewandelt, die Schollen werden einzeln vom Hintergrund abgegrenzt (siehe Abbildung 10 (mitte und rechts)) und

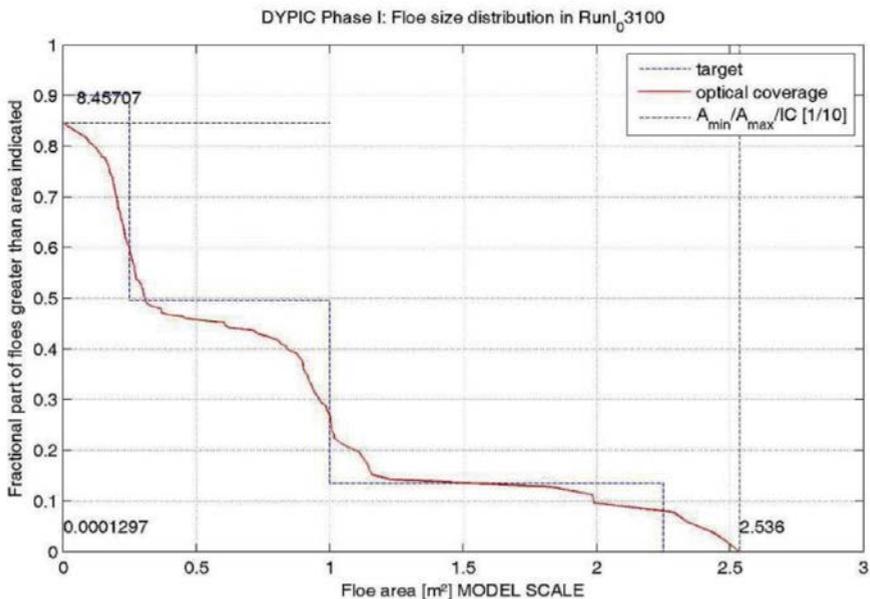


Abbildung 11: Darstellung der Ergebnisse der Bildanalyse von einem „Managed Ice“ Feld



Abbildung 12: Schiffmodell ausgerüstet mit sechs einheitlichen Ruderpropellern; dargestellt sind die drei Ruderpropellereinheiten des Bugs über (links) und unter Wasser (rechts), [12]

jeder Scholle wird ihre Größe zugewiesen. Aus der Summe der Eisflächen und der bekannten Gesamtfläche wird die Konzentration ermittelt. Auch die Schollengrößenverteilung wird aus den so erzielten Ergebnissen berechnet. Sie wird als Verteilungsfunktion zusammen mit der Konzentration und der maximalen Schollengröße in einem Diagramm wie in Abbildung 11 zu sehen dargestellt.

5.2 Nebenergebnis: Modellversuche mit Schiffen mit bis zu sechs Ruderpropellereinheiten

Zu Beginn des Vorhabens standen der HSVA 4 kleine und 2 große Ruderpropellereinrichtungen zur Verfügung. Für die Versuche mit einem Bohrschiff werden jedoch 6 kleine Einrichtungen benötigt. Fertigungszeichnungen und Herstellungserfahrung sind in der HSVA vorhanden. Es wurden im Rahmen des Vorhabens 2 Messeinrichtungen für Ruderpropeller hergestellt. Dabei wurden Teile externer Hersteller und eigengefertigte Teile verbaut. Der Zusammenbau und die Kalibrierung erfolgten in der HSVA. Bei den externen Teilen handelt es sich um die Getriebe, die Motoren und die Kraftmessdosen. Bei den internen Teilen handelt es sich um die Gesamtkonstruktion, die am Ende, alle Komponenten beheimatet und ihr Zusammenspiel erlaubt. Des Weiteren wird erst durch die Eigenkonstruktion der Einbau in ein Schiffmodell ermöglicht. Beispiele dieser Ruderpropellereinheiten im Modell sind in Abbildung 12 zu sehen.

5.3 Nebenergebnis: Kabelloser Modelbetrieb

Zur Durchführung von Propulsionsversuchen im Eis, ist das Modell mit dem Schleppwagen im großen Eistank der HSVA üblicherweise mit Versorgungskabeln für die Propellerantriebe verbunden. Die Powerkabel übertragen die Energie, 400V AC und 24V DC, während die Steuerdaten über ein Siemens



Abbildung 13: Modell im kabelgebundenem (Phase IIA, Run 07400) (links) und kabellosen Versuchsbetrieb (Phase IIB, Run 09102) (rechts), [12]

Profibus-Kabel übertragen werden. Diese Verbindung erschwert nicht nur die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade des Schiffes, welche von einem optischen Echtzeit Positionserfassungssystem, Typ QUALISYS, ermittelt werden, sondern behindert auch das Manövrieren des Modells. Um diese Probleme zu lösen wurde im Rahmen des Vorhabens das gesamte Antriebssystem wie schon das Messwerterfassungssystem auf kabellosen Betrieb umgestellt. Der Versuchsbetrieb mit und ohne Kabel ist in Abbildung 13 zu sehen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dem Verbundvorhaben DYPIC wurde ein kommerzielles DP-System mit offen Wasser Eigenschaften, Easy DP, der Firma Sirehna auf die Verhältnisse von Modellversuchen im Eistank angepasst. Das System wurde in intensiven Modellversuchsserien erfolgreich mit zwei verschiedenen Schiffstypen getestet. Eine weitere Schiffsvariante wurde implementiert konnte aber noch nicht verifiziert werden. Während des DYPIC Vorhabens war der Schwerpunkt auf frei schwimmende Schiffe gelegt, verankerte Systeme, z.B. moored Drill Ship, waren nicht Gegenstand des Vorhabens. Gespräche nach Präsentationen auf internationalen Konferenzen und mit Kunden zeigen jedoch, dass dies ein weiteres Anwendungsfeld ist und hier noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des diesem Beitrag zu Grunde liegenden Vorhabens (Förderkennzeichen 03SX307) und dem Projektträger Jülich, hier namentlich Hr. Dr. Kaltofen und Fr. Dipl.-Betriebswirtin Steinmann, für die engagierte Begleitung des Vorhabens. Weiter danken die Autoren den am Verbundvorhaben beteiligten Partnern, Statoil, Kongsberg, NTNU, Sirehna und DNV für die vertrauensvolle Zusammenarbeit im Projekt.

Referenzen

1. MODEL DP SYSTEM FOR ICE-TANK RESEARCH, Dal Santo and Jochmann, Proceedings of the 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2012, July 2-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil
2. DYPIC – DYNAMIC POSITIONING IN ICE – FIRST PHASE OF MODEL-TESTING, Haase, v.d. Werff and Jochmann, Proceedings of the 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2012, July 2-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil
3. Numerical Simulation of a Floater in a Broken-Ice Field Part Model Description, Metrikin, Lubbad, Løset, Lu and Kashafutdinov, Proceedings of the 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2012, July 2-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil
4. Numerical Simulation of Dynamic Positioning in Ice, Metrikin, Ivan; Løset, Sveinung; Jenssen, Nils Albert and Kerkeni, Sofien, Marine Technology Society Journal, Volume 47, Number 2, March/April 2013, pp. 14-30(17)
5. 11. NONSMOOTH 3D DISCRETE ELEMENT SIMULATION OF A DRILL-SHIP IN DISCONTINUOUS ICE, Ivan Metrikin and SveinungLøset, Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, June 9-13, 2013, Espoo, Finland
6. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF DYNAMIC POSITIONING IN LEVEL ICE, Metrikin, I., Kerkeni, S., Jochmann, P. and Loset, S., Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2013, June 9-14, 2013, Nantes, France
7. DYNAMIC POSITIONING IN ICE – COMPARISON OF CONTROL LAWS IN OPEN WATER AND ICE, Kerkeni, S., Dal Santo, X. and Metrikin, I., Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2013, June 9-14, 2013, Nantes, France
8. CAPABILITY PLOTS OF DYNAMIC POSITIONING IN ICE, Kerkeni, S., Metrikin, I. and Jochmann, P., Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9-14, 2013, Nantes, France 4.
9. DIFFERENT WAYS OF MODELING ICE DRIFT SCENARIOS IN BASIN TESTS, Haase, A. and Jochmann, P., Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9-14, 2013, Nantes, France

10. DYPIC – DYNAMIC POSITIONING IN ICE –SECOND PHASE OF MODEL TESTING, Haase, A. and Jochmann, P., Proceedings of the ASME 201332nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9-14, 2013, Nantes, France

11. Free Running Model Technology for Dynamic Positioning in an Ice Model Basin, Haase, A. and Jochmann, P., Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Model Measurement Technologies for the Maritime Industry 2013 – AMT 2013, September 17-18, 2013, Gdansk, Poland.

12. Entwicklung, Herstellung und Test eines Systems zum dynamischen Positionieren im Eis, Haase, A. und Jochmann, P., Schlussbericht des BMWi Vorhabens mit Förderkennzeichen 03SX307, Technische Informationsbibliothek, 2013, Hannover, Deutschland

ProRepaSII – Entwicklung und Validierung von Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Propellerwerkstoffen mit Ultraschall

M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer, S. Hubel, D. Dobrovolskij (Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern)

Einleitung

Schäden an Schiffsantriebskomponenten, insbesondere am Propeller, können erhebliche Konsequenzen hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit haben. Ein großer Teil der auftretenden Propellerschäden resultiert aus eingeschlossenen Fehlstellen, die es zerstörungsfrei zu erkennen und zu bewerten gilt. Da Propeller überwiegend aus schwerprüfbaren Kupferlegierungen hergestellt werden, befasste sich das Fraunhofer-Teilvorhaben im Rahmen des Forschungsprojektes ProRepaS (Propeller Reparatur Schweißen, Förderkennzeichen 03SX209G, 2005-2007) mit der Entwicklung eines zuverlässigen Ultraschallprüfverfahrens, um unzulässige Fehlstellen zu entdecken und dadurch die Zuverlässigkeit dieses wichtigen Bauteils zu erhöhen.

Das Forschungsvorhaben ProRepaSII hat sich das Gesamtziel gesetzt, die im Vorgängerprojekt erarbeiteten Ergebnisse zu validieren und die Ultraschallprüfung mittels verschiedener geeigneter Prüftechniken auch für Fertigungs- und Reparaturschweißungen zu ertüchtigen. Dazu mussten für die in Frage kommenden Prüfverfahren simulationsbasiert entsprechende Prüfkonzepte erarbeitet, getestet und an entsprechenden Testkörpern validiert werden. Darüber hinaus wurde die Thematik der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (engl.: Probability of Detection, POD) untersucht: hier mussten Berechnungsmodelle erarbeitet, experimentelle Studien an geschweißten und ungeschweißten Testblöcken durchgeführt sowie die modellbasierte POD-Berechnung (Model-Assisted POD, MAPOD) validiert werden. Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von Eigenspannungen mussten die Grundlagen theoretisch wie experimentell in Zugversuchen erarbeitet und die Prüfkonzepte entwickelt werden. Letzteres war auch die Aufgabe bei der Erfassung der Oberflächenkontur von Propellerflügeln mittels luftangeregtem Ultraschall im Hinblick auf die schnelle Erfassung der gekrümmten Bauteilgeometrien zur Berücksichtigung im Rekonstruktionsverfahren SAFT⁺⁺ (Spies & Rieder, 2010).

ProRepaSII im Gesamtüberblick

Zur Gewährleistung der Betriebsfestigkeit von Schiffspropellern greift die Bruchmechanik auf Eingangsgrößen zurück, die aus den Materialeigenschaften, den auftretenden Belastungen und auf Materialfehlern beruhen. Um belastbare Eingangsdaten hinsichtlich der Größe von Materialfehlern zu erhalten, befasste sich das Fraunhofer-Teilvorhaben im Verbundprojekt ProRepaS mit der zerstörungsfreien Detektion und Analyse von Werkstofffehlern, die entweder aus der Fertigung herrühren bzw. betriebsbeansprucht auftreten oder von aktuellen Schadensursachen herrühren. Mit den Forschungsarbeiten wurden die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für eine Fehlerdetektion und Fehleranalyse in Propellerflügeln aus Cu3-Legierungen geschaffen. Diese Ergebnisse wurden im Fortsetzungsvorhaben ProRepaSII durch eine umfassende Validierung bestätigt und weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Damit besteht nun die Möglichkeit, Propeller unter Einsatz verschiedener Prüftechniken problemangepasst zerstörungsfrei zu prüfen und eventuell identifizierte Fehlstellen mit dem Auswerteverfahren SAFT⁺⁺ zu bewerten. Die zerstörungsfreie Prüfung wurde auch auf Fertigungs- und Reparaturschweißungen von Propellern ausgedehnt, die aufgrund der großen Nachfrage nach Neu-Propellern und der dadurch bedingten langen Wartezeiten, aber auch aufgrund der gestiegenen Rohstoffkosten zum Zeitpunkt der Projektplanung und Antragstellung verstärkt durchgeführt wurden. Des Weiteren wurde ein Verfahren zur Eigenspannungsmessung mittels Ultraschall entwickelt, da Eigenspannungen einen entscheidenden Einfluss auf das sogenannte R-Verhältnis und damit auf die Bewertung von Fehlstellen haben können.

Aufgrund des beträchtlichen Umfangs dieses Forschungsprojektes präsentieren wir in diesem Beitrag ausgewählte Ergebnisse. Insgesamt umfasste das Projekt die Arbeitspakete a) Validierung des Ultraschallverfahrens und SAFT⁺⁺ an Kalibrierkörpern; b) Erweiterung des Prüfkonzeptes für Fertigungs- und Reparaturschweißungen; c) 3D-Geometrieerfassung und ortsgerechte Visualisierung der SAFT⁺⁺-Ergebnisse; d) Entwicklung eines Ultraschallverfahrens zur Messung von Eigenspannungen; e) Entwicklung einer kombinierten Inspektions- und Bewertungssoftware.

Validierung des Ultraschallverfahrens und SAFT⁺⁺

Das Ultraschall-Prüfverfahren zur Detektion und Vermaßung von innen liegenden Fehlstellen mittels SAFT⁺⁺ haben wir anhand von umfangreichen Messungen an speziellen Test- und Kalibrierkörpern validiert. Dazu wurden aus einem Propellerflügel aus verschiedenen Dickenbereichen Probekörper herausgearbeitet. Da die Gefügeeigenschaften des Gusswerkstoffes statistischen Einflüssen unterliegen und dadurch bedingt lokal unterschiedliche Schallschwächungswerte existieren, wurden die Unsicherheiten bei der

Fehlstellenentdeckung und bei den mit der Ultraschallprüfung ermittelten Fehlstellenabmessungen im Rahmen des Konzeptes der Probability of Detection (POD) untersucht. Dazu waren umfangreiche experimentelle Untersuchungen notwendig, um eine ausreichende Basis für statistische Auswertungen zu schaffen. Mit Erarbeitung eines MAPOD-Konzeptes (Model-Assisted POD) unter Berücksichtigung der umfangreichen experimentellen Ergebnisse wurde insbesondere die Möglichkeit geschaffen, für einen zu untersuchenden Propeller auf Basis repräsentativer experimenteller Daten unter Zuhilfenahme von Simulationsrechnungen eine individuelle POD-Bewertung durchzuführen; dies ist aufgrund der Formen- und Größenvielfalt von Schiffspropellern unabdingbar.

Abbildung 1 zeigt den für die Fertigung der Kalibrierkörper benutzten Flügel im Spitzen- und im Fußbereich vor der Bearbeitung, die daraus gefertigten Blöcke sind in Abbildung 2 zu sehen. Für Zugversuche wurde aus den Blöcken, die aus dem Spitzen- und Fußbereich sowie dem mittleren Bereich des Flügels entnommen wurden, Segmente zur Materialcharakterisierung abgetrennt. Es zeigte sich, dass sich die Blöcke entgegen unserer Annahme nur geringfügig in ihrem Werkstoffgefüge und ihren Materialeigenschaften unterscheiden. Aus diesem Grund haben wir weiteres Probenmaterial aus ProRepaS für unsere Arbeiten genutzt. Eine Auswahl dieser Testkörper ist in den Abbildungen 3 bis 5 zu sehen. In Abbildung 3 ist ein ‚kleiner‘ Flügel (Gewicht ca. 230 kg) zu sehen, der insbesondere für die Luftschalluntersuchungen im Labor genutzt wurde.



Abb. 1: Propellerflügel; links Flügelspitzenbereich, rechts Fußbereich.



Abb. 2: Kalibrierkörper nach dem Heraustrennen und Bearbeiten.



Abb. 3: Eine Auswahl weiterer Testkörper für die Volumen- (links) und Schweißnahtprüfung (rechts).



Abb. 4: Testkörper bei den Untersuchungen zur Oberflächenaufzeichnung mittels Luftschall (links) und der Schweißnahtprüfung mit EMAT (rechts).



Abb. 5: Testkörper für die Schweißnahtprüfung mittels Linear-Phased-Array (links) und 2D-Matrix-Array (Mitte und rechts).

Fehlerauffindwahrscheinlichkeit – Bestimmung der POD und MAPOD

Die experimentelle Ermittlung von POD-Kurven erfordert die Planung und Durchführung von wohl definierten Inspektionen an geeigneten Testkörpern. Dabei spielen neben der aufzufindenden Fehlergröße auch die Materialeigenschaften und die Geometrie der zu untersuchenden Bauteile eine Rolle. Die POD-Kurve (in unserem Fall ermittelt als eine Funktion der Fehlergröße a) liefert zusammen mit den relevanten Konfidenzintervallen die Fehlergröße, die mit einer ‚vernünftigen‘ Wahrscheinlichkeit detektiert werden kann. Der prinzipielle Verlauf der POD-Kurve zeigt, dass die Detektionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Fehlergröße ansteigt. An der Größe $a_{90/95}$ schneidet die untere 95 % Konfidenzgrenze das 90 % POD-Niveau. Der Wert $a_{90/95}$ wird üblicherweise als die sicher zu detektierende Fehlergröße und im Hinblick auf die Anforderungen an die Bauteilintegrität als relevant betrachtet (DoD, 2009).

Zur POD-Bestimmung anhand einer \hat{a} -vs- a -Analyse verwenden wir Testkörper mit Modellfehlern unterschiedlicher Größe. Bei der Prüfung erzeugt ein Fehler der Größe a ein Signal der Amplitude \hat{a} , das als ‚Treffer‘ interpretiert wird, wenn es den festgelegten Entscheidungsschwellwert \hat{a}_{dec} (z.B. 6 dB über Rauschen) übersteigt. Unter der Annahme einer spezifischen statistischen Verteilung der Daten kann das resultierende \hat{a} -vs- a -Diagramm in eine POD-Kurve überführt werden. Die im Handbuch MIL-HDBK-1823 beschriebene, international als Standard akzeptierte Vorgehensweise geht dabei von der Annahme aus, dass die Signalamplituden mit konstanter Varianz statistisch normalverteilt sind. Außerdem wird ein linearer Verlauf zwischen der Amplitude \hat{a} und der Fehlergröße a angenommen (DoD, 2009). Demgegenüber haben wir im Rahmen von ProRepaSII ein Modell zur POD-Berechnung genutzt und weiterentwickelt, das nicht diesen beiden Annahmen unterliegt (Spies et al., 2012). Die modellbasierte POD-Bestimmung stützt sich auf die Berechnung von Fehlersignalen in simulierten (‚virtuellen‘) Experimenten, wir verwenden hierzu die Generalisierte Punktquellensynthese (Spies, 2000, 2001).

Für die experimentellen Untersuchungen haben wir vier unterschiedliche Werkstoffe genutzt, die uns in Form von ganzen Gussteilen oder als vorkonfektioniertes Plattenmaterial zur Verfügung standen (Abb. 3). Anhand der in den Schlißbildern sichtbaren Größe der α -Phasen lassen sich die Werkstoffe einordnen in grobes, mittleres, feines und sehr feines Gefüge. Die Ursache für die Variation der Mikrostruktur ist die Abkühlgeschwindigkeit bei der Verarbeitung des Werkstoffes. Sie wird in der Praxis im Wesentlichen durch die Größe des Abgusses bestimmt. Die vier untersuchten Werkstoffe decken eine Gefügevariation ab, wie sie in gegossenen Cu3-Schiffspropellern im Dickenbereich von etwa 20 mm (Flügelspitze) bis 450 mm (Fußbereich) auftritt (Heerens & Hellmann, 2007).

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf die Untersuchungen, die wir an den aus den grobkörnigen und feinkörnigen Werkstoffen WA und WB gefertigten Testblöcken durchgeführt haben. Während WB4 bei einer Frequenz von 2 MHz für Longitudinalwellen eine moderate Schallschwächung von 0.3 dB/cm aufweist, beträgt diese beim Testblock WA2 mit 1.4 dB/cm etwa das Fünffache. Bei den eingebrachten Modellfehlern handelt es sich um Flachbodenbohrungen (FBB) unterschiedlicher Durchmesser (2 mm bis 8 mm) in einer Tiefe von 5 mm (WA2) bzw. 10 mm (WB4) vor der Rückwand. Die Messungen wurden mit verschiedenen kommerziellen Ein-element-Prüfköpfen der jeweiligen Mittenfrequenz von 1.5 MHz und 2.25 MHz durchgeführt. Um vergleichbare Sensoreigenschaften in die POD-Ermittlung einzubringen, wurde die Analyse für eine Frequenz von 2 MHz durch Einsatz eines entsprechenden Filters durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen: (a) aufgrund der stark inhomogenen Gefügestruktur ergeben sich für die FBB gleichen Durchmessers unterschiedliche Fehleramplituden mit Schwankungen von ca. ± 3 dB (WA2) bis ± 5 dB (WB4); (b) die 2 mm FBB (WB4) konnten nicht detektiert werden; (c) die beiden 6 mm voneinander separierten 3 mm Bohrungen in WA2 konnten nicht einzelnen aufgelöst werden; (d) die am Testblock WA2 detektierten Fehleramplituden liegen trotz des geringeren Schallaufwegs bei gleicher Fehlergröße im Mittel etwa 8 dB unter denen von WB4. Bei der nachfolgenden Auswertung haben wir die jeweils höchsten und niedrigsten Werte aus den Daten verworfen. Abbildung 6 zeigt für die beiden Testblöcke jeweils die aus allen mechanisiert aufgezeichneten Datensätzen ermittelten Maximalamplituden in dB im direkten Vergleich mit den unter Berücksichtigung aller Prüfparameter (inklusive Schallschwächung) simulierten Fehleramplituden. Die Normierung erfolgte jeweils auf die 4 mm FBB.

Der in den POD-Berechnungen für den Testblock WB4 ermittelte Wert für $a_{90/95}$ von 3.9 mm entspricht den Erwartungen auf der Basis unserer langjährigen Erfahrungen aus den Labor- und Vor-Ort-Untersuchungen ähnlicher Cu3-Gefüge an Propellerbereichen mittlerer Dicke; gleiches gilt für den $a_{90/95}$ -Wert von ca. 6.5 mm für WA2. Die MAPOD-Kurven auf Basis der simulierten Daten (Abb. 7 und 8) zeigen mit einem vergleichbaren Verlauf und ähnlichen Kennwerten eine hervorragende Übereinstimmung mit den aus den Messdaten erstellten POD-Kurven.

Bewertung der erzielten Ergebnisse

Anhand der in diesem Arbeitspaket erstellten Datenbasis, aus der wir die hier gezeigten repräsentativen Datensätze entnommen haben, wurde der MAPOD-Ansatz verifiziert. Dieser erlaubt den Einfluss der Oberflächenkrümmung oder unterschiedlicher Fehlerparameter, aber auch von durch die Mikrostruktur bedingten variierenden Schallschwächungen auf die Fehlersignale zu untersuchen (Spies et al., 2012). Dazu werden experimentelle Basis-Ergebnisse als Input für die Simulation benötigt, unter anderem im Hinblick auf

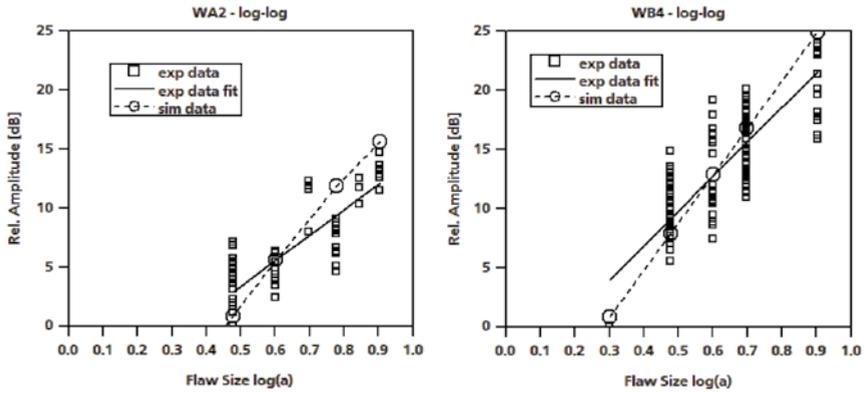


Abb. 6: Simulierte und experimentelle Maximalamplituden als Funktion der Fehlergröße, Testblöcke WA2 und WB4.

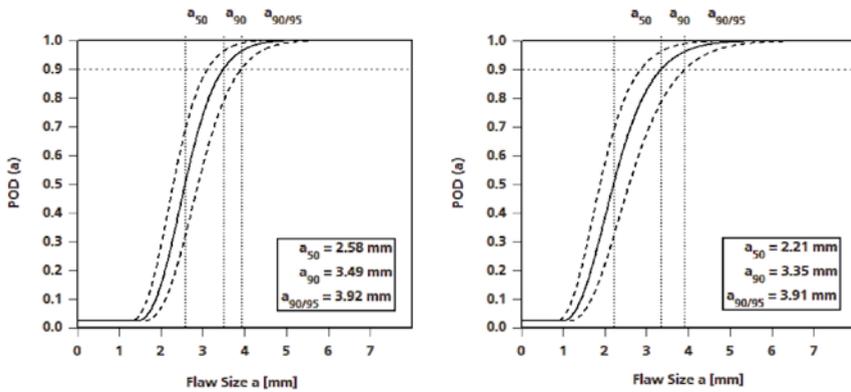


Abb. 7: MAPOD-Kurve (simulierte Daten, links) und POD-Kurve (gemessene Werte, rechts) für WB4.

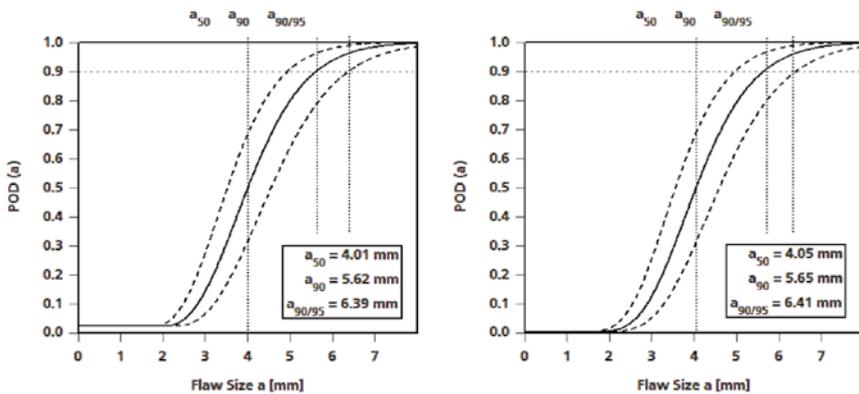


Abb. 8: MAPOD-Kurve (simulierte Daten, links) und POD-Kurve (gemessene Werte, rechts) für WB4.

- V-Naht, 40 mm
- 3mm Querbohrung in Schweißnahtflanke
- 3mm/4mm Nut in Schweißnahtwurzel



Abb. 9: Testkörper mit Nut und Querbohrung in Schweißnahtflanke und – wurzel.

die bei der POD-Berechnung zu berücksichtigenden Größen für die Varianz der Messwerte und die mittlere Rauschamplitude. Die Basis für einen effizienten MAPOD-Ansatz bildet ein leistungsfähiges und validiertes Simulationsverfahren, das alle relevanten Komponenten des Prüfvorganges realitätsnah abbilden kann.

Ein Ziel dieser Arbeiten war nicht zuletzt die Erarbeitung einer Datenbasis, die für die Detektion und Bewertung von innen liegenden Fehlstellen in Schiffspropellern mit Profildicken bis zu 450 mm genutzt werden kann. Dabei können wir auf frühere Arbeiten des assoziierten Projektpartners WPNL (Wenschot, 1986) zurückgreifen, der anhand von vielen unterschiedlich großen Cu3-Gussstücken den Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Gusswanddicke untersucht und quantifiziert hat. Es hat sich gezeigt (Heerens & Hellmann, 2007), dass die Zugfestigkeiten der untersuchten Werkstoffe den in (Wenschot, 1986) untersuchten Zugfestigkeitsbereich und den in unserem Forschungsvorhaben angestrebten Wanddickenbereich bis zu 450 mm weitgehend abdecken. Dies erlaubt den Transfer der hier erzielten Ergebnisse in die Prüfpraxis.

Erweiterung – Prüfkonzept für Fertigungs- & Reparaturschweißungen

Hier wurden speziell für die Prüfung im Schweißnahtbereich die Ultraschallprüfmethode SAFT⁺⁺ weiterentwickelt und weitere, für dieses Prüfproblem geeignete Prüftechniken untersucht bzw. ertüchtigt. Auf Basis von Simulationen (Dillhöfer et al., 2012) haben wir mit Hilfe eines speziellen 2D-Phased-Array-Systems (Elektronik und 2D-Ultraschallsensor) grundlegende Ver-

suche an einer Schweißnaht von einer Seite mit einer Frequenz von 1 MHz durchgeführt. Die Technik kann als Alternative zu linearen Phased-Arrays erfolgreich eingesetzt werden. Dabei ist zu beachten: a) der Einsatz der 2D-Array-Technik mit kleinen Prüfköpfen ist für Oberflächen mit geringen Krümmungsradien der Freiformfläche geeignet; b) die Abmessungen eines 2D-Arrays mit z.B. 8 x 8 Einzelementen liegen bei Prüffrequenzen von kleiner 1.5 MHz bei ca. 25 mm; dadurch kann bei den betrachteten Krümmungsradien der Propeller noch eine stabile Ankopplung auf den gekrümmten Oberflächen erzielt werden; c) bei der mechanisierten Prüfung mit Flächenscanner sind bei größeren Fokustiefen und größeren Arrays deutliche Ankoppelausfälle zu beobachten, eine 100%-Prüfung ist dann nicht mehr gewährleistet; d) in einem solchen Fall bringt die Prüfung mit der Standard-Phased-Array-Technik und 1D-Array-Prüfköpfen deutliche Vorteile gegenüber einem Ansatz mit 2D-Arrays.

Die vergleichende Ultraschallprüfung wurde an mehreren Teststücken mit V-Nähten durchgeführt. Wir haben die folgenden Verfahrensansätze a) konventionelle Ultraschallprüfung (42° Einschallwinkel) mit dem SAFT⁺⁺-Verfahren; b) Phased-Array Prüfung mit Lineararray und Vorlaufkeil; c) elektromagnetisch angeregter Ultraschall (EMAT, 52° Einschallwinkel) mit dem SAFT⁺⁺-Verfahren betrachtet. Abbildung 9 zeigt einen der Testkörper – hier wurde in der Schweißnahtflanke eine 3 mm Querbohrung (Länge 65 mm) und in der Nahtwurzel eine 3 mm tiefe Nut (Länge 60 mm) eingebracht. Die

1 MHz Ultraschall konventionell und SAFT (C- und B-Bild)

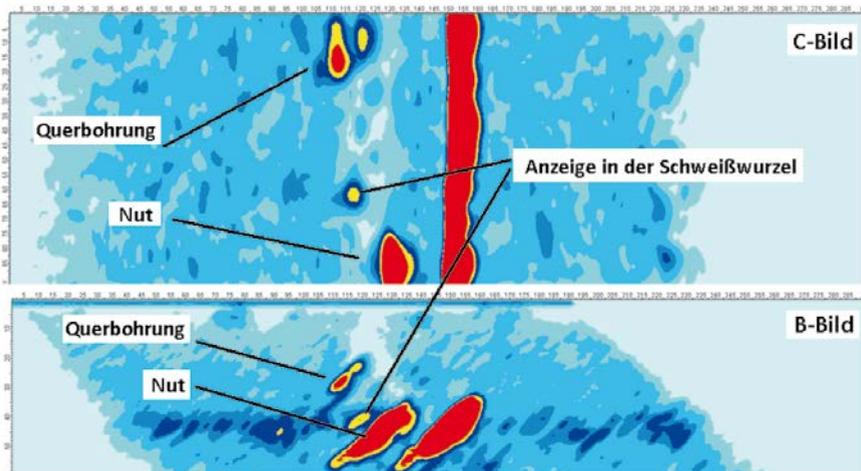


Abb. 10: 3D-SAFT⁺⁺ Rekonstruktion der Schweißnaht mit Nut und Querbohrung in Schweißnahtflanke und Schweißnahtwurzel bei der Prüfung mit konventionellem Ultraschall, Frequenz 1 MHz.

Prüfung mit konventionellem Ultraschall (1 MHz) und dem SAFT⁺⁺ Verfahren (Abb. 10) zeigt sowohl die Querbohrung als auch die Nut mit einem ausreichendem Nachweisvermögen; außerdem ist die Anzeige eines natürlichen Fehlers in der Schweißnahtwurzel erkennbar. Bei einer Frequenz von 2.25 MHz kann nur die Nut mit genügender Empfindlichkeit nachgewiesen werden (Abb. 11). An diesem Testkörper wurde außerdem eine Phased-Array-Prüfung durchgeführt. Dabei wurde ein Lineararray mit 32 Elementen und einem Vorlaufkeil von 45° in mehreren Spuren mechanisiert über die Schweißnaht geführt (Abb. 12). Die Darstellung in Abb. 13 zeigt exemplarisch einen Sektorscan, ein B-Bild (links) sowie zwei C-Bilder (rechts). Die Nut und die Querbohrung werden mit ausreichender Empfindlichkeit erkannt. Die natürliche Anzeige im Wurzelbereich kann mit der Prüffrequenz von 2.25 MHz nicht nachgewiesen werden.

Das Ergebnis der Prüfung mittels EMAT-Technik ist in der Abbildung 14 dargestellt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der EMAT-Prüfkopf mit 680 kHz eine wesentlich geringere Arbeitsfrequenz besitzt; der Fokus des Einsatzbereiches der EMAT-Technik liegt bei größeren Bauteildicken. Nut und Querbohrung können mittels EMAT-Technik aufgelöst werden, infolge der geringeren Prüffrequenz mit deutlich weniger Abbildungsschärfe.

2.25 MHz Ultraschall konventionell und SAFT (C- und B-Bild)

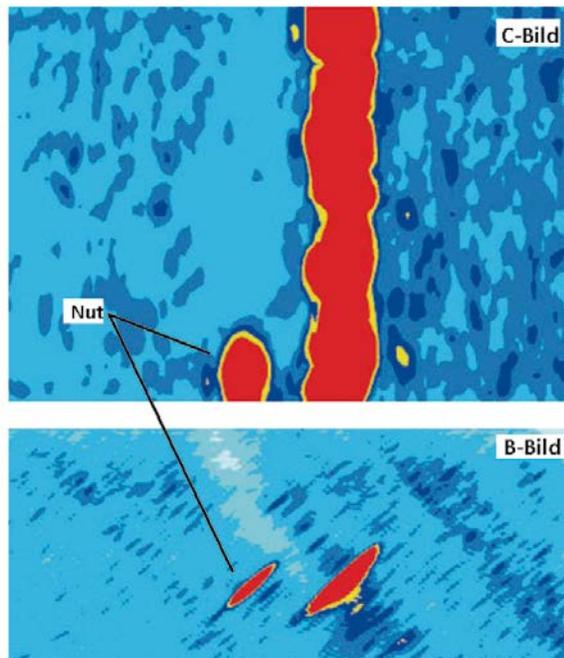


Abb. 11: 3D-SAFT⁺⁺ Rekonstruktion der Schweißnaht mit Nut und Querbohrung in Flanke und Wurzel (Prüfung konventionell, 2.25 MHz).



Abb. 12: Prüfung der Schweißnaht mittels Phased-Array-Technik.

Die Kombination der erarbeiteten Verfahren bringt die folgenden Vorteile: a) die Verwendung der Materialeigenschaften zur Simulation und Modellierung der Sensor-Schallfelder liefert Informationen zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der möglichen Prüfverfahren hinsichtlich der jeweiligen Prüfaufgabe; b) durch den Einsatz einer schnellen mechanisierten Ultraschallprüfung mittlerer Auflösung (Suchprüfung) in Verbindung mit der SAFT⁺⁺ Rekonstruktion wird ein Gesamtüberblick erzielt; c) im Anschluss wird eine fein gerasterte Analyseprüfung mittels SAFT⁺⁺ an den relevanten Stellen („Regions of Interest“) durchgeführt; diese Prüfung erfolgt zusätzlich unter Einbindung einer Amplitudenbewertung mit Fehlerlage und Fehlergrößenbestimmung;

Phased Array Prüfung, 2.25 MHz, Vorlaufkeil 45°

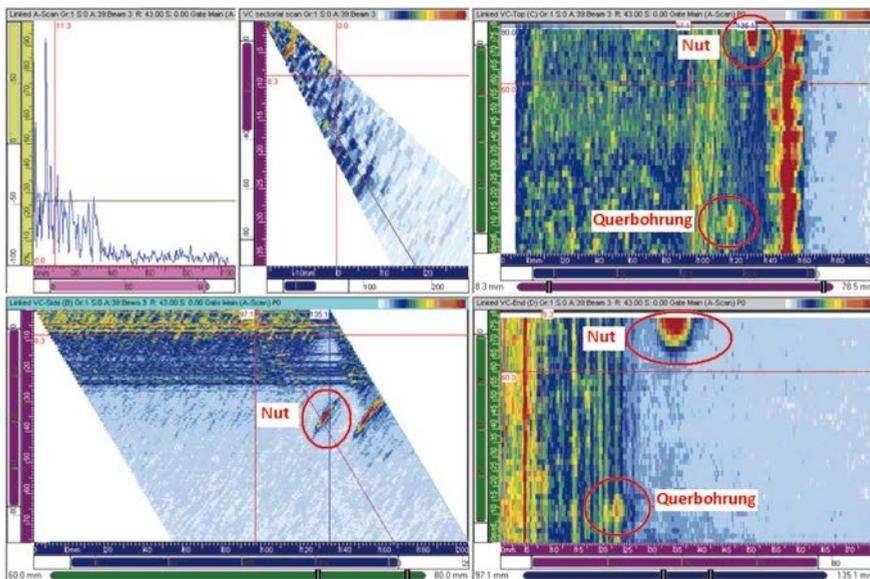


Abb. 13: Prüfung der Schweißnaht mittels Phased Array, Darstellung in Form von Sektor-, C- und B-Bild

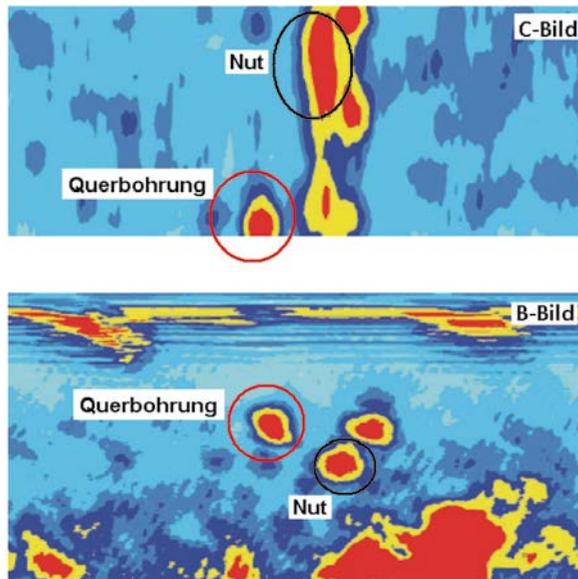


Abb. 14 Prüfung der Schweißnaht mittels EMAT und SAFT⁺⁺.

d) bei Bedarf und geeigneter Kontur der Oberfläche wird eine 3D-Phased-Array-Prüfung mit mehreren Einschallwinkeln, Einschallpositionen und Fokussierungen durchgeführt, welche zusätzliche Informationen über Form und Orientierung der Fehler liefert.

Geometrierfassung und Visualisierung der SAFT⁺⁺ Ergebnisse

Die algorithmische Verarbeitung der aufgezeichneten Ultraschall-HF-Daten mit SAFT⁺⁺ unter Einsatz eines während der Prüfung mitgeführten mechanischen Weggebers zur Aufzeichnung der Oberflächenkoordinaten führt zu einer Begrenzung der Prüfgeschwindigkeit aufgrund des erhöhten mechanischen Aufwandes. Um die Prüfgeschwindigkeit zu erhöhen, haben wir die Erfassung der Oberflächenkonturen durch den Einsatz von Luftultraschallsensoren vom eigentlichen Prüfvorgang separiert. Diese werden kopelfrei bei der Prüfung synchron mitgeführt, anhand des an der Bauteiloberfläche reflektierten Signals wird der Abstand des Sensors zur Oberfläche und daraus die Bauteilkontur ermittelt. Diese Geometriedaten werden dann in einem CAD-File zur Archivierung des jeweils untersuchten Propellers gespeichert. Die derart aufgezeichneten und abgespeicherten Informationen werden dann in SAFT⁺⁺ zur verbesserten ortsgetreuen Rekonstruktion des Prüfvolumens benutzt. Wir verwenden fokussierende Luftschallsensoren mit Frequenzen von 300 kHz bis maximal 700 kHz. Der Arbeitsbereich (Fokusabstand) beträgt in der Regel zwischen 50 mm und 80 mm (Abb. 15). Der Einsatz der Konturvermessung mittels Luftschall ist jedoch auf Propellerkonturen mit

mäßigen Krümmungsradien begrenzt; für High-Skew-Propeller mit erheblichen Krümmungsradien ist die Bestimmung der Kontur mittels einer mechanischen Abtasteinrichtung vorzuziehen.

Entwicklung einer kombinierten Inspektions- & Bewertungssoftware

Im Rahmen des Vorhabens wurde das Programm-Framework MMC-USIS (Dillhöfer et al., 2010) für die Steuerung, Durchführung und Rekonstruktion der Ultraschallprüfung von schwer prüfbaren Komponenten entwickelt, getestet und in verschiedenen Anwendungen erfolgreich eingesetzt und wiederholt an die Besonderheiten einer effizienten Vor-Ort-Prüfung angepasst. Das Framework besteht aus verschiedenen Teilkomponenten, die über eine eigenständige Mensch-Maschinen-Schnittstellen verfügen und auch ‚stand alone‘ eingesetzt werden können. Die Frontend-Einheiten wurden so programmiert, dass diese mittels Trigger- und HF-Ausgangssignal direkt mit dem System MMC-USIS zusammen arbeiten können. Dadurch wurde eine größtmögliche Flexibilität in der Anwendung erzielt. Die Steuer-, Programmier-, Kontur- und Prüfdaten werden mittels HTML-, Text- und Binärdateien abgespeichert und stehen für die Dokumentation beispielsweise in Form standardisierter Untersuchungsberichte sowie für das Rekonstruktions- und Visualisierungsprogramm zur Verfügung.

Das 3D-SAFT⁺⁺ Rekonstruktionsprogramm wurde in Bezug auf die im Prüfsystem erzeugten Konturdaten erweitert. Darüber hinaus bietet das Rekonstruktionsprogramm auch die Möglichkeit, verschiedene Prüftechniken (beispielsweise mit mehreren Einschallrichtungen) im Rekonstruktionsraum zu überlagern. Damit ist das Prüfsystem in der Lage, in einem Prüfschritt von



beiden Seiten der Schweißnaht gleichzeitig zu prüfen und die Rekonstruktionsergebnisse der Teilprüfungen im ‚off-line‘ SAFT⁺⁺ Prozess korrekt zu überlagern. Bei der konventionellen Ultraschallprüfung können vier verschiedene Prüftechniken programmiert und gleichzeitig parallel im Prüfprozess durchgeführt werden. Die Abbildungen 16 und 17 geben einen Eindruck von Haupt- und Rekonstruktionsprogramm.

Abb. 15: Miniaturisierte Frontend-Einheit für die Konturerfassung von Freiformoberflächen mittels Luftschall.

Zusammenfassung und Ausblick

Die in ProRepaSII entwickelten zerstörungsfreien Ultraschallprüf- und Rekonstruktionsverfahren für innen liegende Fehlstellen in Schiffspropellern eröffnen neue Möglichkeiten zur verbesserten Qualitätskontrolle für Cu3-Propeller sowohl bei der Herstellung als auch bei der Reparatur durch Schweißen. Die Prüfverfahren, auch in Verbindung mit den Verfahren zur POD-Berechnung stellen somit einen Beitrag zur Vermeidung von Propellerbrüchen dar und dienen einer erhöhten Betriebssicherheit von Schiffen. Neben wirtschaftlichen Aspekten sind ökologische und umweltpolitische Aspekte zu nennen (Vermeidung von Havarien). Mit der an den für Propellerwanddicken bis zu 450 mm repräsentativen Werkstoffen erarbeiteten Datenbasis in Kombination mit den Verfahren zur modellbasierten POD-Ermittlung besitzt dieses Vorhaben einen extrem hohen Praxisbezug. Für viele derzeit genutzte Propeller können die hier entwickelten Verfahren und die erfassten Daten bei der Detektion und der sicherheitstechnischen Bewertung von innen liegenden Fehlstellen eingesetzt werden. Dazu trägt auch die für den effizienten Praxis-einsatz durchgeführte, weitere Optimierung der Prüfprozeduren und der mobilen Prüfausrüstung bei.

Die Vorteile der Nutzung der entwickelten Verfahren und gesammelten Erkenntnisse sind für alle Interessengruppen im Bereich der maritimen Wirtschaft gegeben: a) deutsche und europäische Hersteller können durch den

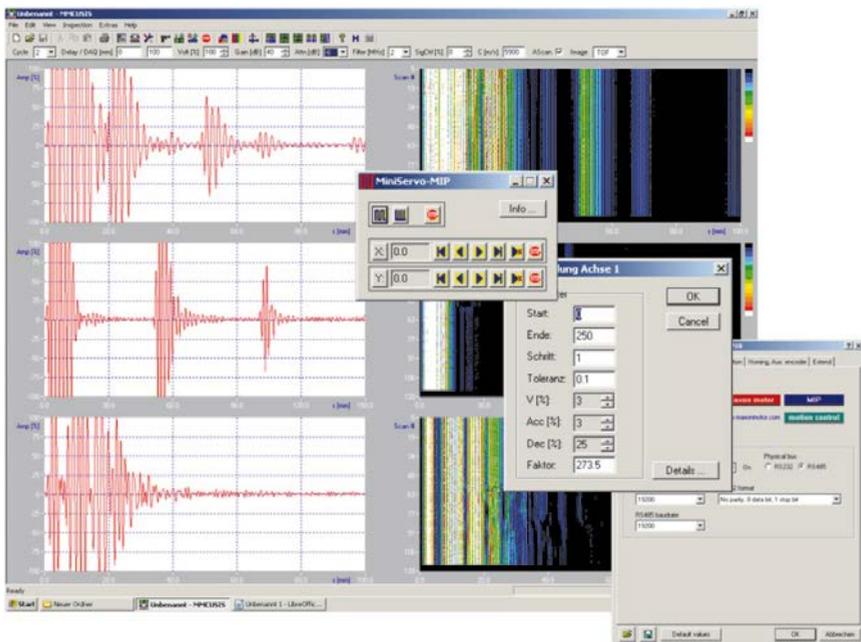


Abb. 16: Hauptprogramm mit integrierten Dialogen für die Manipulationssteuerung.

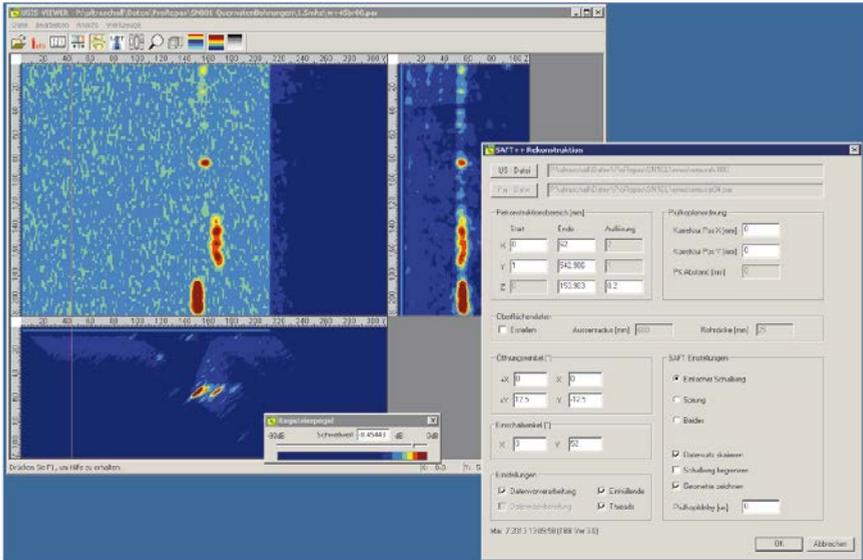


Abb. 17: B-Bild-, C-Bild- und D-Bild-Darstellungen von SAFT⁺⁺

Einsatz der erarbeiteten Verfahren einen nachweisbaren Qualitäts- und damit Wettbewerbsvorteil vor Billiganbietern erzielen, z.B. auch durch eine qualifizierte und nach Bewertung genehmigte Reparatur in den höher belasteten Zonen; b) der assoziierte Partner Germanischer Lloyd agiert als Vorreiter im internationalen Business der Klassifikationsgesellschaften; c) Reedereien sparen Kosten durch Reparaturen anstelle von Neubeschaffungen, dies erhöht die internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Die im Rahmen von ProRepaSII validierten Verfahren setzen wir weltweit bei unseren Prüfeinsätzen bei Herstellern, Reparaturdienstleistern und der Dockung von Schiffen ein (Abb. 18). Die bei diesen Einsätzen gesammelten Erfahrungen nutzen wir zur stetigen Verbesserung und Weiterentwicklung der Prüfverfahren und der Prüfausrüstung.



Abb. 18: Ultraschallprüfung an liegenden und montierten Propellern

Danksagung

Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie von der Germanischer Lloyd SE finanziell unterstützt, wofür an dieser Stelle gedankt sei. Für die wertvollen Diskussionen mit den Mitarbeitern der assoziierten Partner GL und Wärsilä Netherlands bedanken wir uns herzlich.

Literatur

Dillhöfer et al., 2010: A. Dillhöfer, H. Rieder, M. Spies; MMC-USIS – Entwicklung eines kompakten LAN-basierten Prüfsystems für die automatisierte Ultraschallprüfung, SAFT-Bewertung und 3D-Visualisierung; DGZfP Berichtsband BB 122-CD DGZfP-Jahrestagung (2010), P46

Dillhöfer et al.,2012: A. Dillhöfer, H. Rieder, M. Spies, P. Kreier; Einsatz der Phased-Array-Technik mit Matrix-Sensoren bei stark schallschwächenden Werkstoffen; DGZfP-Berichtsband BB-136-CD DACH-Jahres-tagung 2012, P4

DoD, 2009: Department of Defense Handbook Draft 2009; Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment; MIL-HDBK-1823, Draft 14 April 2009

Heerens & Hellmann, 2007: J. Heerens, D. Hellmann; Abschlussbericht Forschungsvorhaben 03SX209F; GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht (2007)

Spies, 2000: M. Spies; J. Acoust. Soc. Am. 107, 2755-2759 (2000)

Spies, 2001: M. Spies; J. Acoust. Soc. Am., 110, 68-79 (2001)

Spies & Rieder, 2010: M. Spies, H. Rieder; Synthetic Aperture Focusing of Ultrasonic Inspection Data to Enhance the Probability of Detection of Defects in Strongly Attenuating Materials; NDT&E International, Vol. 43, No. 5 (2010), 425-431

Spies et al.,2012: M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer; Modellbasierte Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit (POD) von Volumenfehlern in schwerprüfbaaren Bauteilen; DGZfP-Berichtsband BB-136-CD DACH-Jahrestagung 2012, Mi.3.B.1

Wenschot, 1986: P. Wenschot; Naval Engineers Journal, 58-69 (1986)

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