



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2015

Schriftenreihe Projektträger Jülich



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2015

Schriftenreihe Projektträger Jülich

## Grußwort



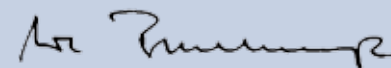
Die maritime Wirtschaft ist eine Schlüsselbranche in Deutschland. Sie sorgt dafür, dass unsere Unternehmen beim Export seit vielen Jahren Spitze sind, und sie sichert den Produktionsstandort durch die Einfuhr von Waren und Rohstoffen. Um diese Position auch in Zukunft zu halten und zu stärken, sind kontinuierliche Aktivitäten in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Innovation erforderlich.

Mit dem Forschungsprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ unterstützt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie innovative, praxisnahe Vorhaben der maritimen Wirtschaft, die im Verbund mit leistungsfähigen Forschungseinrichtungen Produkte und Dienstleistungen für den Weltmarkt hervorbringen.

Eine Auswahl der Ergebnisse aus den im Jahr 2015 abgeschlossenen Verbundprojekten stellen wir auf der diesjährigen Statustagung vor. Die Themenpalette reicht vom Einsatz drahtloser Kommunikationstechnologien in der Schiffstechnik über Technologien zur Prüfung von Unterwasserstrukturen z.B. für Offshore-Windkraftanlagen bis hin zum Einsatz von Augmented Reality in Produktivitätsmanagementsystemen für schiffbauliche Produktionsprozesse.

Neben den Präsentationen steht auch in diesem Jahr wieder der Dialog zwischen den Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik im Vordergrund. Gemeinsam ziehen wir eine Bilanz des Forschungsprogramms und blicken auf zukünftige Maßnahmen, mit denen wir den Einsatz von Spitzentechnologien in der maritimen Wirtschaft weiter vorantreiben können.

Ich wünsche Ihnen viele gute Anregungen und Freude beim Lesen dieses Tagungsbandes.



Uwe Beckmeyer, MdB

Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Wirtschaft und Energie und Maritimer Koordinator der Bundesregierung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

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

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

#### Herausgeber und Vertrieb

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zentralbibliothek, Verlag  
D-52425 Jülich  
Telefon 02461 61 - 53 68  
Telefax 02461 61 - 61 03  
E-Mail [zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)  
Internet [www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

#### Satz und Layout

Kristina Ehrhardt, Projektträger Jülich

#### Bildnachweis

Institut für Produktionsmanagement und -technik  
Technische Universität Hamburg-Harburg

#### Druck

Schloemer und Partner GmbH, Düren

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-95806-104-0

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

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

## Inhalt

<b>ETOPS – Entwicklung einer 3D-topologischen Produktionskoordination zur Optimierung des Generalplan-Entwurfes komplexer Schiffstypen</b> .....	9
Knut Frömming (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG) Hannes Lindner, Sebastian Schenk (Universität Rostock) Dr. Bastian Ebeling (Thyssen Krupp Marine Systems GmbH)	
<b>DriveCoM – Einsatz drahtloser Kommunikationstechnologie zur wirtschaftlichen Zustandsüberwachung von Schiffsgetriebenen</b> .....	23
Thomas Iwert (Bachmann Monitoring GmbH) Dr. Daniel Hoffmann (Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.) Peter Peitsch (microsensys GmbH) Dr.-Ing. Thomas Kruse (REINTJES GmbH) Sebastian Schirmacher (Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH),	
<b>KONKAV III – Entwicklung von numerischen und experimentellen Methoden zur Vorhersage von kavitationsbedingter Erosion an Schiffsanhängen.</b> .....	37
Prof. Dr.-Ing. Ould el Moctar (Universität Duisburg-Essen) Prof. Dr.-Ing. Andrés Cura Hochbaum (Technische Universität Berlin) Prof. Dr.-Ing. Michael Pohl (Ruhr-Universität Bochum) Dr.-Ing. Lars Greitsch (Mecklenburger Metallguss GmbH) Hans-Jürgen Heinke (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH) Christian Johannsen (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)	
<b>ERA NET MARTEC – OSC – Entwicklung einer Geräteplattform für Segelschiffe im OceanoScientific® Programm</b> .....	45
Stefan Marx, Saskia Heckmann, Sabine Heuck (SubCtech GmbH) Yvan Griboval, Cécile d'Estais (SailingOne AS) Fabienne Gaillard, Thierry Reynaud (Ifremer - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) Pierre Blouch (Meteo-France)	
<b>ECUP3000 – Enhanced Control of Underwater Production down to 3000 mwd</b> .....	65
Dr. Sven Hoog, Hartmut Kupke (IMPac Offshore Engineering GmbH) Stefan Ladig, Jens-Uwe Brandt (ITT Bornemann GmbH) Dr. Johannes Kunze, Dr. Christian Koch (Krohne Messtechnik GmbH) Prof. Thomas Musch, Martin Gevers, Malte Mallach, Patrick Gebhardt, Sascha Langener (Ruhr-Universität Bochum) Prof. Heinz Wörn, Stephan Irgenfried, Sergej Neumann (Karlsruher Institut für Technologie KIT)	
<b>ProWOO – Prognose Optimaler Wetterfenster für Offshore Operationen</b> .....	81
Prof. Günther Clauss, Marco Klein, Matthias Dudek (Technische Universität Berlin) Katrinn Hessner, Tyson Hilmer (OceanWaveS GmbH)	

**UnderwaterINSPECT – Technologien zur zuverlässigen und effizienten Prüfung von Unterwasser-Tragstrukturen an Offshore-Windenergieanlagen** ..... 97

Dr. Herbert Friedmann (Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG)  
Jens Eppler (Baltic Taucher GmbH)  
Dr. Martin Kohlmeier (Fraunhofer IWES)  
Dr. Bianca Weihnacht (Fraunhofer IKTS)  
Dr. Gerlinde Winkel (Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt MV)

**IS<sup>2</sup>U – Einsatz intelligenter Algorithmen für Auswertung und Monitoring in Unterwasserbildsequenzen** ..... 113

Prof. Dr.-Ing. Tim W. Nattkemper, Dr. Timm Schoening, Bc. Sc. Daniel Langenkämper (Universität Bielefeld)  
Dipl. Inform. Daniel Brün, Björn Steinbrink, Alexander Medina (saltation GmbH & Co KG)

**SOAM, Projekt zur berührungsfreien Sondierung von Gewässeruntergründen zwecks Auffindung von Altmunition und anderen Gefahrstoffen zur Gewährleistung der gefahrenlosen Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (WEA)** ..... 129

Matthias Reuter, Sven Birkenfeld, Sabine Bohlmann (CUTEC Institut GmbH)

**MarNet – Entwicklung eines schiffsübergreifenden Navigationsdatennetzwerkes und Bereitstellung der Daten auf der Brücke und auf weiteren Systemen** ..... 147

Jan Luiken ter Haseborg, Helge Fielitz (Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Stefan Strohschneider, Sarah Möckel, Michael Brenker (Friedrich-Schiller Universität Jena)  
Sven Rohde (Raytheon Anschütz GmbH Kiel)  
Karl-Christian Ehrke (WSAM Hamburg)  
Hermann Hanneken, Christian Eilers, Frank Norda (Meyer Werft GmbH & Co. KG)

**Entwicklung von Methoden zum Berechnen des dynamischen Positionierens in der Entwurfsphase** ..... 163

Adele Lübcke (TU Hamburg-Harburg),  
Kay Martinsen (Flensburger Schiffbau- Gesellschaft mbH & Co. KG),  
Sebastian Walter (Meyer Werft GmbH & Co. KG)

**PROSPER – Produktivitätsmanagement in der schiffbaulichen Produktion ermöglichen** ..... 179

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lötting, Dr.-Ing. Axel Friedewald, Philipp Halata, Florian Tietze, Fedor Titov (Technische Universität Hamburg-Harburg)

## ETOPS – Entwicklung einer 3D-topologischen Produktionskoordinierung zur Optimierung des Generalplan-Entwurfes komplexer Schiffstypen

Förderkennzeichen: 03SX336

Knut Frömming (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG)  
Hannes Lindner (Universität Rostock)  
Sebastian Schenk (Universität Rostock)  
Dr. Bastian Ebeling (Thyssen Krupp Marine Systems GmbH)

### Kurzbeschreibung

Der Entwurf eines neuen Schiffs beginnt in der Regel mit ersten, groben Skizzen der Generalzeichnung, die zum Darstellen und Weitergeben der ersten Ideen und definierten Anforderungen verwendet wird. Der Plan erklärt die grundlegenden Funktionen und das generelle Konzept des Schiffes, wobei die Unterteilungen des Schiffes, wie Räume oder wasserdichte Unterteilungen, Ladung und Passagierbereiche sowie alle wichtigen Maschinenanlagen und Komponenten an Bord dargestellt werden. Diese Übersichtszeichnung beschreibt die generellen Konzepte für Fracht- oder Passagierabfertigung, Antriebssystem und viele andere Aspekte. Basierend auf den Informationen in der Zeichnung, können weitere Diskussion und die weitere Entwicklung des Schiffes beginnen. Verschiedene Berechnungsmodelle, wie beispielsweise für Hydrostatik und Hydrodynamik sowie ein erstes globales Stahlmodell auf Basis des Generalplans werden erstellt. Weiterhin werden erste Schätzungen und Berechnungen für Gewicht, Kosten, Arbeitsstunden und die beginnende Produktionsplanung anhand dieses Planes durchgeführt.

Alle Informationen werden meist rein händisch dem Plan entnommen, wobei die unterschiedlichen Fachabteilungen mit jeweils unterschiedlichem Fokus die Informationen entsprechend ihrer Nutzung verschieden interpretieren und auswerten.

Ziel des Vorhabens ETOPS war es, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um ein intelligentes 3D-Modell anstelle einer 2D-Zeichnung schon in der frühen Projektphase verwenden zu können. Der benötigte 2D-Plan kann direkt aus dem Modell abgeleitet werden und je nach Anforderung mit Details und Beschriftungen in 2D versehen werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 1 zu sehen. Das 3D-Modell ermöglicht nicht nur ein schnelleres und besseres Verständnis komplexer Geometrien, sondern auch die automatische Auswertung des Modells und somit den Abgleich und die Überprüfung von Anforde

rungen und Charakteristika. Entsprechend der Anforderungen verschiedener Konsumenten können 3D-Geometrie, Topologien und Metadaten des Modells zu beliebigen Entwicklungsständen weitgehend automatisch ausgewertet und somit einfacher weiterverarbeitet werden.

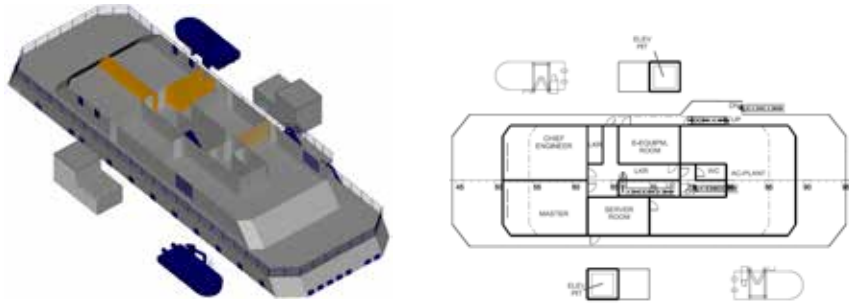


Abbildung 1: Beispiel eines Teilmodells eines 3D-Generalplans und der entsprechenden 2D-Zeichnung

Innerhalb des Forschungsprojektes ETOPS wurden die grundlegenden Methoden und Lösungen entwickelt, wobei das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie das gemeinsame Forschungsprojekt der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Universität Rostock und ThyssenKrupp Marine Systems GmbH gefördert hat.

## Heutige Produktentwicklung

### Frühe Entwurfsphase

Am Anfang eines jeden Entwurfs sind alle verfügbaren Daten eine Sammlung von Ideen über die zu erwartenden Fähigkeiten und Charakteristiken des zu entwerfenden Schiffes. Unter Berücksichtigung von bereits gebauten Vergleichsschiffen, möglichen Einschränkungen durch Randbedingungen und Vorschriften werden die ersten Ideen weiterentwickelt und in einer ersten Skizze zusammengeführt.

Der Start mit einem weißen Blatt Papier erlaubt dem Entwerfer viele Freiheiten, wobei die Ergebnisse technisch umsetzbar sein und innerhalb des je nach Projekt mehr oder weniger deutlich gezogenen Kostenrahmens liegen müssen.

In dieser anfänglichen, kreativen Phase müssen verschiedene Ideen und Variationen untersucht werden, wobei Teile des Schiffes genauer untersucht

werden und andere weniger genau. Je nach Kenntnis des Schiffstypes und der spezifischen Herausforderungen sowie der Anforderungen des Kunden entscheidet der Entwerfer welchen Aspekten besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird und welchen weniger. Die üblichen Projektphasen sind zeitlich begrenzt, wobei Werften in dieser kurzen Zeit, manchmal nur wenige Wochen, möglichst überzeugende, technisch machbare und abgesicherte Lösungen entwickeln müssen. Die Absicherung des mit dem Neubau verbundenen Risikos ist auf Grund des globalen Wettbewerbs und der Preisdrucks besonders wichtig, da der Baupreis zu Vertragszeichnung auf dem dann vorhandenen Wissensstand fixiert wird. Entwürfe in sehr kurzer Zeit detailliert zu erarbeiten und möglichst effiziente Lösungen zu finden, ist daher im globalen Wettbewerb ein großer Vorteil. Genauer geht Krüger (2003) auf den Einsatz von effizienten Entwurfssystemen und den damit verbundenen Wettbewerbsvorteil ein.

Die erforderliche Flexibilität bei der Darstellung der ersten Ideen und die gegebenen kurzen Laufzeiten in den Projektierungsphasen sind die Gründe, warum 2D-Zeichnungen heute noch immer Stand der Technik in der Generalplan-Entwicklung sind

## Entwurfsprozess

Bevor die ersten Skizzen des Schiffes entstehen können, werden einige grundlegende Berechnungen und Abschätzungen durchgeführt, um die Hauptabmessungen des neuen Designs zu bestimmen. Die Entwicklung des ersten Generalplans kann danach am besten als iterativer Prozess mit mehreren Schleifen beschrieben werden. Der erste Entwurf basiert vor allem auf Annahmen und Schätzungen sowie auf Erfahrungen aus anderen Schiffprojekten mit ähnlichen Teilen oder Funktionen. Danach beginnt jede Abteilung

ihren eigenen Entwicklungen und Berechnungen, um die Machbarkeit, Kosten und Gewicht sowie Produktions- und Konstruktionsstunden zu überprüfen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gehen in die nächste Schleife ein, wobei die Untersuchungen von kritischen Teilaspekten mit einem großen Einfluss auf das Gesamtkonzept mit besonderer

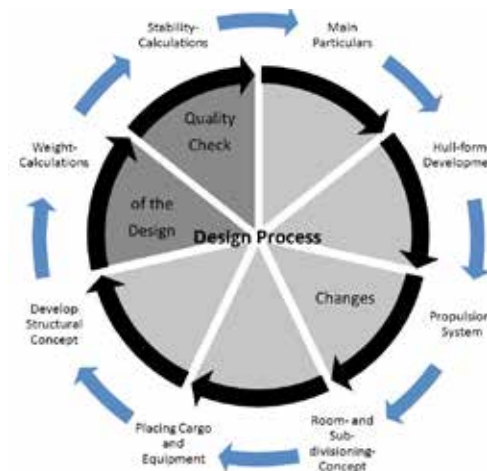


Abbildung 2: Iterativer Designprozess



Priorität behandelt werden. Mit jedem Durchlauf der Schleife wird das Produkt konkreter und detaillierter beschrieben. Je mehr Aspekte in der gegebenen Zeit überprüft und entwickelt werden können, so genauer und abgesicherter ist die Beschreibung des Endprodukts. Schematisch ist die Produktentwicklung in Abbildung 2 gezeigt.

Bei der Entwicklung wechseln sich die Definition und das Überprüfen und Bewertung dieser ab. Dabei werden einige Teilschritte direkt im Generalplan vorgenommen, andere in anderen Systemen.

Die meisten der Entwurfsschritte greifen auf Informationen aus dem Generalplan zu und liefern detailliertere Informationen oder Veränderungsvorschläge zurück. Jeder Abnehmer des Plans benötigt eine bestimmte Teilmenge von Informationen, die auf verschiedene Weise interpretiert und in verschiedene Softwaretools oder einfachen Berechnungsblättern verwendet werden können.

Projektierungsphasen laufen üblicherweise in verschiedenen Runden ab, wobei potentielle Kunden erst grober Preisanfragen auf Basis von groben Spezifikationen anfragen, um schließlich mit einer kleineren Anzahl an potentiellen Bauwerten detaillierter zu verhandeln.

Je schneller und je detaillierter die Überprüfungen durchgeführt werden können, desto geringer ist das Risiko für die Bauwerft. Dies ist besonders wichtig für spezialisierte Prototypen, bei denen für jedes Schiff neue, unbekannte Aspekte untersucht werden müssen und nur bedingt auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Ein 3D-Modell mit vielen auswertbaren Inhalten liefert daher eine verbesserte Datenbasis für eine schnelle und trotzdem umfangreiche Bearbeitung des Projektes. Die Vorteile früher 3D-Entwurfsmodell und der damit vorhandene genauere Informationsstand werden genauer durch *Holmberg and Hunter (2011)* beschrieben.

### Die Rolle des Generalplans

Als erste Darstellung des Schiffes hat der Generalplan eine herausragende Rolle im Entwurfsprozess, besonders in der frühen Projektphase. Die ersten Abschätzungen von Gewicht, Kosten sowie Fertigungsstunden und – methoden werden auf dieser Basis getroffen. Weiterhin werden andere Modelle entsprechend des Generalplans erstellt, um Teilaspekte zu überprüfen und zu bewerten, wie zum Beispiel das Modell zur Berechnung der Hydrostatik oder der Hydrodynamik. Eine Übersicht einiger der üblicherweise im Entwicklungsprozess eingesetzten Software-Systeme ist in Abbildung 3 zu sehen.

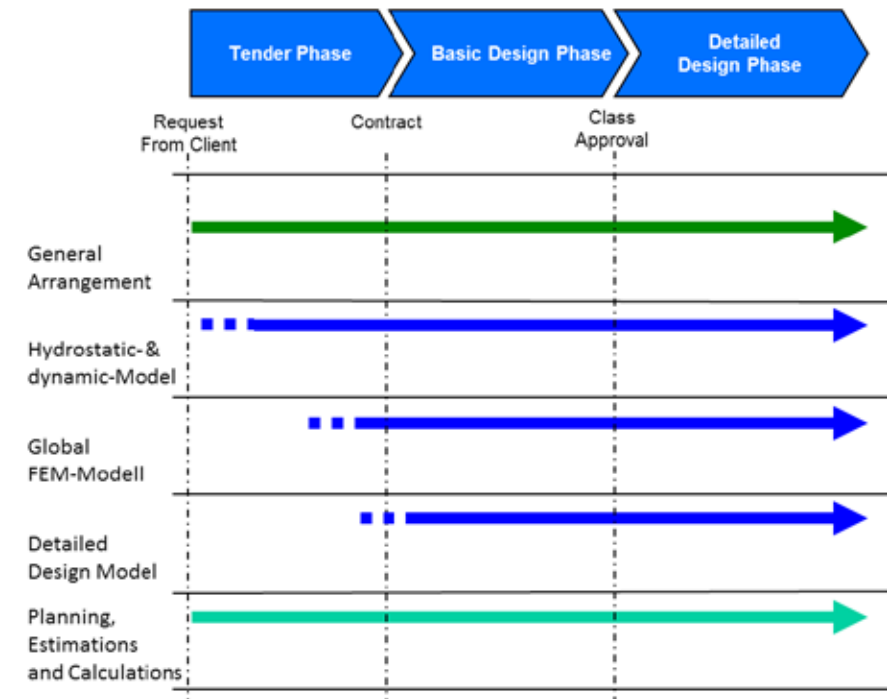


Abbildung 3: Übersicht Einsatz der verschiedener CAD-Systeme im Entwurfsprozess

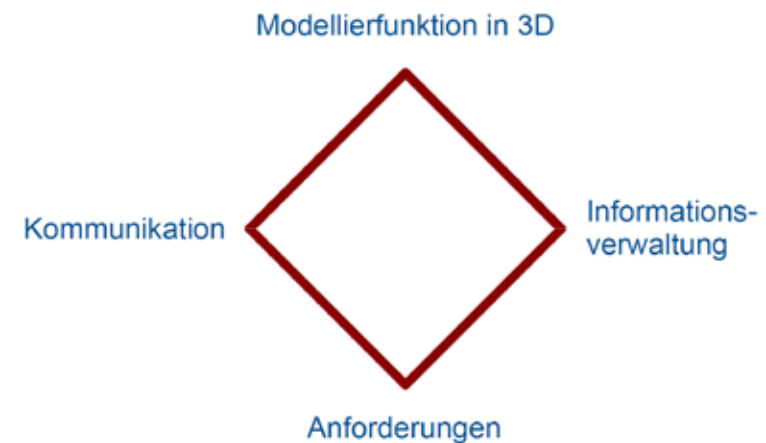


Abbildung 4: Aufgaben des Generalplans

Es ist leicht ersichtlich, dass die Informationen des Generalplans eine besondere Bedeutung haben und damit die Eindeutigkeit und Konsistenz der Beschreibung sowie die klare Kommunikation und einfache Zugänglichkeit



der Inhalte eine der wichtigen Aufgaben des Generalplans sind. Weiterhin ist es neben der Bauspezifikation die erste Möglichkeit die Anforderungen des Kunden mit den Charakteristika des Entwurfs abzugleichen. Die vier Wesentlichen Aufgabenbereiche des Generalplans sind in Abbildung 4 gezeigt.

### Anforderungsmanagement

Ein spezielles im Projekt bearbeitete Arbeitsfeld ist die Verwaltung und der Abgleich von Anforderungen. Unter Requirement Management versteht man einen Prozess bei dem Anforderungen an ein Produkt formuliert und in allen Entwicklungsphasen überprüft werden. Im Rahmen des ETOPS-Projekts wurden Methoden entwickelt die die Überprüfung von zähl- und messbaren Eigenschaften des jeweiligen Schiffsentwurfes softwaretechnisch unterstützt, was unter Berücksichtigung und der zu beachtenden kurzen Zeitraum in die Entwurfsphase einen wesentlichen Vorteil darstellt. Dazu werden bekannte Requirement-Management Werkzeuge mit dem Modell verbunden, wobei die Systeme sich über Skripte miteinander austauschen und die Elemente im Produktdatenmodell des 3D-Generalplan-Werkzeuges mit entsprechenden Metadaten versehen werden müssen. Eine genauere Beschreibung liefern Schenk et al. (2015).

### 3D-Generalplanentwicklung und Einfluss auf den Entwurfsprozess

Der spezielle Entwurfsprozess einer jeden Werft mit den spezifischen, teilweise selbst entwickelten oder stark angepassten Werkzeugen und Arbeitsmethoden bedingen eine spezielle, flexible Entwicklung des Generalplans. Der im Forschungsprojekt verfolgte Ansatz ist die Verwendung eines 3D-Generalplanmodells aus dem ein Plan abgeleitet wird, anstatt des herkömmlichen Erstellen eines 2D-Plans. Durch die Prozessumstellung werden eine Reihe von Vorteilen für den Gesamtprozess erwartet.

### Modellierung

Beginnend mit einem leeren Blatt Papier, werden viele verschiedene Untersuchungen unternommen, die erhebliche Anforderungen an die Modelliergeschwindigkeit und Flexibilität des Werkzeuges stellen. Je nach Erfahrungsschatz bei einem speziellen Schiffstyp, Kundenwünsche und Zeitrahmen werden bestimmte Bereiche genauer und andere weniger detailliert beschrieben. Das Werkzeug muss daher lückenhafte Beschreibungen zulassen und projektspezifische Modellierstrategien unterstützen. Wichtig ist dabei auch die Kombinierbarkeit von 3D- und 2D-Informationen um möglichst flexibel

Informationen von Zulieferern und die teilweise in 2D erstellte Zuarbeit von den Fachabteilungen der Werft einzuarbeiten.

Auf Grund der guten Modellierfähigkeiten, der Anpassbarkeit durch umfassende Programmierschnittstellen und die guten Möglichkeiten der Anbindung von externen Datenbanken und Implementierung von internen Metadaten-speichern wurde das 3D-Generalplanwerkzeug auf Basis eines Werkzeugs aus der Architektur und dem Anlagenbau entwickelt.

Im Hinblick auf die kurzen Projektzyklen und die Vielfalt der verschiedenen darzustellenden Geometrien wurde die schnelle und flexible Modellierung als ein zentrales Thema im Projekt behandelt. Nur wenn die Entwicklung des Modells auch in den durch den Markt gegebenen Projektlaufzeiten gelingt, kann das neue Werkzeug im Alltag eingesetzt werden.

In Abbildung 5 ist ein Beispiel für ein im 3D-Generalplanwerkzeug modelliertes Schiff zu sehen, wobei neben der Modellierung von Wänden, Einrichtung und Ausrüstung auch die Modellierung der Räume und Unterteilungen eine entscheidende Rolle für die spätere Auswertbarkeit des Modells spielt.



Abbildung 5: Beispiel für ein 3D-Generalplanmodell und die zu modellierenden Geometrien

Für ein ansprechendes und vollständiges 3D-Modell müssen im Gegensatz zu einem möglicherweise einfach gehaltenen 2D-Plan mehr Bereiche und

Details dargestellt werden. Um diesen zusätzlichen Modellieraufwand zu kompensieren, wurden Werkzeuge zur schnellen Modellierung entwickelt und umfangreiche Bauteilbibliotheken angelegt. Insbesondere die Interaktion zwischen Räumen und Wänden und die schnelle Navigation und Modellierung in drei Dimensionen stand bei der Entwicklung der Werkzeuge im Fokus. Zusätzlich wurden Methoden und Templates entwickelt, um wiederkehrende Arbeiten zu vereinfachen und zu beschleunigen. Beispiele für im Projekt prototypisch entwickelten Methoden wären Werkzeuge für die automatische Erstellung von Spanrastern in 3D, Werkzeuge für die vereinfachte Erstellung von Räumen und den Trennflächen dazwischen sowie das automatisierte Zuweisen von Metadaten zu Geometrie-Objekten.

### Auswahl der Basissoftware

Die 3D-CAD-Modellierungssoftware die für dieses Projekt ausgewählt wurde ist die Bentley Microstation V8i. Zusätzliche zu den guten Modellierfähigkeiten typischer 3D-CAD-Konstruktionswerkzeugen bietet die Software verschiedene Möglichkeiten zur Einbindung und Anknüpfung von Metadaten. Externe Datenbanken können zum Beispiel über objektrelationale Abbildungen (ORM) mit den 3D-Geometrie-Modellen verbunden werden, wobei Datenbankinformationen und Geometrie-Bauteile über explizite Identifikation eines jeden Bauteils verbunden sind und zusammen das Produktdatenmodell darstellen. Entscheidend für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Basissoftware sind aber die verfügbaren Programmierschnittstellen (APIs). Mehr als 95% aller Funktionen können mit Hilfe der Microstation C++ API direkt oder mit Hilfe eines C#-Wrappers angepasst und erweitert werden.

Neue Funktionalität und Entwurfswerkzeuge können in die Benutzeroberfläche integriert werden und sehen genauso aus wie die originalen Microstation-Funktionen. In der gleichen Weise können Werkzeuge, die keine direkte Notwendigkeit für den Schiffbau haben, aus der Oberfläche herausgenommen werden. Neben den Werkzeugen selbst, kann somit auch die Benutzeroberfläche und Benutzerführung individuell angepasst werden.

### Systeminfrastruktur und Informationsspeicher

Im Projekt wurde ein CAD-System aus der Architektur die Erstellung des 3D-Generalplans in der frühen Entwurfsphase ausgewählt. Um das Modellierungswerkzeug effizient in den Entwurfsprozess einbinden zu können, musste eine Systemarchitektur aller benötigten Komponenten erstellt werden. Hierbei war insbesondere die Wahl und Anbindung des Datenverwaltungssystems zu beachten.

Das Modellierwerkzeug und das eingebundene Datenverwaltungssystem stellt das 3DGA-Werkzeug dar. Bei verschiedenen Werften werden verschiedene Softwaresysteme eingesetzt, so dass eine Datenverwaltung eingesetzt werden muss, deren Inhalte flexible ausgewertet und an verschiedene Abnehmer weitergegeben werden kann. Verschiedene Datenverwaltungsmöglichkeiten sind dabei untersucht und verwendet worden, wobei je nach Inhalt eine Speicherung im Geometriemodell oder einer externen Datenbank Vorteile bietet.

### Schnittstellen des Generalplans

Die im Generalplan enthaltenen Daten werden in anderen Systemen wiederverwendet und im heutigen Prozess von einem 2D-Plan abmodelliert. Die Weiterentwicklungen und Ergebnisse der Untersuchungen fließen später wieder in den Generalplan ein. Das nun vorhandene frühe 3D-Generalplanmodell bietet die Möglichkeit durch geeignete Schnittstellen die Informationen direkt oder mit geringem Mehraufwand zu übernehmen und die Weiterentwicklungen zurückfließen zu lassen. Bei der Auswahl der Basissoftware wurde darauf geachtet, auf die Informationen zugreifen zu können. Erste Ideen und Konzepte für die Auswertung und Aufbereitung der Information zur Entwicklung der Schnittstellen wurden erarbeitet.

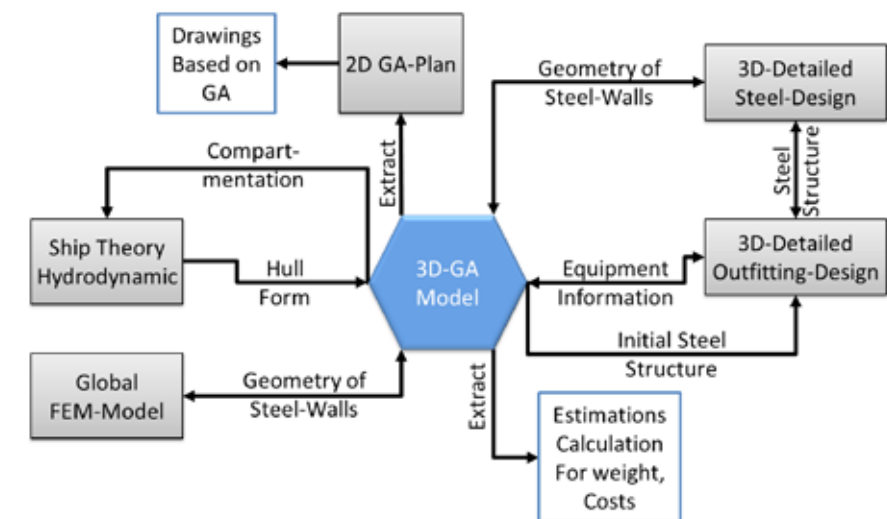


Abbildung 6: Angedachte direkte Austauschmöglichkeiten des Generalplans mit anderen Produktbeschreibungen

Eine vereinfachte Übersicht der Schnittstellen und Datenströme vom und zum Generalplan ist in Abbildung 6 zu sehen.

## Zeichnungsableitung und Kommunikation der Generalplan-Informationen

Der 2D-Generalplan ist trotz neuer Darstellungsmöglichkeiten, wie dem 3D-Generalplan-Modell, weiterhin der übliche Weg um das Schiff Kunden oder Zulieferern zu präsentieren. Daher ist die schnelle Ableitung des Plans aus dem 3D-Modell mit den in der Industrie üblichen Darstellungsweisen besonders wichtig. Weiterhin ist der Plan Vertragsbestandteil und eine eindeutige Darstellung daher essentiell.

Nicht alle Informationen sind in 3D verfügbar oder einfach ableitbar, daher werden Beschriftungen und Markierungen teilweise händisch hinzugefügt. Ein Beispiel für einen aus dem 3D-Modell abgeleiteten Teil eines Planes ist in Abbildung 7 zu sehen, wobei die in 2D erstellten Zeichnungsteile in Rot dargestellt sind. Alle weiteren darstellten Elemente werden entsprechend verschiedener Ableitungsregeln aus dem 3D-Modell abgeleitet.

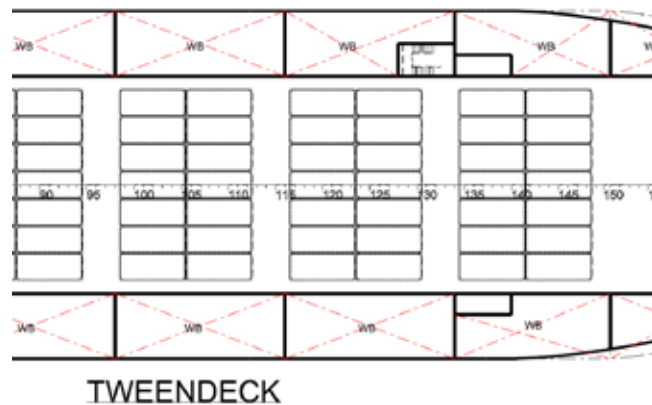


Abbildung 7: Beispiel für eine abgeleitete 2D-Zeichnung

Die Präsentation des 3D-Modells ermöglicht es schnell einen guten Überblick über den Entwurf und die teilweise komplexen Teilbereiche zu bekommen. Um das Modell leicht zugänglich machen zu können, eignet sich ein 3D-PDF, welches eine einfache 3D-Darstellung und verschiedenen Werkzeuge zum Auswählen von Teilbereichen, Erstellen von Schnitten und Anzeigen von Bauteilinformationen bietet. Ein Beispiel in Abbildung 8 zu sehen.

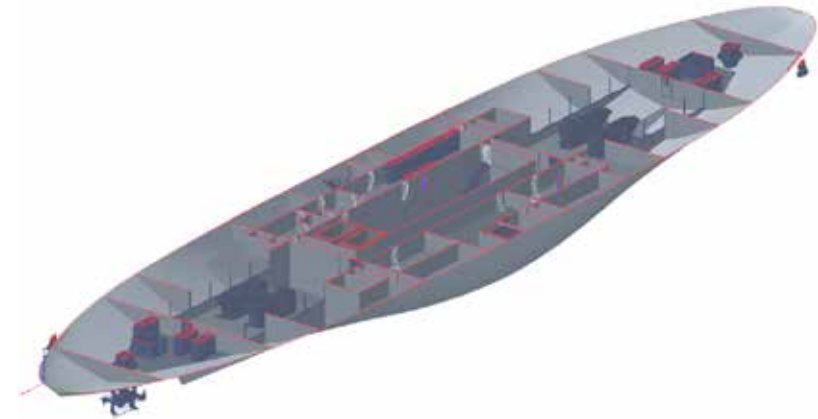


Abbildung 8: Beispiel für ein 3D-PDF als neues Informationsmedium

## Auswertung des Entwurfs

Das nun vorhandene 3D-Modell beschreibt das Schiff zu einem frühen Zeitpunkt in der Projektphase deutlich genauer als der 2D-Plan, wobei die enthaltenen Informationen teilautomatisch ausgewertet werden können. Neben der Auswertung der Raumgeometrien, wie Volumen, Schwerpunkten, Erstreckungen und Oberflächen, bieten modellierte Komponenten und Stahlbauteile eine für die frühe Phase sehr detaillierte Datenbasis um Abschätzungen von Materialbedarf, Fertigungsaufwand und Konstruktionsaufwand zu können.



Abbildung 9: Beispiel für Stahlstruktur in einem Generalplan-Modell

Im Forschungsprojekt wurden Auswertungsalgorithmen entwickelt, die eine detaillierte Auswertung und Dokumentation des Modells ermöglichen. Beispiele hierfür sind detaillierte Raumlisten und Komponentenlisten. Beispiele für auswertbare Bauteile sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 mit den gezeigten Stahlflächen und Maschinenraumkomponenten zu erkennen.

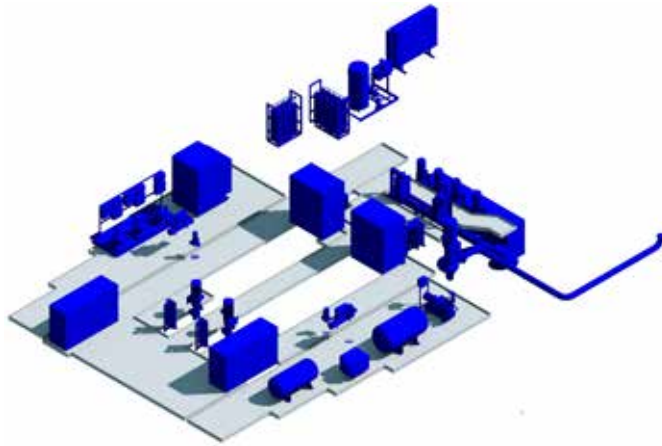


Abbildung 10: Beispiel für Komponenten in einem Generalplan-Modell

### Fazit und Ausblick

Innerhalb des Forschungsprojektes wurde der Entwurfs- und Konstruktionsprozesse der beteiligten Werften analysiert und Anforderungen an einen neuen Ansatz für die frühe Produktentwicklung erfasst. Das anschließend ausgewählte Basiswerkzeug wurde entsprechend der Anforderungen angepasst und erweitert, wobei ein Fokus auf die Erstellbarkeit des Modells gesetzt wurde, um den Beginn des neuen Prozesses mit einem frühen 3D-Modell überhaupt zu ermöglichen.

Mit dem nun als Demonstrator vorhandenen Werkzeug konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Methoden und Modellierstrategien eine ähnlich schnelle Erstellung des Generalplans in 3D wie in 2D möglich ist. Die Weiterentwicklung der Werkzeuge für den täglichen Werftbetrieb und die Integration in den Prozess können nach Abschluss des Vorhabens begonnen werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine neue Möglichkeit der Koordinierung des Entwurfs-Prozesses, wobei durch die neuen Ansätze für die Modellierung die Grundlage für die Erstellbarkeit der teilweise komplexen Modell in kurzer Zeit ermöglichen.

Die Positive Erkenntnisse bei den Praxistests zeigen die grundsätzliche Möglichkeit den Entwurfsprozess in Zukunft zu einem frühen Zeitpunkt mit einem 3D-Modell zu beginnen und durch den erhöhten Informationsgehalt das Risiko von neuen Projekten teilweise zu reduzieren. Die detaillierte Datenbasis bietet viel Potential um den Gesamtprozess weiter zu verbessern und die nun vorhandenen Informationen im Prozess über geeignete Schnittstellen weiterzugeben und gezielt nachgelagerte Prozesse zu unterstützen.

### Literatur

- [1] KRÜGER, S. (2003), The Rolle of IT in Shipbuilding, 2nd International Euro Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'03), Hamburg, S. 525-533
- [2] HOLMBERG, T., HUNTER, S.D. (2011), Increasing Efficiency in the Ship Structural Design Process 10th International Euro Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'11), Hamburg, S. 536-550
- [3] SCHENK, S., Lindner, H., BRONSART, R., FRÖMMING, K., EBELING, B. (2015) A contribution to the Requirement Formalisation in the Early Stage of Ship Design (IMDC 2015), Tokyo, S. 146-157

## **DriveCoM – Einsatz drahtloser Kommunikationstechnologie zur wirtschaftlichen Zustandsüberwachung von Schiffsgetriebenen**

Förderkennzeichen: 03SX292 A-D

Thomas Iwert (Bachmann Monitoring GmbH)  
Dr. Daniel Hoffmann  
(Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.)  
Peter Peitsch (microsensys GmbH)  
Dr.-Ing. Thomas Kruse (REINTJES GmbH)  
Sebastian Schirmmacher  
(IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH)

### **Einleitung**

Das Schiffsgetriebe wird regelmäßig durch Klassifizierungsgesellschaften inspiziert und auf Tauglichkeit überprüft [Sch07]. Nur die regelmäßige Erfassung von zustandsrelevanten Messdaten ermöglicht eine Ausweitung der Inspektionsintervalle [Lös06]. Ein ungeplanter Tag Stillstand im Hafen verursacht hohe Kosten für den Schiffsbetreiber, ohne dass eventuell notwendige Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt sind. Abhilfe schafft die Strategie der zustandsorientierten Instandhaltung (engl.: condition-based maintenance, CBM), die auf Basis von gesammelten Informationen Instandhaltungsmaßnahmen ableitet und terminiert [Jar06].

Im maritimen Umfeld existieren bereits Lösungen, die CBM an Bord eines Schiffes vorsehen. Allerdings erfordern diese konstruktive Eingriffe in den vorhandenen Schiffsantrieb oder es entsteht ein aufwendiger Verkabelungsaufwand für Datenübertragung und Energieversorgung. Drahtlose Sensornetze reduzieren den Installationsaufwand bereits, arbeiten jedoch oftmals mit limitierten Energiespeichern. Der Austausch von Batterien oder anderen Energiespeichermedien erfordert wiederum kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen.

Daraus abgeleitet war das Ziel des Forschungsvorhabens „DriveCoM“ die Entwicklung und Erprobung einer Methode und der notwendigen Technologie für eine kostengünstige und zuverlässige Erfassung und Verarbeitung von Daten bzgl. des Betriebszustands von Schiffsgetriebenen. Miniaturisierte, autarke Sensorknoten sollen draht- und eigenenergieles Vibrationen, Temperaturen, Drehzahlen und Drehmomente überwachen (Abb. 1).



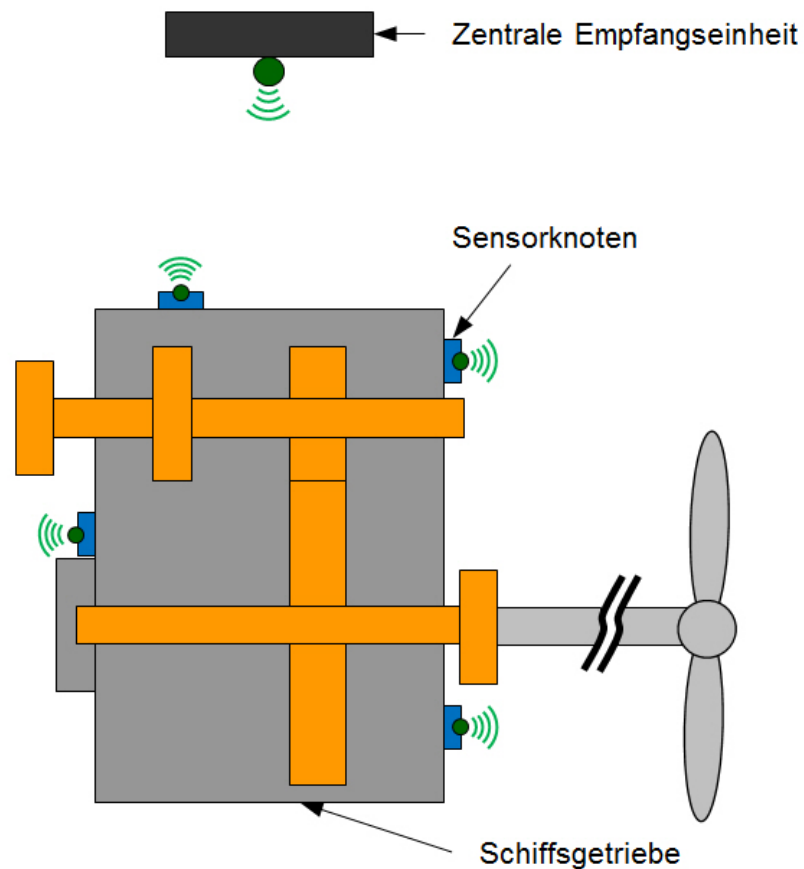


Abbildung 1: Zustandsüberwachung am Schiffsgetriebe mit Hilfe autarker Sensoren

Der Aufbau eines energieautarken drahtlosen Sensornetzwerks erfordert eine Vielfalt an interdisziplinärem Expertenwissen und variiert durch die Anforderungen der spezifischen Applikation [Beck04]. Zur Erreichung dieser komplexen Zielsetzung wurde die Arbeit in vier Teilbereiche gegliedert, die eng aufeinander abgestimmt wurden, um den Gesamtaufbau zu realisieren.

1. Entwicklung einer Methode zur aufwandsreduzierten Signalanalytik
2. Auswahl und Entwicklung energiesparender Sensorik zur Überwachung von Schwingungen, Temperaturen, Drehzahl und Drehmoment
3. Entwicklung von Lösungen zur lokalen Energieversorgung der Sensorknoten

4. Einsatz von UHF-Funktechnologie zur drahtlosen Datenübertragung zwischen Sensorknoten

### Motivation

Im maritimen Umfeld existieren bislang nur wenige Ansätze für den Einsatz von CBM. LIU ET. AL. [Liu00] entwickelten ein Condition Monitoring System (CMS) für den Dieselmotor des Schiffes, das in einem integrierten Bypass der Ölrückleitung des Kurbelgehäuses installiert wird. Auch KOUREMENOS und HOUNTALAS [Kou97] entwickelten eine Methode zur Überwachung des Dieselmotors. Kabelgebundene Drucksensoren am Zylinder und Kraftstoffeinspritzsystem übertragen Messdaten auf eine Auswerteeinheit, die in Verbindung mit einem speziell angepassten Bewertungsalgorithmus den Zustand des Dieselmotors analysieren kann. YANG ET. AL. [Yan13] entwickelten ein CMS für Asynchronmotoren im Schiffsbereich und in Windenergieanlagen. Die aufgeführten Arbeiten stellen jedoch nur kabelgebundene Lösungen dar, die einen erheblichen Installationsaufwand erfordern. Eine Möglichkeit den Verkabelungsaufwand bei CMS zu reduzieren stellt die Verwendung von drahtlosen Sensornetzwerken dar [Mar08]. PAIK ET. AL. [Pai09] statteten ein gesamtes Schiff mit drahtlosen Sensorknoten aus, die ihre Daten mit der Funktechnologie zigBee übertragen. PILSAK ET. AL. [Pil09] verfolgten mit der IEEE 802.15.4 Funktechnologie das Ziel, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungsdruck im Maschinenraum mit Hilfe von zwei aktiven Sensorknoten, vier Knoten zur Datenweiterleitung und einer Empfangseinheit aufzuzeichnen. Nachteilig bei diesen Lösungen sind hohe Instandhaltungskosten für den regelmäßigen Austausch der Batterien, die als Energieversorgung für die Sensorknoten genutzt wurden und deren Zustand es zusätzlich zu überwachen gilt [Zhu09, Glo99]. In Branchen außerhalb des maritimen Umfelds sind bereits energieautarke Sensorsysteme in Form von Forschungsarbeiten und Prototypenaufbauten erprobt worden. In der Papierindustrie wurde beispielsweise ein thermoelektrischer Generator (TEG) verwendet, der aus der Temperaturdifferenz zwischen der Maschinenabwärme und der Umgebungstemperatur elektrische Energie zum Betrieb der Sensorik erzeugt. Eine Funkeinheit übermittelt signifikante Maschinenparameter einmal pro Stunde an eine zentrale Einheit [Ham12]. Auch in der Luftfahrtindustrie wurden energieautarke Monitoring-Systeme entwickelt, die ihre Energie aus der Temperaturdifferenz zwischen Flugzeugaußenhülle und Innenraum durch die Verwendung eines TEG gewinnen [Dil14].

Die vorliegenden Arbeiten verdeutlichen, dass die Thematik der zustandsorientierten Instandhaltung für Schiffsgetriebe von großer Bedeutung ist. Die Hemmnisse wie beispielsweise hoher Installationsaufwand oder regelmäßige Wartungskosten des Systems sollen mit Hilfe des DriveCoM-CMS behoben werden.

## Aufbau eines energieautarken, drahtlosen Sensornetzwerks

Der Aufbau eines energieautarken, drahtlosen Sensornetzwerks erfordert umfangreiche Kenntnisse der Messaufgabe und der Umgebungsbedingungen. Dazu wurde ein Beispielgetriebe anhand von Praxisrelevanz und Verfügbarkeit ausgewählt. Anschließend konnten geeignete Messpunkte identifiziert werden und die Messaufgaben detailliert werden. Alle Anforderungen an das Sensornetzwerk wurden in einem Lastenheft zusammengetragen, ein Auszug der Anforderungen an die Messaufgaben ist in Tab. 1 dargestellt.

MESSGRÖSSE	ANFORDERUNG	ZAHLENWERT
Schwingungen	Messbereich	$\pm 40 \text{ m/s}^2$
	Bandbreite	1500 - 2000 Hz
	Auflösung	$0,05 \text{ m/s}^2$
	Mindestauflösung	11 bit
	Leistungsaufnahme	< 3 mW
	Versorgungsspannung	2 - 3 V
Temperatur	Temperaturbereich	0 - 150 °C
	Messbereich	400 - 7.500 Nm
Drehmoment	Messprinzip	magnetostruktiv
Drehzahl	Leistungsverbrauch	< 1 mW
	Versorgungsspannung	3 V
	Montageabstand	> 2 mm
	Drehfrequenz	< 30 Hz

Tabelle: Anforderungen an die Sensorik

Ebenfalls wurden die Randbedingungen im Betriebszustand analysiert, von denen das Sensornetzwerk nicht beeinflusst werden darf. Neben Störeinflüssen wie Vibrationen oder klimatischen Bedingungen wie salziger Seeluft, die zu Korrosion führen kann, wurde auch die Reinigung des Getriebes berücksichtigt, wodurch der Sensorknoten mechanisch belastet wird und Feuchtigkeit ertragen muss. Die schematische Struktur des Sensornetzwerks ist in Abb. 2 dargestellt.

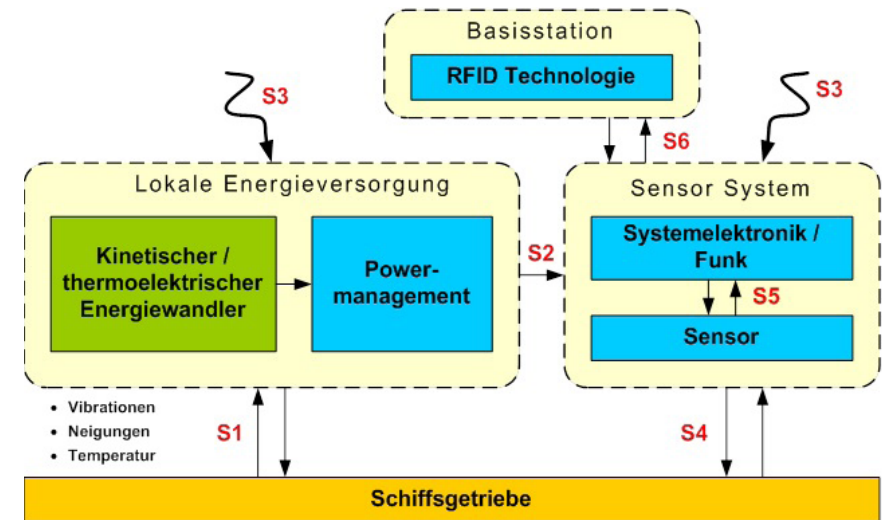


Abbildung 2: Systemstruktur und Schnittstellen des drahtlosen Sensornetzwerks

Die Systemstruktur beschreibt die notwendigen Schnittstellen der Teilziele. Einerseits benötigt die lokale Energieversorgung mittels Methoden des Energy Harvesting Kontakt zu einem Bereich des Schiffsgetriebes mit vorhandener Energie (S1). Ein intelligentes Powermanagement versorgt das Sensorsystem mit einer definierten Eingangsspannung (S2). Die Sensorik muss unmittelbar an der geeigneten Messstelle appliziert werden (S4). Die Messdaten des Sensors werden von einem Mikrocontroller aufbereitet, vorverarbeitet und der Funkeinheit zur Verfügung gestellt (S5). Zwischen zentraler Empfangseinheit und dem Sensorknoten werden die relevanten Daten drahtlos übertragen (S6). Sämtliche Störeinflüsse durch Öl oder Verschmutzung sind mit S3 gekennzeichnet.

### Energieversorgung

Limitierte Energiespeicher wie Batterien erfordern eine Überwachung des Ladezustands und einen regelmäßigen Austausch. Insbesondere im schwer zugänglichen Schiffsrumpf ist dies ein kostenintensiver Instandhaltungsvorgang, der umgangen werden soll. Energy Harvesting-Systeme nutzen vorhandene Energiequellen in der Umgebung der Messstelle und wandeln diese in elektrisch nutzbare Energie für den Sensorknoten um. Quellen für Energy Harvesting sind beispielsweise Vibrationen und Bewegungen, Licht, Temperaturdifferenzen oder elektromagnetische Strahlung [Bog09].

Im Umfeld des Schiffsgetriebes lassen sich kinetische und thermische Energie identifizieren, die zur Nutzung in Energy Harvesting-Systemen in Frage



kommen. Kinetische Energie liegt in Form von mechanischen Schwingungen vor, die durch die Rotation der Hauptwellen als auch durch den ständigen Eingriff der Zahnräder entstehen. Bei der Analyse der Schwingungen am Getriebegehäuse wurde jedoch festgestellt, dass die Amplituden von dominanten Frequenzen, die sich für einen konventionellen kinetischen Harvester eignen würden, mit der Antriebsdrehzahl variieren. Ein kinetischer Harvester basiert in der Regel auf einem Feder-Masse-Dämpfer-System, dessen Resonanzbereich die Möglichkeit der Energieumwandlung ermöglicht [Kan08]. Die Schwingungen des Getriebes variieren jedoch mit der Drehzahl des Hauptantriebs, wodurch sich die dominanten Frequenzen verschieben. Außerhalb des Resonanzbereichs kann ein kinetischer Harvester nicht ausreichend Energie für den Betrieb der Sensorik zur Verfügung stellen. Daher wurde ein kinetischer Energy Harvester entwickelt, dessen Gesamtsteifigkeit über eine geometrische Stellgröße verändert werden kann und somit über eine einstellbare Resonanzfrequenz verfügt (Abb. 3).

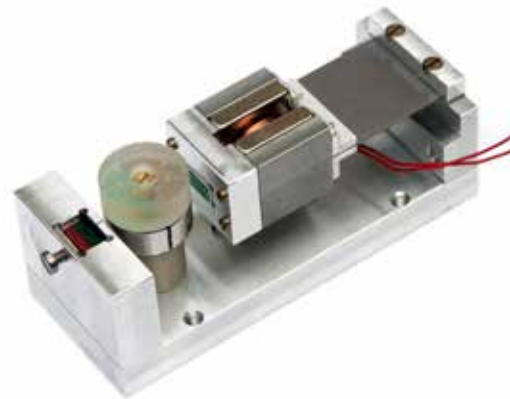


Abbildung 3: Systemstruktur und Schnittstellen des drahtlosen Sensornetzwerks

Eine weitere Möglichkeit der Energiewandlung stellt die Nutzung von Temperaturunterschieden dar. TEG wandeln unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts die Temperaturdifferenz in nutzbare elektrische Energie. Wenn ein thermoelektrisches Material von einem Wärmestrom durchflossen wird, entsteht eine elektrische Spannung [Fah09, Gla06, Web06]. Zwei elektrisch verbundene Materialien mit unterschiedlichen thermoelektrischen Eigenschaften bilden ein Thermopaar. TEG sind aus einer Vielzahl von Thermopaaren aufgebaut, die elektrisch in Serie geschaltet sind [Sny08, Dal09]. Die generierte Spannung eines TEG hängt vom Seebeck-Koeffizienten  $\alpha$ , der Anzahl der verwendeten Thermopaare  $n$  und der anliegenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ab.

Während des Betriebs entsteht durch Friktion der Zahneingriffe Reibungswärme, die das Getriebe aufheizt. Zugeführtes Öl transportiert die Wärme von den beanspruchten Bauteilen ab. Eine mit Meerwasser durchströmte Leitung ermöglicht einen Wärmeübergang, der das im Kreislauf geführte Öl

abkühlt und damit die Getriebetemperatur in einem gefahrlosen Bereich erhält. Bei der Gestaltung der thermoelektrischen Energieversorgung wurden zwei Lösungsansätze verfolgt. Der erste Ansatz nutzt die maximale Temperaturdifferenz in der Nähe des Wärmetauschers aus, indem zwischen öltemperierter Leitung und der mit Seewasser durchflossenen Kühlleitung mittels einer Adapterkonstruktion ein TEG platziert wird. Diese Lösung beinhaltet den Nachteil, dass die ausgewählten Messstellen nicht in unmittelbarer Nähe des Wärmetauschers anzutreffen sind und daher ein minimaler Verkabelungsaufwand zwischen TEG und Sensorknoten notwendig ist. Der zweite Ansatz verfolgt die Ausnutzung der Temperaturdifferenz zwischen Getriebegehäuse und der Umgebungsluft mittels passiven Kühlkörpern. Damit entfällt sämtlicher Verkabelungsaufwand, allerdings ist die Energieausbeute auf Grund der geringeren Temperaturdifferenz geringer. Die beiden Lösungsalternativen sind in Abb. 4 dargestellt.

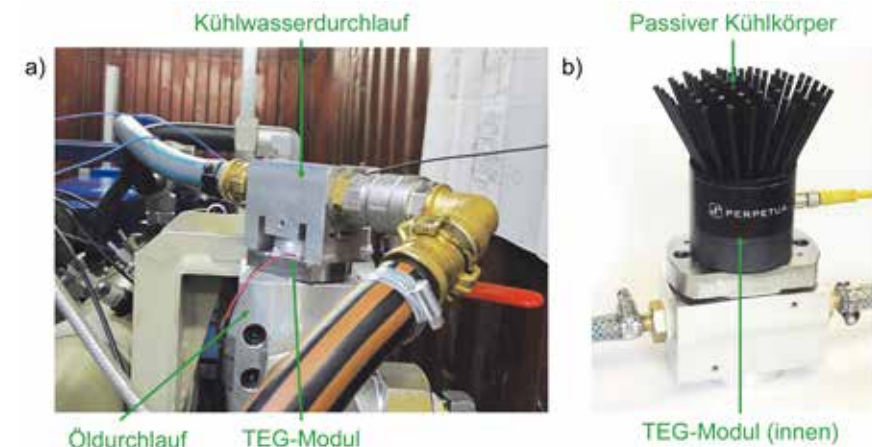


Abbildung 4: a) Aktiv gekühlter TEG, b) TEG mit passivem Kühlkörper

### Eingesetzte Sensorik

Die Messung von Schwingungen kann durch Bewertung einzelner Frequenzen Aufschluss über den Zustand des Schiffsgetriebes geben [Kra59]. Der Grundgedanke der schwingungsbasierten Zustandsüberwachung basiert auf der Veränderung von Steifigkeiten, Massen und Energiezuständen, die die Dynamik des Systems verändern [Far01, Cam57]. Durch Veränderungen in den Spektren der Schwingungsdiagnostik können Verschleißzustände prognostiziert werden [Nie14]. Um auch höherfrequente Anteile des Schwingungsspektrums sicher zu erfassen, wurde ein piezoelektrischer Schwingungssensor mit einer Bandbreite von 15.000 Hz ausgewählt. Aus den Roh

daten des Sensors lässt sich nicht unmittelbar auf den Getriebezustand schließen. Durch die Abbildung der Schwingungsdaten im Frequenzbereich lassen sich charakteristische Eigenschwingungen detektieren und einzelnen Bauteilen zuweisen. Die Transformation der Schwingungsdaten in den Frequenzbereich erfolgt mit Hilfe der Fourier Transformation. Mit variierender Fahrgeschwindigkeit des Schiffes unterscheiden sich die für die Zustandsdiagnose signifikanten Frequenzen einerseits hinsichtlich der Amplitudengröße, andererseits treten bei bestimmten Geschwindigkeiten Frequenzgrößen auf, die bei anderen Drehzahlen nicht zu detektieren sind. Aussagen zum Zustand des Getriebes können somit nicht allein mit der Frequenzanalyse getroffen werden. Eine geeignete Methode, um Wälzlagerschäden zu diagnostizieren, ist die Hüllkurvenanalyse, bei der die durch Amplitudendmodulation erhaltene Einhüllende des Ausgangssignals im Frequenzbereich untersucht wird [Ran01]. Dazu wurde eine analoge Gleichrichtung und Tiefpassfilterung auf dem Sensorknoten vorgesehen.

Die Kenntnis der aktuellen Drehzahl der An- oder Abtriebswelle stellt eine essentiell wichtige Größe dar, insbesondere zur Durchführung einer Ordnungsanalyse bei drehzahlvariablen Zuständen. Bei der Auslegung des Drehzahlsensors wurde maßgeblich auf geringen Energieverbrauch geachtet. Daher wurde ein magnetoresistives Messprinzip ausgewählt, dessen Messsignal direkt auf den Zählereingang der intelligenten Recheneinheit im Sensorknoten geführt werden kann.

Die Messgröße Temperatur dient zur Überlastidentifikation. Steigt die Temperatur an kritischen Lagerstellen signifikant an, so lässt dies Rückschlüsse auf ungeeignete Betriebszustände oder Überlastungen zu. Die Messung der Temperatur erfolgt in Kombination mit der Schwingungsmessung, da der ausgewählte Sensortyp bereits mit einem zusätzlichen Temperatursensor ausgestattet ist.

Ebenfalls zur Identifikation von Überlastzuständen oder unzulässigen Betriebszuständen wurde das Drehmoment erfasst. Um möglichst wenig Installationsaufwand zu erzeugen, wurde das Messprinzip der Magnetfeldänderung ausgewählt. Der Drehmomentsensor arbeitet berührungslos und es bedarf keiner zusätzlichen Magnetisierung der Welle.

### **Drahtloser Sensorknoten**

Der Sensorknoten ist so aufgebaut, dass eine zentrale Recheneinheit alle notwendigen Prozesse für die Funktionalität des gesamten Sensorknotens steuert und überwacht. Bei der Auswahl des Mikrocontrollers wurde insbesondere auf einen sehr geringen Energieverbrauch geachtet. Für die Schwin-

gungsdiagnostik wurde neben der Rohdatenübertragung zusätzlich die Berechnung von Signalkennwerten auf dem Mikrocontroller implementiert. Aus den Schwingungssignalen im Zeitbereich werden beispielsweise der Effektivwert der Beschleunigung oder der Betrag des maximal auftretenden Messwerts extrahiert und als Bewertungsgrundlage übertragen.

Für die funkgestützte Identifikation der Sensoren und die Datenkommunikation ihrer Messwerte eignet sich die RFID-Technologie [Fin06]. Besondere Herausforderungen ergeben sich durch das technisch schwierige Umfeld mit metallischer Umgebung, Ölverschmutzungen und bewegten Bauteilen. Das Frequenzband der Datenkommunikation arbeitet zwischen 865 und 868 MHz. Der maximale Abstand zwischen Transponder und Lesegerät wurde mit 1 Meter festgelegt. Die physikalische Datenübertragungsrate sollte bis zu 160 kbaud betragen. Das Sensorboard wird in einem Gehäuse untergebracht, um den rauen Umgebungsbedingungen standzuhalten. In das Gehäuse wurde gleichzeitig eine Keramikantenne zur Datenkommunikation integriert. Eine aktive Leseinheit, die an eine verfügbare Quelle des Bordnetzes angeschlossen wird, ermöglicht die Einsparung weiterer Energie, da der Sensorknoten während der Datenübertragung selbst nicht aktiv senden muss. Die gesamte Elektronik des Sensorknotens ist in Abb. 5 dargestellt.

Neben der RFID-Technologie wurde ebenfalls der zigBee-Standard als Funkübertragung in einem separaten Sensorknoten überprüft. Mit dieser aktiven Funktechnologie, die dem Industriestandard entspricht, sind weniger Störeinflüsse in Folge der metallischen Umgebung zu erwarten.



Abbildung 5: Elektronik des Sensorknotens

## Integration am Schiffsgetriebe

Für die Integration der Teillösungen am Schiffsgetriebe musste ein geeignetes Prüffeld geschaffen werden. Zur Abbildung der metallischen Einhausung im Schiffsrumpf wurde das Beispielgetriebe in einem Metallcontainer aufgestellt. Insbesondere für die drahtlose Datenübertragung ist dieser Zusatzaufwand zur Abbildung eines realitätsnahen Betriebszustandes erforderlich.

Umgesetzt wurden mehrere Funktionsmuster. Die Energieversorgung wurde mit einem kinetischen Harvester, einem TEG mit Adapterkonstruktion (vgl. Abb. 4) am Wärmetauscher und einem TEG mit Passivkühlkörper realisiert. Für die Lösung am Wärmetauscher mussten kurze Kabel zu den verschiedenen Sensorknoten (Drehmoment, Drehzahl, 2x Schwingungssensor) verlegt werden. Die Ausrichtung des RFID-Lesegeräts erfolgte in einem Abstand von ca. 50 cm (Abb. 6).



Abbildung 6: Drahtlose Datenübertragung via RFID (rot) und zigBee (grün)

Ebenfalls konnte ein zweiter Sensorknoten mit der Funkalternative zigBee auf der Getriebeoberfläche appliziert werden. Eine zentrale Empfangseinheit konnte in einer Entfernung von 10 Metern den vollständigen Datensatz des angeschlossenen Schwingungssensors aufzeichnen.

## Evaluierung

Zur Evaluierung der Zustandsüberwachung wurden sämtliche Funktionalitäten umfangreich geprüft. Die Sensorknoten wurden am Getriebeprüfstand appliziert, die Empfangseinheiten in sinnvollen Reichweiten aufgestellt. Die Getriebedrehzahl wurde dreistufig von 320 1/min über 640 1/min auf maximal 880 1/min gesteigert. Bei einer geringen Drehzahl von 320 1/min ist eine Getriebetemperatur von 43,2 °C zu verzeichnen, während bei höherer Drehzahl häufigere Zahneingriffe auftreten. Die dadurch entstehende Wärme bewirkt eine erhöhte Oberflächentemperatur des Getriebes von 50,9 °C bei einer Drehzahl von 640 1/min und 54,7 °C bei 880 1/min. Da sich die elektrische Leistung des TEG mit steigender Temperaturdifferenz erhöht, sind damit bei erhöhter Temperatur kürzere Messintervalle möglich.

Mit Hilfe des aktiv gekühlten TEG am Wärmetauscher konnten kontinuierlich zwischen 7 mW und 10 mW elektrischer Leistung generiert werden. Damit war ein Betrieb von mehreren Sensorknoten gleichzeitig möglich. Der Spannungsverlauf am verbauten Kondensator ist beispielhaft in Abb. 7 dargestellt.

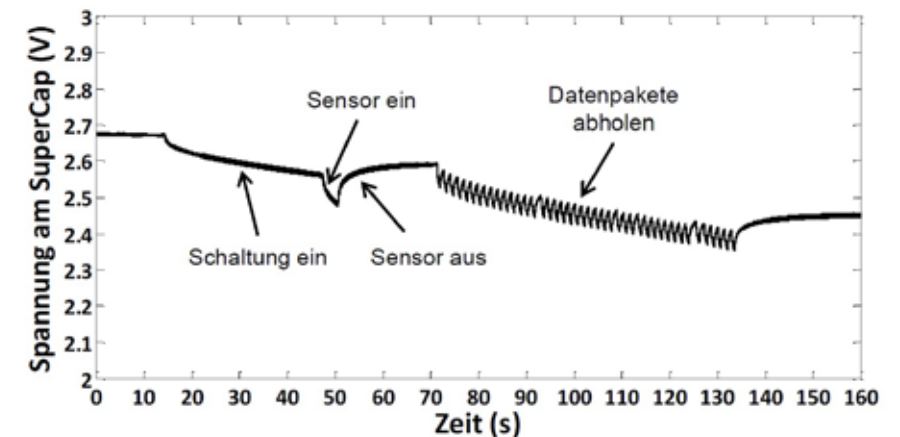


Abbildung 7: Spannungsverlauf des Kondensators

Die Messintervalle des Sensorknotens mit passiv gekühltem Harvester und zigBee-Funkstandard variieren ebenfalls mit der Getriebedrehzahl und betragen bei geringer Drehzahl (320 1/min) 18 Minuten und 15 Sekunden, während bei höchster Rotationsgeschwindigkeit (880 1/min) lediglich 5 Minuten und 39 Sekunden (Abb. 8) benötigt werden. Zur Auswertung der praktischen Versuche wurden die Getriebetemperatur, die Umgebungstemperatur, die zur Verfügung gestellte Spannung des TEG sowie die Spannung des Kondensators aufgezeichnet. Jeder kurzzeitige Spannungseinbruch im Spannungsverlauf des Akkumulators stellt eine erfolgreiche Datenaufzeichnung und Messdatenübertragung dar.



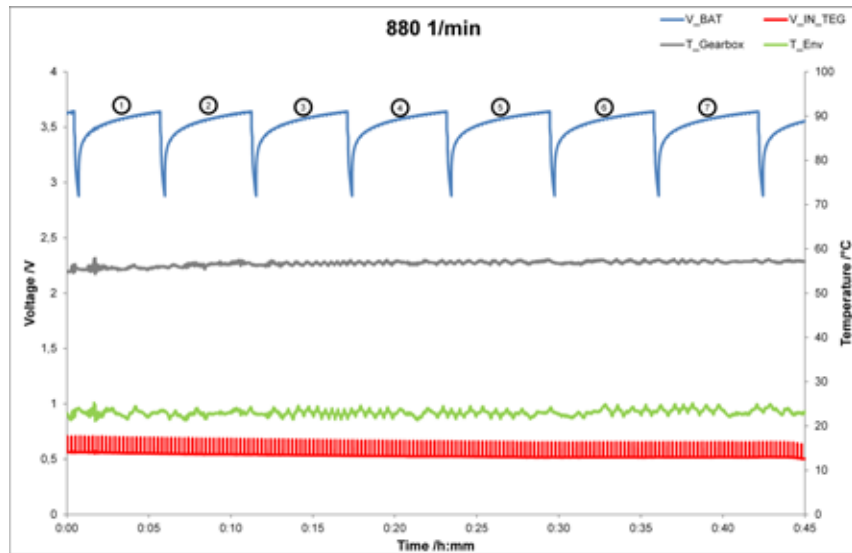


Abbildung 8: Temperatur- und Spannungsverlauf des passiv gekühlten TEG mit zigBee-Funktechnologie

Neben den Temperaturverläufen sind insbesondere die Schwingungsdaten für eine Zustandsdiagnose von Bedeutung. Hierzu konnten 8192 Werte erfolgreich übertragen und auf der zentralen Empfangseinheit analysiert werden. Zur Überprüfung der Funktionalität der Zustandsdiagnostik wurde sowohl Messungen im intakten Zustand durchgeführt, als auch mit einem künstlich eingebrachten Lagerschaden (Abb. 9). Die Schadensfrequenzen bei 33,5 Hz und 55,0 Hz sind rot markiert. Im intakten Zustand sind lediglich die Hauptdrehfrequenzen leicht zu erkennen. Im Schadensfall konnten signifikante Ausschläge der Schadensfrequenzen sowie höhere Harmonische identifiziert werden.

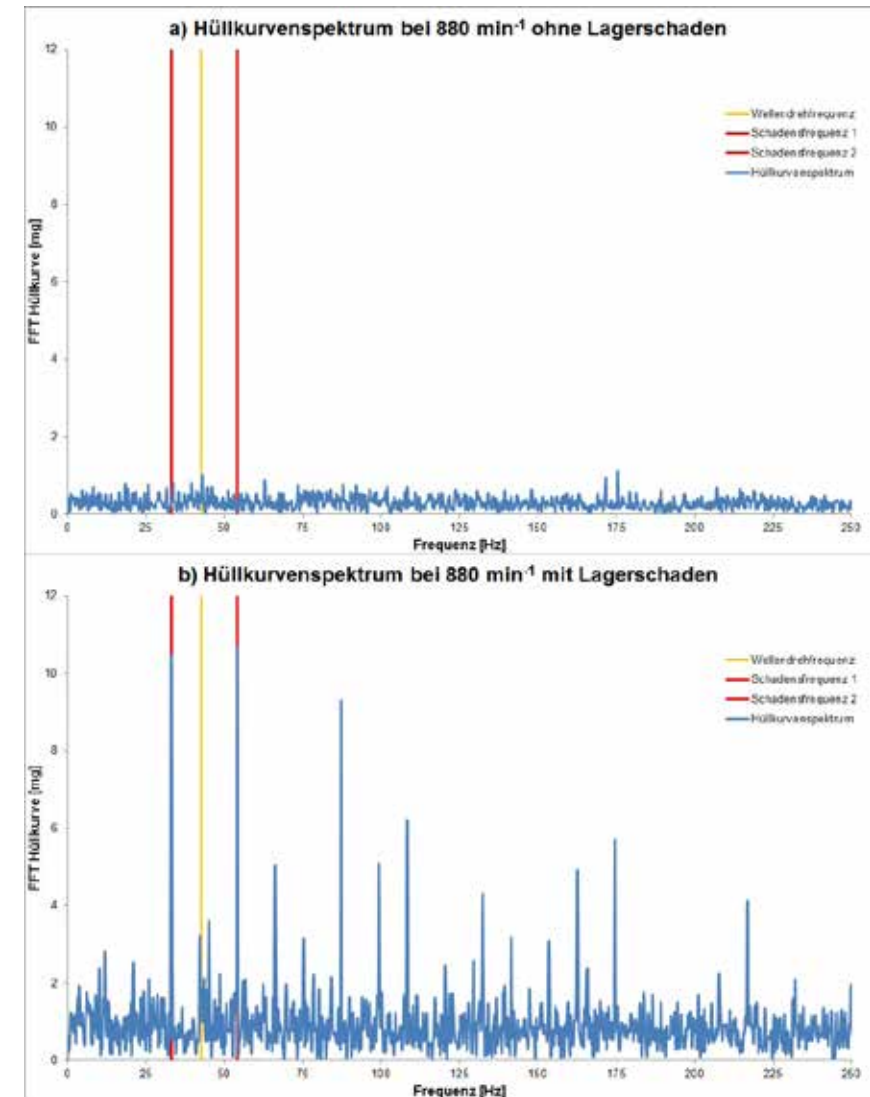


Abbildung 9: Hüllkurvenspektrum a) ohne und b) mit Lagerschaden

### Zusammenfassung/Fazit und Ausblick

Die Integration eines drahtlosen Sensornetzwerks im Schiffsgetriebe bietet die Möglichkeit mit einmaligem Installationsaufwand Sensorknoten zu applizieren, die charakteristische Messdaten aufzeichnen, drahtlos übertragen und sich selbstständig mit Energie aus der Umgebung versorgen. Durch Erzeugung eines künstlichen Lagerschadens konnte aufgezeigt werden, dass sich im Hüllkurvenspektrum dargestellte Schwingungsdaten für die Zustandsdiagnose eines Schiffsgetriebes eignen.

Für eine weitergehende Diagnostik am Schiffsgetriebe ist geplant, die rotierenden Bauteile im Getriebe zu überwachen. Die Projektpartner wollen Drehmomente, Drehzahlen und Temperaturen der An- und Abtriebswellen messen sowie die Kupplung des Getriebes auf Verschleiß prüfen. Besondere Herausforderungen sind dabei wiederum die Energieversorgung und die drahtlose Datenübertragung im Öl umspülten metallischen Getriebe.

## **KONKAV III – Entwicklung von numerischen und experimentellen Methoden zur Vorhersage von kavitationsbedingter Erosion an Schiffsanhängen**

Förderkennzeichen: 03SX347

Prof. Dr.-Ing. Ould el Moctar (UDE - Universität Duisburg-Essen)  
Prof. Dr.-Ing. Andrés Cura Hochbaum (TUB – Techn. Universität Berlin)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Pohl (RUB - Ruhr-Universität Bochum)  
Dr.-Ing. Lars Greitsch (MMG - Mecklenburger Metallguss GmbH)  
Hans-Jürgen Heinke (SVA - Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH)  
Christian Johannsen (HSVA - Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt)

### **Einleitung**

Im technischen Bereich von Schiffsanhängen, insbesondere Propeller und Ruder, ist Kavitation eine unvermeidbare Erscheinung. Die dort herrschenden Strömungszustände können zu lokalen Drücken führen, die unter dem dortigen Dampfdruck des Wassers liegen. Es entsteht dann Kavitation. In Strömungsgebieten wieder steigender lokaler Drücke kann es durch den Zerfall der Kavitation dann allerdings zu erosiven Kavitationserscheinungen kommen. Die hier möglicherweise implodierenden Kavitationsblasen können lokale Drücke auf der Bauteiloberfläche erzeugen, die eine Schädigung des Bauteils zur Folge haben.

Vor dem Hintergrund der Realisierung eines niedrigen Schwingungs- und Geräuschniveaus besteht die Minimierung der Kavitation als wichtiger Entwurfsparameter. Eine Verminderung der Kavitation sowie wechselnde Betriebszustände können aber unter Umständen zu Instabilitäten der Kavitation und damit zu einem höheren Erosionsrisiko führen. Die damit verbundenen Bauteilschädigungen können den wirtschaftlichen Schiffsbetrieb deutlich beeinträchtigen. Die frühzeitige Identifizierung von Kavitations- und Erosionsmechanismen und des möglichen nachfolgenden Schädigungsverlaufes könnte zu einer deutlich verbesserten Einschätzung von Betriebsrisiken führen.

Nachdem sich die beiden vorangegangenen KONKAV Verbundvorhaben mit dem Einfluss von Wasserqualität und Gasgehalt (KONKAV I) sowie dem Einfluss des Nachstroms (KONKAV II) auf die Kavitationseffekte beschäftigt hatten, war das Ziel von KONKAV III die Entwicklung von numerischen und experimentellen Verfahren zur verbesserten Vorhersage kavitationsbedingter Erosion.

## Vorgehensweise

Das Vorhaben gliederte sich in die Entwicklung von numerischen und experimentellen Verfahren, sowie die Erstellung eines Leitfadens zur Anwendung dieser Verfahren. Dabei teilten sich die Antragsteller die Gesamtaufgabe gemäß folgender Schwerpunktsetzung:

1. Entwicklung von numerischen Methoden zur Berechnung von kavitationsbedingter Erosion (UDE)
2. Experimentelle und numerische Kavitationsprognose (TUB)
3. Kavitations-Erosionsuntersuchungen an Propellerwerkstoffen und Werkstoffcharakterisierung (RUB)
4. Numerische Erosionssimulation (MMG)
5. Akustische Direktmessungen für die Erosionsprognose (SVA)
6. Verbesserte Erosionsprognosen aus dem Modellversuch (HSVA)

Im Vorhabensverbund ergaben sich durch die Aufgabenteilung diverse Schnittstellen, insbesondere zwischen den experimentellen Untersuchungen und den Simulationen, die durch definierte Meilensteine abgesichert wurden.

## Methoden zur Berechnung von kavitationsbedingter Erosion

Nach vorhergehender Recherche der verschiedenen Methoden zur Berechnung von Erosion wurde zur Simulation der kavitierenden Strömung ein Euler-Euler-Verfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird innerhalb der Strömung von einer homogenen Mischung ausgegangen, bei der sowohl die flüssige, als auch die dampfförmige Phase als Kontinuum vorliegen. Aufgabe der Kavitationssimulation ist dann die Bestimmung des Volumenanteils der jeweiligen Phase. Das Verfahren basiert auf dem frei verfügbaren CFD Softwarepaket OpenFOAM und ermöglicht die Simulation von Schicht- und Wolkavitation in turbulenten, kavitierenden Strömungen.

Für den erosiven Anteil des Kavitationsfortgangs, also das Auftreten von lokalen Druckamplituden verursacht durch den Kollaps von Kavitationsblasen, wurden verschiedene Ansätze verglichen. Auf Basis der Vorarbeiten wurde schließlich ein Verfahren zur Erosionsvorhersage für 3-dimensionale Strömungen entwickelt und implementiert. Dabei wurde der durch die Charakteristik des Blasenkollapses entstehende, oberflächengerichtete „Microjet“ als Haupt-

mechanismus der Kavitationserosion erachtet. Das Modell berücksichtigt dabei die Präsenz von Kavitationsblasen mit Erosionspotential sowie im Fall des Erfüllens der Kriterien auch die möglicher Intensität der Erosion.

Zur Validierung des Verfahrens ist zunächst auf Testfälle zurückgegriffen worden, für die auch gute experimentelle Daten vorliegen. Ein Literaturbeispiel ist die untersuchte Kavitationserosion in einer achsensymmetrischen Düse (Abbildung 1).

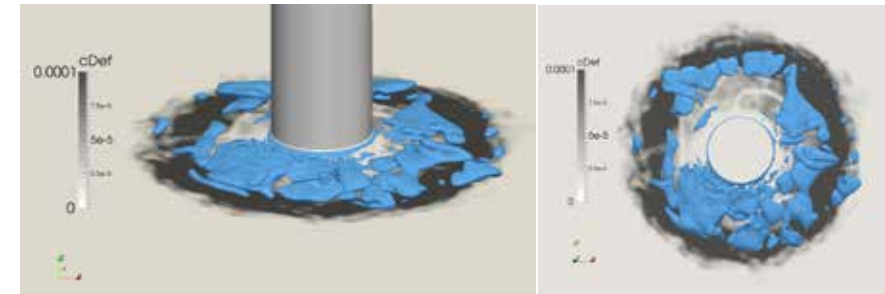


Abbildung 1: Korrelationen zwischen Kavitation und Erosion, perspektivischer Blick (links) und Blick von oben (rechts)

Dabei entsteht im Ausströmgebiet ein Ring instationärer Kavitation, die im weiteren Verlauf in unmittelbarer Nähe des Bodens der Düse wieder zusammenfällt. Die Berechnungen zeigten im Abgleich mit den Experimenten eine sehr gute Übereinstimmung, sowohl der Ausbreitung der Gebiete mit Erosionseinwirkung als auch der Lage der Regionen mit maximaler Erosionsintensität.

## Kavitationsprognose

Um die Kavitationsprognose zu verbessern, wurden systematisch vorhandene Kavitationsmodelle auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Dabei wurden bekannte Testfälle für 2-dimensionale sowie 3-dimensionale Strömungsfälle untersucht und mit Messwerten validiert. Hier standen insbesondere die konkurrierenden Grundansätze der massenkonservativen „Volume of Fluid“-Methode sowie der „Level-Set“-Methode im Mittelpunkt der Untersuchung. Dabei wurde eine Kopplung der beiden Methoden im frei zugänglichen CFD Softwarepaket OpenFOAM implementiert. Ziel der Implementierung war es, auch hier die Massenerhaltung bei gleichzeitiger direkter „scharfer“ Darstellung der Schnittfläche zwischen den beiden Phasen des Mediums einzuhalten. Die Minimierung des Simulationsaufwands war dabei eine parallele Entwicklungsrandbedingung. Neben den in OpenFOAM bereits vorhandenen Modellen wurden so zusätzlich das Zwart-Modell sowie das Brennen-Zwart-Modell implementiert.

Als weiteres Teilthema stand die Messung von wandnahen Drücken einzeln induzierter Kavitationsblasen im Fokus (Abbildung 2). Die Einzelblasen wurden hierbei mit einem geeigneten Lasersystem einschließlich zusätzlicher Optiken zur weiteren Fokussierung des Laserstrahls erzeugt. Eine besondere Herausforderung bestand in der Konstruktion eines geeigneten wandinternen Druckmesssystems, welches möglichst beeinflussungsfreie Messungen erlaubt.

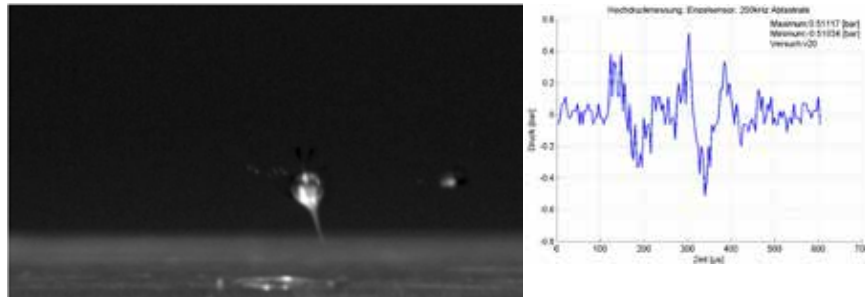


Abbildung 2: Korrelationen zwischen Kavitation und Erosion, perspektivischer Blick (links) und Blick von oben (rechts)

Zur Verbesserung der Aufnahmen der so erzeugten Einzelblasen musste ein geeignetes Beleuchtungssystem entwickelt werden. Eine zufriedenstellende Lösung wurde erzielt, indem LED-Scheinwerfer mit der High-Speed-Kamera synchronisiert wurden.

### Werkstoffuntersuchungen

Für die ausführliche Werkstoffcharakterisierung der Propellerbronze wurde ein real gegossener Propeller zur Probengewinnung zerteilt. Die Probenentnahme fand an drei charakteristischen Stellen (Flügelspitze, Flügelmitte sowie Wurzelbereich) des Propellerflügels statt, um dem Effekt der unterschiedlichen Abkühlungszenarien auf die lokale Gefügeausprägung Rechnung zu tragen. Die Werkstoffuntersuchungen beinhalteten die Aufnahme von mechanischen Kennwerten, Gefügeuntersuchungen sowie die Untersuchung des Korrosionsverhaltens. Durch mikroskopische Aufnahmen aus allen Probeentnahmestellen konnten die unterschiedlichen Gefügeausprägungen visualisiert werden.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen mit der Legierungszusammensetzung des zur Probenentnahme benutzten Propellers wurden Materialuntersuchungen auf Basis einer systematischen Legierungsvariation durchgeführt. Dabei wurden Probenblöcke mit variierendem Mangengehalt sowie Eisen-Nickel-Verhältnis vergossen. Den Blöcken mit einem realistischen Abkühlverhalten wurden entsprechende Probengeometrien entnommen, um vergleichende Werkstoffcharakterisierungen durchzuführen.

Im Verbundvorhaben standen im direkten Zusammenhang zu den Untersuchungen zur Kavitationserosion, die im weiteren Verlauf durchgeführten Kavitationserosionsversuche. Dabei wurde mit Hilfe von hochfrequent angeregten Schwingern an dem im Fluid mitschwingenden Probestück erosive Kavitation erzeugt (Abbildung 3).

Da die Kavitationserscheinung durch diese Versuchsform reproduzierbar ist und über die Zeit konstant einwirkt, eigneten sich die Versuche, um die Materialeigenschaften der Proben unterschiedlicher Entnahmestelle und Legierungsvariation auf Basis gleicher Versuchsbedingungen gegenüberzustellen.

Darüber hinaus erforderten die in der Erosionssimulation zu verwendenden Modelle eine Bestimmung der dynamischen Kennwerte des Materials. Diese wurden mit Hilfe von Dauerfestigkeitsuntersuchungen ermittelt.

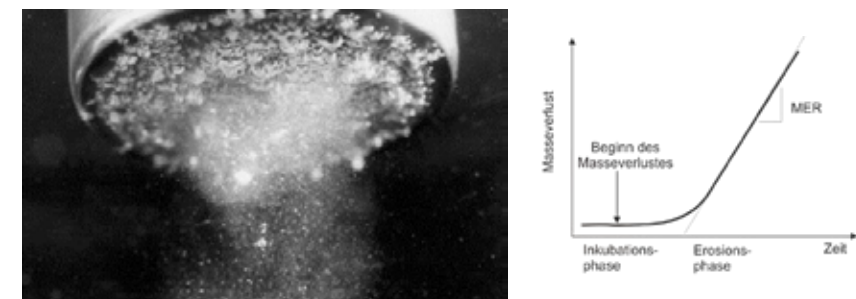


Abbildung 3: Kavitationserosionsversuch sowie Verlauf des Masseverlusts über Versuchszeit

### Numerische Erosionssimulation

Die numerische Simulation des Erosionsverhaltens der Propelleroberfläche ist eng verknüpft mit den parallel durchgeführten Werkstoffuntersuchungen. Um eine realistische Übertragung des realen Werkstoffverhaltens im finiten Elemente Löser zu erzielen, mussten die entsprechenden Übertragungsmodelle in die Simulationssoftware implementiert werden.

Dabei war es notwendig, zum einen das Dauerfestigkeitsverhalten des Propellerwerkstoffs mittels geeigneter numerischer Modelle zu berücksichtigen. Zum anderen wurden auch Porositäten im Simulationsmodell zu erfassen, um im weiteren Simulationsverlauf auch die Ermittlung des Masseverlusts zu ermöglichen.

Den Berechnungen lagen Belastungsspektren zu Grunde, die in Anlehnung an die Messungen an der Einzelblase als auch der akustischen Direktmessungen des Kavitationserosionsversuches synthetisch erstellt wurden.



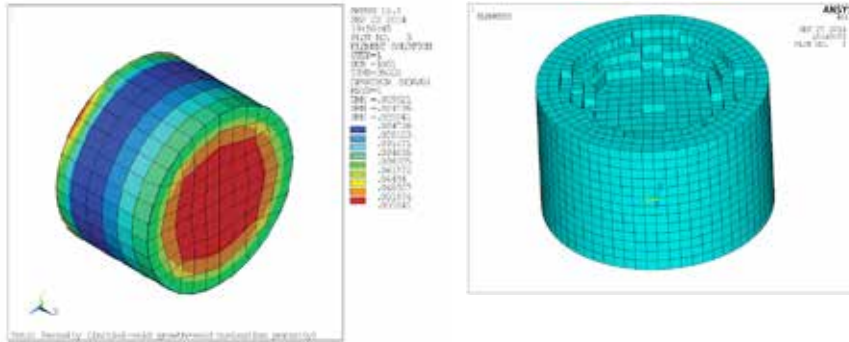


Abbildung 4: FEM-Modell mit simulierter Porosität sowie Ergebnismodell der erodierten Probe

### Akustische Direktmessungen

Mit dem Ziel der Identifikation einzelner Kavitationsarten mit Hilfe von akustischen Direktmessungen wurde nach Analyse der möglichen Kavitationsgeräusche eine entsprechende Messtechnik entwickelt.

Die Messungen unterteilen sich in die Aufnahme der Kavitationsgeräusche der Blasen und Wolkenkavitation an den Versuchseinrichtungen der Ruhruniversität Bochum als Begleitung der Kavitationserosionsversuche und Messungen an Kavitationsgeräuschen an Propellern im Modellversuch und in der Großausführung.

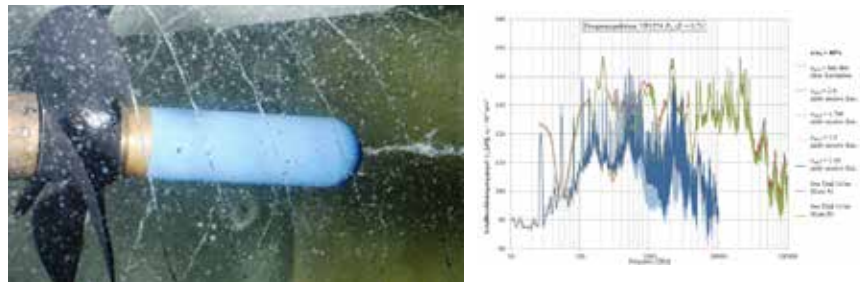


Abbildung 5: Akustische Direktmessung und Frequenzspektrum

Die Modellversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Festpropellern bei je zwei Betriebspunkten unter Variation von Kavitationszahl und Zuströmung und unter Verwendung von erosionsempfindlichen Lackanstrichen ausgeführt. Dadurch konnte die Korrelation zwischen Geräuschspektrum und Lackabtrag hergestellt werden. Bei den Großausführungsuntersuchungen wurden sowohl Körperschallmessungen an der Wellenleitung, als auch Wasserschallmessungen in Entfernung aus dem Beiboot heraus durchgeführt.

### Erosionsprognosen

Zur Verbesserung der Erosionsprognosen wurde eine neue Indikatorbeschichtung auf Basis einer elektrochemischen Abscheidung von Polypyrrol entwickelt (Soft-Ink-Methode). Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den heute üblichen Farbschichtungen ist die gleichmäßig dünne, selbstjustierende und reproduzierbare Schichtstärke. Nach anfänglichen systematischen und zeitabhängigen Testreihen an einfachen Messingproben wurden entsprechend der Zielsetzung Flügelprofile und Modellpropeller mit dem neuen Verfahren beschichtet.

Mit anschließenden Kavitationsversuchen unter Variation von Beschichtungen und Beschichtungsmuster, konnte die Wirksamkeit der neuen Beschichtung als Prognoseverfahren bestätigt werden. Es konnte hierbei eine gute Korrelation zwischen visuell erkennbarer Kavitation und späterem Farbabtrag identifiziert werden. Auch zeigte sich Farbabtrag an einem Schnellboot-Propellermodell genau dort, wo am echten Schiff Erosionsschäden festgestellt worden waren (Abb. 6, links). Schließlich führten auch visuell bei Versuchen im HYKAT als erosiv eingestufte Kavitationserscheinungen an einem Zweischauber-Propeller zu einem Abtrag der neu entwickelten Beschichtung.

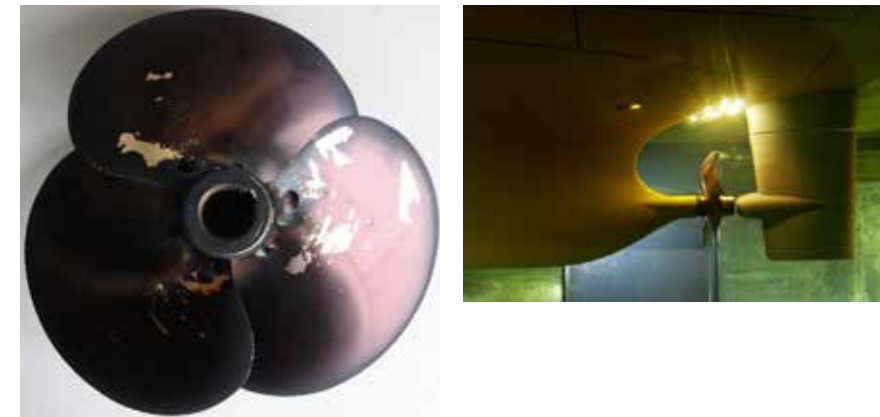


Abbildung 6: Lackabtrag nach Erosionsversuch und Hochgeschwindigkeits-Videotechnik mit LED-Beleuchtung

Zur Verbesserung der den Kavitationsversuch begleitenden Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen, wurde neben der Neuentwicklung des Kamera-Sichtfensters insbesondere eine neue Beleuchtungstechnik durch lichtstarke Hochleistungs-LEDs eingeführt.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen im Verbundvorhaben KONKAV III reichten von der Erzeugung und Vermessung der implodierenden Einzelblase über die Simulation von instationärer Kavitation mit Berücksichtigung von Belastungsspektren auf der Bauteiloberfläche bis hin zur durch Materialcharakterisierung unterstützen Festkörpersimulation des bauteilschädigenden Erosionsvorgangs.

Begleitet wurden diese Arbeiten durch experimentelle Untersuchungen zur Validierung der Strömungssimulation und zur Entwicklung von neuen Nachweis- und Prognoseverfahren.

Im Verbundvorhaben KONKAV III konnten durch die gezielte Aufgabenteilung in Summe grundlegende neue Kenntnisse über die Simulation und Testung von Kavitation und Kavitationserosion in schiffbaulichen Problemfeldern erzielt werden.

## ERA NET MARTEC – OSC – Entwicklung einer Geräteplattform für Segelschiffe im OceanoScientific® Programm

Förderkennzeichen: 03SX371A

Stefan Marx, Saskia Heckmann, Sabine Heuck (SubCtech GmbH)  
Yvan Griboval, Cécile d'Estais (SailingOne AS)  
Fabienne Gaillard, Thierry Reynaud (Ifremer)  
Pierre Blouch (Meteo-France)

### Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Ziel des nationalen Antrages in dem MARTEC–II Vorhaben ist die Realisierung einer neuartigen Messplattform zur Erfassung, Verifizierung und Verteilung von Klima- und Meeresdaten unter Extrembedingungen auf kleinen Schiffen, insbesondere Segelschiffen. Messungen sollen weltweit dort erfolgen, wo bisher wegen fehlender Daten wissenschaftliche Modelle wie z.B. für die Klimaentwicklung oder den Wärmetransport extrapoliert werden müssen, z.B. in antarktischen Gewässern.

In dem Französisch-Deutschen Projektansatz OceanoScientific® werden Sport, Wissenschaft und Industrie verknüpft, um sowohl eine breite Akzeptanz als auch ausreichende Verwertungsmöglichkeiten zu schaffen. Als Besonderheit sollen Daten auf Segelschiffen, insbesondere Rennyachten, erfasst, gespeichert und an eine Zentrale übertragen werden. Die Daten werden von beteiligten Instituten verifiziert und Anwendern unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Das OceanoScientific® Konzept und Netzwerk kann unter [www.oceanoscientific.org](http://www.oceanoscientific.org) verfolgt werden.

Vorzugsweise sollen „Round-the-world“ Segelrennen, die notwendigerweise in der südlichen Hemisphäre im Bereich der Antarktis stattfinden, ausgerüstet werden. Durch die örtlich- und zeitlich versetzten, aber regelmäßig wiederkehrenden Routen mit der Dauer von 30-100 Tagen können regelmäßige Datenserien in der Südhalbkugel mit für die Verhältnisse guter Flächenabdeckung erzeugt werden. Insbesondere für den Klimawandel werden nicht nur traditionelle Parameter wie Salzgehalt und Temperatur benötigt, sondern auch z.B. CO<sub>2</sub>, pH oder Algen Fluoreszenz.

Eigenfinanzierte Vorversuche in Frankreich mit dem Partner SailingOne und Deutschland mit Geräten der Serie OceanPack™ zeigten, dass Segelschiffe als Geräteträger genutzt werden können. Es zeigte sich in ersten Tests ab

2009, dass die Anforderungen an die Technik und Verfahren hoch und derzeit nicht marktfähig verfügbar bzw. einzusetzen sind. Insbesondere für Rennsegelyachten haben minimierter Energiebedarf, optimiertes Gewicht, extreme Robustheit und Wartungsarmut höchste Priorität.

Insbesondere wurde an Verfahren gearbeitet, die die Messung spezieller Parameter wie CO<sub>2</sub> ermöglichen. Die Erfassung von CO<sub>2</sub> unter extremen Bedingungen wird von der Wissenschaft als Datenkunde gefordert. Weitere industrielle Anwendungen wie Fischfarming Monitoring lassen sich direkt aus der zu entwickelnden Technologie ableiten, die für hohe Auflösung, Langzeitstabilität, extreme Robustheit, minierten Wartungsaufwand und Modularität steht.

Aus diesem Grund haben sich in der Vorbereitung mehrere Institute bereit erklärt das Projekt aktiv zu unterstützen: IFREMER, CNRS, Meteo-France (alle Frankreich), GEOMAR, University of Maine (USA). Die an Bord gesammelten Daten werden dabei jeweils einem Institut bzw. Wissenschaftler verantwortlich übergeben. Damit ist die kooperative Einbindung zahlreicher Institute und die wissenschaftliche Bewertung der Daten sichergestellt. Für die Unterstützung zur wissenschaftlichen Koordinierung konnte JCOMMops der UNESCO gewonnen werden.

Die spätere Entwicklung der eigentlichen Produkte wie der Messplattform mit Einbindung der Messgeräte, die Wartung und Weiterentwicklung dieser Technologie sowie der Einsatz in weiteren Märkten führt SubCtech in Kiel durch. Durch die Forschung an Verfahren und Materialien schafft sich SubCtech einen wichtigen Vorsprung im internationalen Markt. SubCtech als Hersteller von ozeanografischen und Offshore Systemen ist auf starke innovative Lösungen angewiesen. Mobile energieminierte Systeme können auch neue globale Anforderungen z.B. in der Wasserqualitätsüberwachung in Asien als „Cross-Innovation“ erfüllen. Mit dem Technologie Know-how in Deutschland sind Wachstum des Unternehmens und Sicherung der Arbeitsplätze gewährleistet.

Weiterführende Gespräche konnten bereits mit Kunden geführt werden, die eine solche Technologie einsetzen würden. Der Zielmarkt Rennregatten „Round-the-world“ entwickelt sich dahin, dass Messsysteme verbindlich mitgeführt werden sollen. Gespräche laufen z.Zt. zwischen den Betreibern bzw. Veranstaltern und JCOMMops. Auch klassische Kreuzfahrer Reedereien zeigen Interesse. Eine Reederei aus Frankreich unterzeichnete einen LOI um ihre Schiffe für die Antarktis auszurüsten. Hier werden bereits Wetterdaten gesammelt, so dass Daten über die Wasserqualität sinnvoll ergänzt werden können und für umweltbewusste Passagiere ein weiterer Anreiz geschaffen wird. Genau diese Win-Win Situation und Verknüpfung von Interessengrup-

pen und Märkten ist Ziel von OceanoScientific®, für das die hier zu entwickelnde Technologie eingesetzt werden soll.

### Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Der nationale Projektantrag ist der Deutsche Teil des MARTECT-II Vorhabens OceanoScientific®. Es leistet somit einen erheblichen Beitrag zu den Deutsch-Französischen Kooperationen, was sich auch durch die Beteiligung von SubCtech an dem Franz. Exzellenzcluster „Pôle Mer Bretagne“ ablesen lässt<sup>1)</sup>.

Die seinerzeit Französische Ministerin für Ökologie, nachhaltige Entwicklung und Transport - Nathalie Kosciusko-Morizet – hat OceanoScientific® mit der Aufnahme in den „Le Club des Explorateurs du Grenelle de la Mer“ gewürdigt<sup>2)</sup>.

Das Vorhaben OceanoScientific® gliedert sich hervorragend in den Nationalen Masterplan für Maritime Technologien (NMMT)<sup>3)</sup> ein und besetzt gleich mehrere strategische Handlungsfelder wie:

- Stärkung von Forschung und Entwicklung;
- Exportförderung und Erschließung von Märkten;
- Systemintegration/strategische Partnerschaften/Netzwerkbildung;
- Rahmenbedingungen gestalten;
- Branchenbild und öffentliche Wahrnehmung verbessern;
- Akteure des Masterplans und Umsetzung

„Dass wir diesen Preis gewonnen haben, erfüllt uns mit Stolz. Es war eine wahre interkulturelle Herausforderung ! Die Kategorie „Umwelt“ ist für uns besonders wichtig, denn die Folgen des Klimawandels sind eine Problematik von großer Bedeutung für zukünftige Generationen.“

« L'obtention aujourd'hui de ce Prix nous prouve que ce challenge multi-culturel a été relevé avec succès, c'est une grande fierté. La catégorie "Environnement" nous tenait particulièrement à cœur, les causes et conséquences du changement climatique étant une problématique majeure pour les générations futures.

Cécile d'Estais, Directrice Administrative et Financière, SailingOne

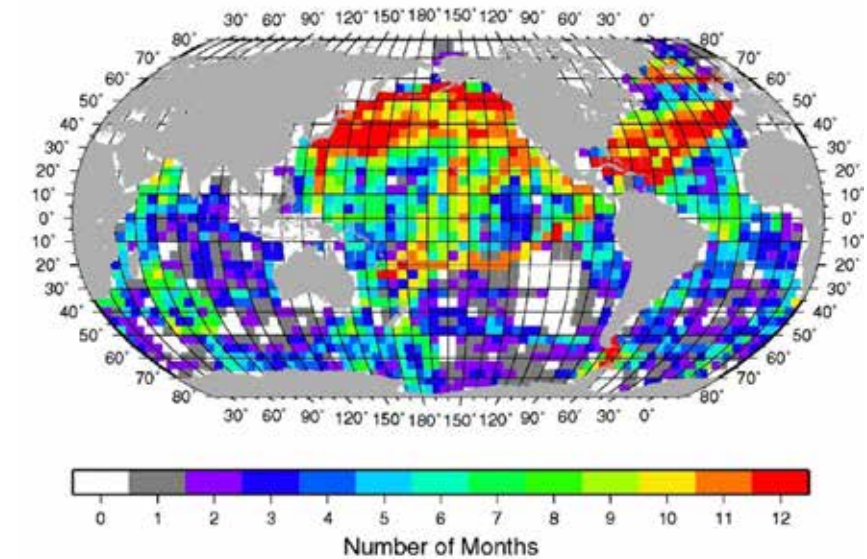




Am 9. Dezembers 2013 wurden in Anwesenheit der Ministerin Fleur Pellerin und Dr. Philipp Rösler, dem damaligen deutschen Bundesminister für Wirtschaft und Technologie und Vizekanzler, sowie von mehr als 400 Gästen die Unternehmen Atos und Siemens, Renault SAS und Daimler, SailingOne und SubCtech, Novaléd und Astron Fiamm Safety, Michelin Reifenwerke und Collège Charles de Gaulle sowie EPEX SPOT mit dem Deutsch-Französischen Wirtschaftspreis 2013 geehrt. Unter der Schirmherrschaft der Wirtschaftsministerien beider Länder wird der Deutsch-Französische Wirtschaftspreis alle zwei Jahre verliehen. Die Deutsch-Französische Industrie- und Handelskammer würdigt damit Unternehmen aus Deutschland und Frankreich, die sich durch beispielhafte Kooperationsprojekte hervorgetan haben.

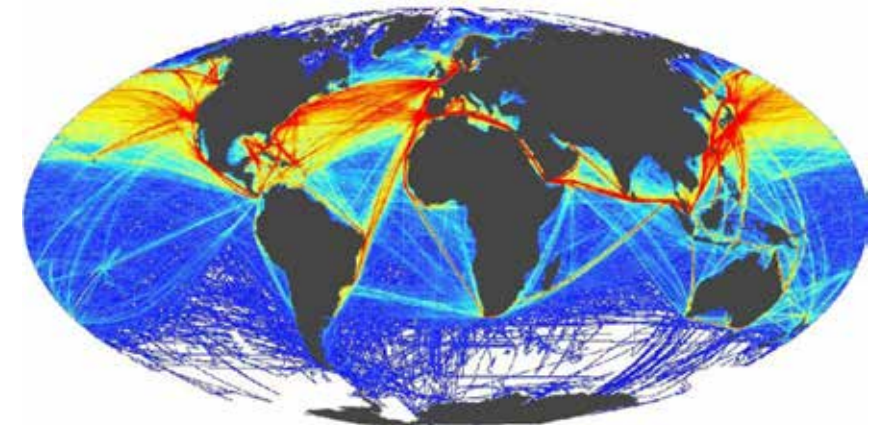
### Interesse der Wissenschaft

Für die südliche Erdhalbkugel, insbesondere im Bereich der sensiblen Antarktis, stehen keine oder nur wenige klimarelevante Daten zur Verfügung. Bei einer Untersuchung aller Datenreihen aller Parameter aller Zeiten wurde festgestellt, dass große Teile der südlichen Hemisphäre noch nie erfasst worden sind. Gerade diese Daten sind aber notwendig um globale Klimaprozesse zu verstehen, Wärmetransporte in den Meeren verstehen zu können mit direkten Auswirkungen auf unser Leben oder die Ausbeutung der Antarktis bewerten zu können. Nicht zuletzt haben Schiffsbetreiber Interesse, um Routen in diesen kritischen Regionen mit nicht vollständiger Eis- und Wetterprognose selber bewerten zu können.



Daten für CO<sub>2</sub> aller bekannten Messungen weltweit. In der südlichen Hemisphäre fehlen großflächig Daten. Quelle: Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 56, Issues 8–10, April 2009, Pages 554–577 (Takaschi et. al.)

Siehe Webseite „Deutsch-Franz. Wirtschaftspreis: <http://www.francoallemand.com/deutsch-franzoesischer-wirtschaftspreis-2013/>. Die Wahl findet am 9. Dez. 2013 in Paris statt.



Alle Messungen aller Parameter zu allen Zeiten: große Bereiche der Ozeane – und somit der Erde - werden nicht abgedeckt. Quelle: Dr Boris Kelly-Gerrey; NOC, EuroGOOS FerryBox Meeting, Goteborg 16-17 March 2010

1) Siehe dazu die Webseite Pôle Mer Bretagne: <http://www.polemer-bretagne.com/osc-system-les-grands-navires-collecteront-les-parametres-ocean-atmosphere.php>

2) Siehe die Webseite dazu (der direkte Link ist nicht mehr verfügbar): <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-documentation,29894.html>

3) Der NMMT: <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=431034.html>

Es gibt daher ein großes Interesse an Daten aus der südlichen Hemisphäre, für die es aber keine Messplattform gibt. Linienschiffe oder Forschungsschiffe fahren immer nur sehr eingeschränkte Seewege, sofern sie mit Messtechnik überhaupt ausgestattet sind oder werden können.

Segelyachten, die regelmäßig um die Welt fahren, müssen (noch) zwangsläufig die südlichen Hemisphäre passieren und bleiben dabei zur Streckenoptimierung nahe der Eisgrenzen – also nahe der Antarktis. Durch den zeitlichen und räumlichen Versatz der Fahrten erfolgt ein „Screening“ der südlichen Hemisphäre.



Segelrennen „Round-the-world“ führen zwangsläufig durch die Gebiete mit geringer Datenlage in der Antarktis. Ausgerüstet mit Messsystemen können sie als „Ships of Opportunity“ kostengünstig den Datenbestand erheblich verbessern. Quelle: SailingOne.

### Technische Ziele

Zur Realisierung von regelmäßigen Messungen auf vorzugsweisen Rennsegelschiffen werden sehr kleine, gewichts- und energieoptimierte Messsysteme benötigt. Es ist offensichtlich, dass eine solche Technologie von aufwendigen und prestigeträchtigen Rennen nur Akzeptanz findet, wenn die Messsysteme im Betrieb nicht auffallen, d.h. die Eigenschaften der Schiffe nicht negativ beeinflusst und weitestgehend keine Wartung benötigt wird.

Forderungen an solche Messsysteme sind:

- Minimale Bauform, da es praktisch kein Platzangebot gibt

- Minimales Gewicht, um die Eigenschaften des Schiffes im Rennen nicht zu verändern
- Minimale Energieaufnahme, da gerade auf Segelschiffen nur kleine Batterien und wenig Lademöglichkeiten zur Verfügung stehen
- Wartungsfreiheit, da die Crew i.d.R. nur wenig Zeit für Service während der Fahrt hat und Fahrten oft 3 Monate dauern

Daraus abgeleitet sind gefordert:

- Beständigkeit gegen Korrosion
- Keinen Einfluss durch Sedimente bis hin zu Partikeln
- Minimierung des Einflusses durch Luftblasen, die praktisch alle Messparameter verfälschen würden
- Stabilität gegen Wellenschlag und Vibrationen aus allen Richtungen
- Stabilität gegen Spannungsausfälle und Spannungsspitzen eines schlecht stabilisierten Stromnetzes

Automatische Messsysteme für Schiffe mit einer Selbstreinigung und Auto-Kalibrierung werden nach Stand der Technik als sog. „FerryBoxen“, oder speziell zur Erfassung von CO<sub>2</sub> als „Underway System“ eingesetzt. Sie benötigen relativ viel Platz und Energie, die auf Segelyachten nicht zur Verfügung stehen. Messsysteme mit kleinen Abmessungen verfügen über keine Möglichkeit, einen Langzeitbetrieb zu ermöglichen, da sowohl automatische Reinigung und Kalibrierung fehlen, als auch die weiteren o.g. Forderungen nicht in der notwendigen Gesamtheit erfüllbar sind.

Aus wissenschaftlicher Sicht müssen Messsysteme gerade in abgelegenen Gebieten besonders präzise und langzeitstabil arbeiten, da eine Vergleichsmessung oder Interkalibrierung nicht möglich ist. Außer den Forderungen an den Sensor muss das Messsystem, also die technische Plattform, einen sowohl störungsfreien als auch unbeeinflussten Messbetrieb ermöglichen.

Nun verursachen gerade Segelschiffe extreme Störungen wie

- Lufteintrag (Blasen und Gischt) durch Wellen
- Vibrationen und Schläge mit teilweise erheblicher Intensität

- Spannungsstöße, verursacht durch kleine Batterien bei hohen und unregelmäßigen Belastungen, z.B. durch hydraulische Ruderanlagen und zeitweise laufende Generatoren



Rennsegelyacht, ausgerüstet für „Round-the-world“ Rennen mit nur einem Segler an Bord („One-Design“) – Dauer 2 x 3 Monate. Diese See- bzw. Rennbedingungen sind typisch und machen Messungen praktisch unmöglich. Bild SailingOne®, 52“ Yacht BOOGALOO vor Brest bei Windstärke 8, Geschwindigkeit 25-27kn. Quelle : SailingOne

Für arktische Regionen sind weitere Eigenschaften gefordert:

- Beständigkeit gegen extreme Temperaturen bis  $-40^{\circ}\text{C}$  im Außenbereich
- Tiefe Wassertemperaturen bis ca.  $-2^{\circ}\text{C}$
- Eisbildung und Eisschlag im Wasser, u.a. am Wassereinlass
- Eis im Außenbereich an meteorologischen Instrumenten und z.B. dem Lufteinlass zur Messung von Luft- $\text{CO}_2$  (wenn vorhanden)

- Versprödung der Materialien mit Bruchgefahr, betrifft auch Kabel
- Weiter reduzierte Energieaufnahme bei geringerer Batteriekapazität

Die Summe dieser Forderungen lässt sich bisher nicht für kommerziell verfügbare Geräte und Systeme umsetzen, sondern nur für spezielle Anfertigungen und große Anlagen. Genau diese Lücke schließt die in diesem Vorhaben entwickelte Technologie, um eine breite Kommerzialisierung zu ermöglichen.

### Eigene Vorarbeiten

Zwischen 2009 und 2013 haben SubCtech und SailingOne (Frankreich) Vorversuche durchgeführt, um existierende Geräte und Technologien im Einsatz auf Segelschiffen zu testen. Dabei wurden kommerziell verfügbare Geräte (u.a. Produkte der SubCtech Marke „OceanPack™“) installiert, um deren Eignung zu testen und Erfahrungen zu sammeln. Trotz vieler Erfolge und internationaler Anerkennung zeigte sich, dass die vorhandene Technologie nicht allen Anforderungen entsprechen konnte.



Expeditionssegler LA LOUISE in der Arktis mit Testgeräten an Bord. Die Idylle täuscht, in den meisten Fällen herrschen raue Wetterbedingungen vor. Bild SailingOne®, La Louise vor Grönland Frühjahr 2012.

Der Expeditionssegler LA LOUISE (Frankreich) sammelte in der Arktis, die Bark EUROPE (Niederlande) in der Antarktis mit Testgeräten an Bord Daten. Die Verfügbarkeit qualitätsbereinigter Daten (durchgeführt vom GEOMAR) lag zwischen 50% und 80%. Trotzdem gaben die eigenfinanzierten Vorversuche Mut und zeigten eine grundsätzliche Machbarkeit, die GEOMAR abschließend bewertete: „...so dass die autonomen Messungen auf diesen Segelschiffen allgemein als recht robust einzustufen sind.“)

In den Vorversuchen zeigte sich, dass es grundsätzlich möglich ist, Segelyachten als „Ship of Opportunity“ einzusetzen. Die geeignete Systemplattform als Technologie für Sensoren musste aber entwickelt werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Bei der Datenaufnahme und unter Berücksichtigung des Aufwandes ist es grundsätzlich sinnvoll, nicht nur klassische Parameter wie Salzgehalt und Temperatur zu messen, sondern insbesondere CO<sub>2</sub> und als weitere Parameter pH, Trübung und Algen-Fluoreszenz. Mit diesem Satz von Parametern lässt sich der Wissenshorizont bereits erheblich erweitern, mit der Entwicklung einer geeigneten Messplattform lassen sich dann auch weitere wichtige Parameter wie Partikel („Plastik im Meer“) und Nährstoffe erfassen oder Wasserprobenehmer betreiben.

### Technische Umsetzung

Zunächst wurde eine Testplattform für Laboruntersuchungen modular aufgebaut und untersucht.

- Dabei wurde auch ein neuartiger „Foam“ eingesetzt, der u.a. in Formel-1 Rennwagen verwendet wird. Für die Seeerprobung musste Gewicht und Größe reduziert werden. Dazu wurde ein verbessertes Testsystem entwickelt und aufgebaut. Dazu wurden neue Materialien (POM, Aluminium, Titan) eingesetzt.
- Mit Ziel eine generische Plattform zu entwickeln, wurde Wasseransaugung, Messkammer, Wasseraustritt und Kombinationen aus Pumpen und Ventilen untersucht. Als erstes Ergebnis hat sich ein Doppelpum-

5) B.Sc. Thesis „Auswertung und Validierung eines vorhandenen Datensatzes mit pCO<sub>2</sub>-Partialdruckmessungen“, Wilhelm Stoller (Prof. Körtzinger, Dr. Bange, Dr. Fiedler).

6) We cannot manage what we do not measure: the scientific need for voluntary ocean and climate observations. Albert Fischer, Acting Director, GOOS Project Office, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, WOC “Smart ocean / Smart Industries” workshop, Paris, 12 December 2011

pensystem bewährt, das Wasser auch unter ungünstigen Bedingungen ansaugen kann (z.B. Ansaugstelle im Schiff wird durch Wellen unter-spült) und gleichzeitig dauerlaufgeeignet ist. Während die ansaugende Pumpe i.A. nicht dauerlaufgeeignet oder wartungsfrei ist, übernimmt den normalen Betrieb eine dauerlaufgeeignete Kreiselpumpe, die aber weder Wasser selbst ansaugen könnte und bei größeren Luftblasen nicht mehr fördert. Die Materialien wurden derart modifiziert, dass alle Komponenten salzwasserbeständig sind.

- Für eine optimierte Wasserführung bei Rennsegelyachten wurde eine zweiteilige Wasserzufuhr entwickelt und getestet. Dabei wird immer die Wasseröffnung geöffnet, die sich gerade im Wasser befindet, die zweite wird geschlossen. Damit konnte die Wasserzufuhr speziell für Rennsegler deutlich verbessert werden. Da sich die Lage von Rennseglern „round the world“ nicht häufig ändert, ist eine Umschaltung im Betrieb nur selten notwendig und es entstehen praktisch keine Datenlücken.
- Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wurden Schutzmechanismen entwickelt, erprobt und eingesetzt. Zum Einen wird das Wassersystem gegen Extremeinwirkungen geschützt wie plötzliche Druckstöße oder Druckabfall. Diese können durch Wellenschlag, defekte externe Wasserpumpen oder -ventile oder Fehlbedienung an Schiffssystemen auftreten. Zum Anderen werden auch Druckstöße z.B. in den CO<sub>2</sub>-Analyzern durch spezielle Überdruckventile gesichert, die eine sehr geringe Gas-Leckrate aufweisen.
- Für die Testplattform wurde eine neuartige Messkammer entwickelt und getestet, die den Einsatz fast aller gängigen Sensoren gestattet. Gleichzeitig ist die Messkammer einfach zu reinigen und gasneutral, d.h. eine Gasanalyse wird nicht verfälscht. Es konnte gezeigt werden, dass kostengünstigere Sensoren mit einer entsprechenden Autokalibrierung eingesetzt werden können. Servicefreundlichkeit und Zuverlässigkeit wurden weiter entwickelt. U.a. ist mit einer neuen Schnellhalterung für Sensoren ein schneller und vereinfachter Wechsel möglich.
- Für die Datenerfassung wurde eine Messtechnik entwickelt, die wesentlich stromsparender und robuster ist, als bisher üblicherweise

7) Die notwendigen Parameter wurden in verschiedenen Treffen der involvierten Wissenschaftler und Workshops festgelegt. Für OceanoScientific® haben IFREMER, GEO-MAR, Meteo-France und die University of Maine eine Auswahl getroffen. Der Wunsch nach weiteren Parametern wie Nährstoffen oder Detektion von Plastik im Meer wird diskutiert, aber als ein zweiter wichtiger Schritt angesehen. Dokumentation dazu in den Meeting Reports.



verfügbar. Damit ist der Betrieb gerade auf Segelyachten möglich, die nur über eine eingeschränkte Energieversorgung über Batterien verfügen. Gleichzeitig werden nur vereinfachte Werte an einen Bildschirm im Cockpit übertragen, der eine schnelle Diagnose ohne Störung des eigentlichen Rennbetriebes ermöglicht.

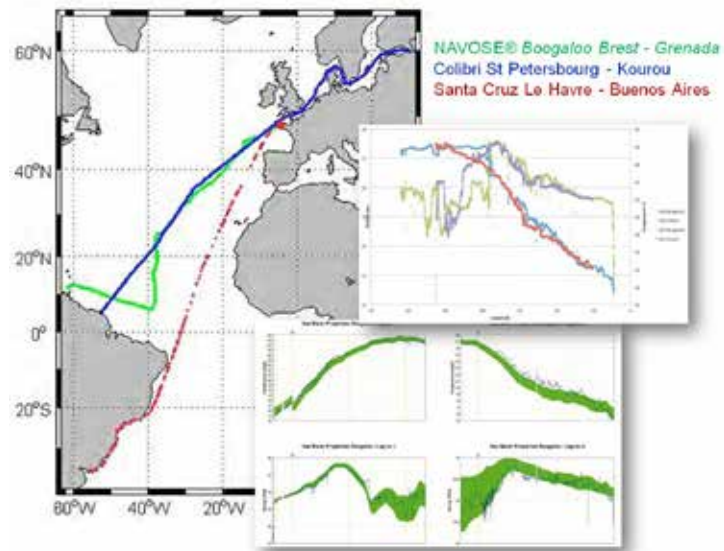
- Gegen Spannungsspitzen wurde eine Mini-USV (Unterbrechungsfreie Stromversorgung) implementiert, die auch eine kurzzeitige Spannungsversorgung bei Schwankungen oder Ausfall sicherstellt. Diese bereits zuvor im Haus entwickelte Schaltung wurde überarbeitet und der Ausfall als Fehlermode in die Steuerung mit aufgenommen, um weitere Schäden zu verhindern und die Daten mit einem Qualitätsflag zu speichern.
- Für die Autokalibrierung wurde ein automatisches Verfahren entwickelt. Je nach Verfügbarkeit von Kalibrierpunkten kann diese Option auch abgestellt werden. Dieses Verfahren ist zunächst generisch und gestattet die Anwendung einer automatischen zeitgesteuerten Kalibrierung für beliebige Sensoren.
- Für CO<sub>2</sub> Analysatoren wurde eine Adaption entwickelt, um eine Kalibrierung mit Referenzgasen auch an Bord durchzuführen. Damit lässt sich die Stabilität auch von günstigeren Sensoren steigern, so dass eine Akzeptanz seitens der Anwender gegeben ist. Dazu wurde vom NIOZ Niederlande wissenschaftliche Unterstützung und Expertise eingeholt.
- Das Prozessieren der Daten wird in den DataLogger eingepflegt, so dass sowohl Rohwerte als auch errechnete Werte gespeichert werden können. Das bisher nur testweise umgesetzte Processing wird planmäßig weiter entwickelt.



*Testplattform zur Seerprobung: 1 – Ansteuerung Seeventile; 2 - Wasser-ein- und Auslässe; 3- Doppelpumpensystem; 4- Debubler mit zusätzlichen Sensoren wie Algenfluoreszenz und Salzgehalt; 5 – Telemetrierechner und Stromversorgung mit USV; 6 – Datenmonitor und Steuerrechner; 7 – Automatische Kalibrierung des pCO<sub>2</sub> Analyzers; 8 – Membrankopf des pCO<sub>2</sub> Analyzers) Quelle: SubCtech*

### **Erprobung**

Die erste Testplattform wurde auf der Französischen Rennsegelyacht BOOGALOO in den unterschiedlichsten Ausführungen in unserem Wasserlabor unter verschiedenen Bedingungen getestet. Wichtigstes Ergebnis ist die zuverlässige Funktion des Wassersystems und des Betriebs unter hohen Rollwinkeln von bis zu +/- 30°. Die Messkammer liefert unter allen Bedingungen zuverlässig Wasser zu den Sensoren.



*Erster Test: Nordatlantik Expedition 2014. Zu bestimmten Koordinaten wurden Vergleiche mit anderen Schiffen durchgeführt, bzw. es wurden typische regionale Vergleichsdaten herangezogen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung von Interkalibrierpunkten und Trends. Quelle: LPO Ifremer*

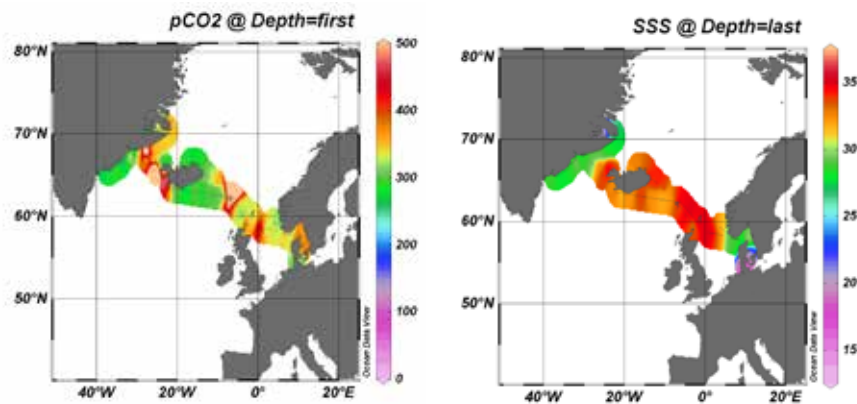
Mit einem zweiten Testaufbau mit zusätzlicher automatischer Reinigung wurde eine erste Seeerprobung auf der DAGMAR AAEN während der Expedition PITTARAK) durchgeführt. Die Arved Fuchs Expedition hat dabei das Boot als Experimentierplattform zur Verfügung gestellt. Bei der Testfahrt nach Grönland und zurück konnten Daten erfolgreich gesammelt werden. Es muss bemerkt werden, dass aufgrund der Schwere des Seegangs das Schiff vor Grönland beschädigt wurde und eine Werft anlaufen musste. Der SubCtech Messaufbau wurde nicht beschädigt und konnte weiterhin betrieben werden. Die Testfahrt auf der DAGMAR AAEN wurde gemeinsam mit den Betreibern und Schiffsführern ausgewertet; die Daten zur Auswertung an Wissenschaftler der Uni Hamburg, GEOMAR Kiel und Uni Flensburg verteilt und gemeinsam bewertet. Die ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend und dokumentieren die sehr hohe Verfügbarkeit.



*Das neue Messsystem mit automatischer Reinigung nach der dreimonatigen Erprobung an Bord der Arved Fuchs Expedition DAGMAR AAEN.*

8) <http://www.arved-fuchs.de/expeditionen/pittarak>





*pCO<sub>2</sub> und Salzgehaltsdaten während der dreimonatigen Erprobung an Bord der Arved Fuchs Expedition DAGMAR AAEN. Die Auswertung erfolgte in Kooperation der Universitäten Flensburg und Hamburg sowie GEOMAR.*

Im Rahmen von Gesprächen zur COP21 in Paris wurden wiss. Institute in Nizza, Villfranche-sur-Mer und Monaco einbezogen. Abschließend konnte eine wiss. Testfahrt „Tour de France“ zur Erprobung und Funktionsnachweis durchgeführt werden. die Ergebnisse wurden u.a. von JOMMops honoriert und können damit als Basis für eine kommende Vermarktung genutzt werden. Inzwischen wurde der Rennsegelyacht BOOGALOO unseres Partners SailingOne das begehrte UNESCO Logo verliehen.



*Ausrüstung der BOOGALOO in Port-La-Forêt, Frankreich, mit dem letzten Stand der OceanoScientific® Technologie. Als technischer Partner leistet der erfolgreiche und erfahrene Rennsegelbetrieb Mer Agitée des Segel-Champions Michel Desjoyeaux hervorragende Dienste. Im Bild PhD Dimitri Voisin, der Chef-Entwickler bei Mer Agitée und Stefan Marx, CEO SubCtech.*

*Auf der „Tour de France pour le climate“ wurden seit dem 2. April 2015 während 2000 Seemeilen zahlreiche Veranstaltungen durchgeführt. Windstärke 9 führte zu der stärksten Belastungsprobe für Mensch und Maschine, die anstandslos überstanden wurden. Prinz Albert II würdigte das Unterfangen beim Start in Monaco und zuletzt auf dem World Ocean Day der UNESCO in Paris am 8. Juni 2015. Quelle: SailingOne*

Die Messplattform wurde zuletzt Mitte Juli 2015 erweitert, überarbeitet und soll anschließend im Nordatlantik erneut eingesetzt werden. Diese Fahrten und Erprobungen werden auch nach Projektende OSC fortgeführt, um eine stetige Weiterentwicklung und Adaption an künftige Anforderungen zu gewährleisten.

Die Datenauswertung bzw. Bewertung wurde regelmäßig durch die Projektpartner IFREMER und Meteo-France durchgeführt. Die Koordinierung hat der gemeinsame Projektleiter SainlingOne übernommen. Weitere Abstim-

9) <http://www.tourdefrancepourleclimat.com/le-tour/>

mungsgespräche fanden während der Projekttreffen statt, an denen auch die UNESCO über JCOMMops beteiligt war.

Die Entwicklungsschritte und Prototypenfertigungen wurden im Rahmen unserer ISO-9001:2008 Qualitätsmanagementsystems ausgeführt. Es steht somit nach Ende des Vorhabens eine ausreichende Dokumentation und ein kompetentes Team für die Kommerzialisierung zur Verfügung.

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Mit der hier zu entwickelnden Technologie ist es möglich, Segelschiffe unter Extrembedingungen mit Messsystemen in einer Organisationsstruktur wie OceanoScientific® zu betreiben. Mit der Wartungsfreiheit und als kompakte und modulare Messsysteme ist der Einsatz aber nicht auf Rennsegelyachten beschränkt. Insbesondere sollen möglichst zahlreiche „Ships of Opportunity“ ausgerüstet werden können. Dabei kann der Einsatz auf großen Schiffen durchaus sinnvoll sein, da die Wartung minimiert wird und der Aufwand auch an Bord seitens der Betreiber geringer wird. Mit der robusten Technik können Schiffe ausgerüstet werden, die bisher nicht sinnvoll in ein Wartungskonzept eingebunden werden konnten.

Durch die Entwicklung kleiner mobiler und flexibler Messplattformen können sowohl Anschaffungskosten als auch Betriebskosten deutlich verringert werden. Da Wartungsintervalle u.a. aufgrund der automatischen Reinigung sehr lang sein können, mindern sich die Betriebskosten erheblich. Damit wird es möglich, diese Technologien in Produkte zu überführen, die einen wesentlich breiteren Markt adressieren.

OceanoScientific® soll Daten kostenfrei zur Verfügung stellen und bietet somit die Basis von Technik mit einem Link zu der Wissenschaft. Eine Vernetzung dieses Vorhabens wird daher weiter vorangetrieben, u.a. werden Gespräche mit dem EU FP7 Projekt Common-Sense (CS) geführt. In CS werden neue Messmethoden wie Messgeräte zur Detektierung von Mikroplastik in Seewasser entwickelt und sollen auf Messplattformen integriert werden.

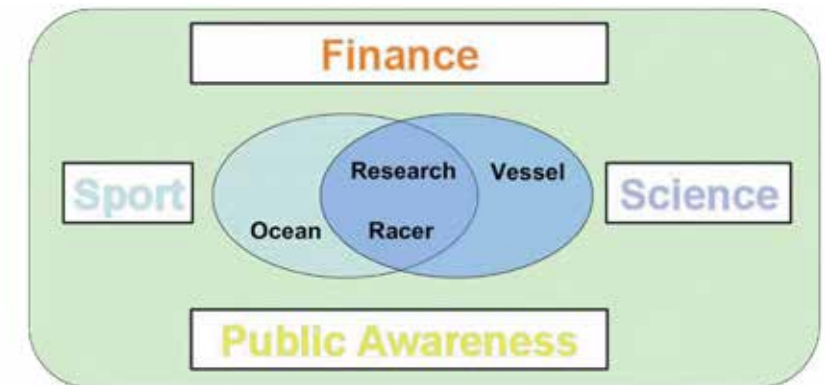
Für die Finanzierung werden im Bereich Segelrennen entsprechende Verträge mit den Betreibern bzw. Sponsoren ausgehandelt. Künftige Segelrennen „Round the world“ sollen, mit neuen Regularien ausgestattet, verpflichtend Messdaten sammeln, nicht zuletzt um sowohl Marketing dieser sehr aufwendigen Veranstaltungen als auch Sponsoring zu beleben.

Es wird erwartet, dass zunehmend „Ships of Opportunity“ gerade in arktischen Gewässern operativ messen sollen. Mit immer weiter steigendem finanziellem Druck und Einsparmaßnahmen kann eine verbesserte Akzeptanz

bei den Schiffsbetreibern und Anwendern (Wissenschaft) geschaffen werden, indem die in diesem Vorhaben zu entwickelnde Technologie eine weitere Automatisierung und Wartungsfreiheit erlaubt.

Ziel der OceanoScientific® Organisation ist die anschließende Kommerzialisierung, um Messsysteme flächendeckend und in größerer Zahl, verglichen mit einzelnen „Underway“ Projekten heute, einsetzen zu können.

Insbesondere können räumlich und zeitlich mehr Daten in der südlichen Hemisphäre gewonnen werden. Durch den Einsatz von Autokalibrierungen und automatischen Reinigungen werden Langzeiteinsätze ermöglicht, die helfen, den Erkenntnishorizont über Energietransport, Weltklima oder Schifffahrtsrouten deutlich zu erweitern.



Konzept des OceanoScientific® Programs: Sport, Wissenschaft, Industrie und Finanzpartner werden zusammengeführt. Quelle: OceanoScientific®

## ECUP3000 – Enhanced Control of Underwater Production down to 3000 mwd

Förderkennzeichen: 03SX312

Dr. Sven Hoog, Hartmut Kupke  
(IMPac Offshore Engineering GmbH, Hamburg)  
Stefan Ladig, Jens-Uwe Brandt  
(ITT Bornemann GmbH, Oberkirchen)  
Dr. Johannes Kunze, Dr. Christian Koch  
(Krohne Messtechnik GmbH, Duisburg)  
Prof. Thomas Musch, Martin Gevers, Malte Mallach,  
Patrick Gebhardt, Sascha Langener  
(Ruhr-Universität Bochum)  
Prof. Heinz Wörn, Stephan Irgenfried, Sergej Neumann  
(Karlsruher Institut für Technologie (KIT))

### Zusammenfassung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt 'ECUP3000 – Enhanced Control of Underwater Production down to 3000 mwd' wurde durch die Firmen IMPac Offshore Engineering (IMP, Projektkoordination), ITT Bornemann (BOR) und Krohne Messtechnik (KMT) sowie dem Institut für Prozessrechen-technik, Automation und Robotik (IPR) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und dem Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik (EST) der Ruhr-Universität Bochum (RUB) durchgeführt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Laufzeit war von 03-2012 bis 02-2015 (KMT und RUB) bzw. bis 07-2015 (IMP, BOR und KIT) nach kostenneutraler Verlängerung.

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines integrierten Systems von Instrumenten und Methoden zur optimierten Offshore-Förderung von Kohlenwasserstoffen. Das System soll es Betreibern von Unterwasserproduktions-systemen (UPS) ermöglichen,

- die Produktion (Klärung der Frage, was wird in welcher Quantität und Qualität produziert), den technischen Zustand der Produktionsanlagen, sowie die Auswirkung der Produktion auf die Umwelt im Nahbereich kontinuierlich zu überwachen,
- ein integriertes Asset Management einschließlich präventivem Wartungskonzept (Preventive Maintenance) zu implementieren,

- die Produktion von Kohlenwasserstoffen feinzusteuern und
- ein effektives Energiemanagement (Subsea Power Management) durchzuführen.

**Teilprojekt, Entwicklung eines umfassenden Monitoringsystems sowie eines integrierten Asset Managementsystems' (IMPaC)**

Ziel der Arbeiten bei IMPaC war neben einer erfolgreichen Gesamtkoordination die Entwicklung eines integrierten Asset-Managementsystems, das wesentliche Module umfasst (Abbildung 1). Inbegriffen sind zudem die grundlegenden Netzwerk- und Kommunikationstechniken, sowie die Mess- und Sensorkonzepte und die Wartungs- und Interventionskonzepte. Das Teilprojekt bildet damit die Voraussetzung, um alle Teilsysteme von ECUP3000, d.h. den Multiphasenpumpenteststand von ITT Bornemann, den Durchflussmessstand von Krohne und RUB, die Simulationen von KIT und auch etwaige zukünftige Systemkomponenten zu einem Gesamtsystem zu integrieren. Das Monitoringsystem als Teil des Asset Managements basiert auf einem modularen Konzept von ‚Services‘, die getrennt auf die unterschiedlichen Daten der Sensorik für Förderprozess, Anlagenzustand und Umwelt bzw. den hierfür stellvertretend im Projekt erstellten Simulationsergebnissen zugreifen (Abbildung 2), von denen folgend einige exemplarisch vorgestellt werden.

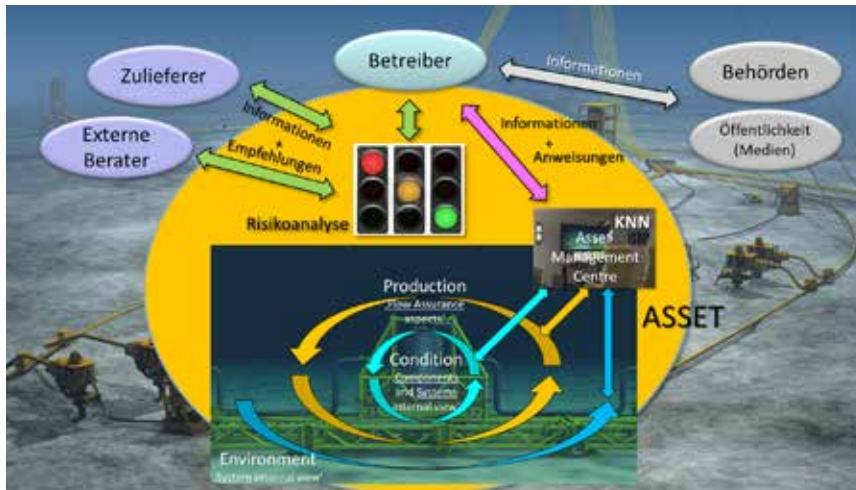


Abbildung 1: Risiko basiertes Asset Management als System im Wechselspiel aller Beteiligten

**Monitoringkonzept**

Um ein offenes und modulares Expertensystem zu schaffen, das unproblematisch durch neue Module erweiterbar ist, wurde eine SQL-Datenbank als zentrale Kommunikationsschnittstelle eingesetzt. Mit sogenannten Datenbank-Views wird die Schnittstelle zum Expertensystem auf der SQL-Datenbank gefiltert und definiert. Mittler zwischen SQL-Datenbank und Prozesssteuerung und -beobachtung ist die Nutzerschnittstelle, die so genannte SCADA. Unter Berücksichtigung der geplanten Funktionalität wird die Erstellung eines modularen Expertensystems ermöglicht, welches im Betrieb an die Bedürfnisse unterschiedlicher Client-Anfragen angepasst werden kann. Clients sind in diesem Zusammenhang unterschiedliche Nutzergruppen der Daten, also z.B. der Anlagenbetreiber selbst, wichtige Subsystemlieferanten oder Service-Provider. Weiterhin ist es möglich, auch während des Betriebs Expertensysteme hinzuzufügen oder bestehende zu entfernen, um die Fähigkeiten des gesamten Expertensystems stets aktuellen Anforderungen anpassen zu können.

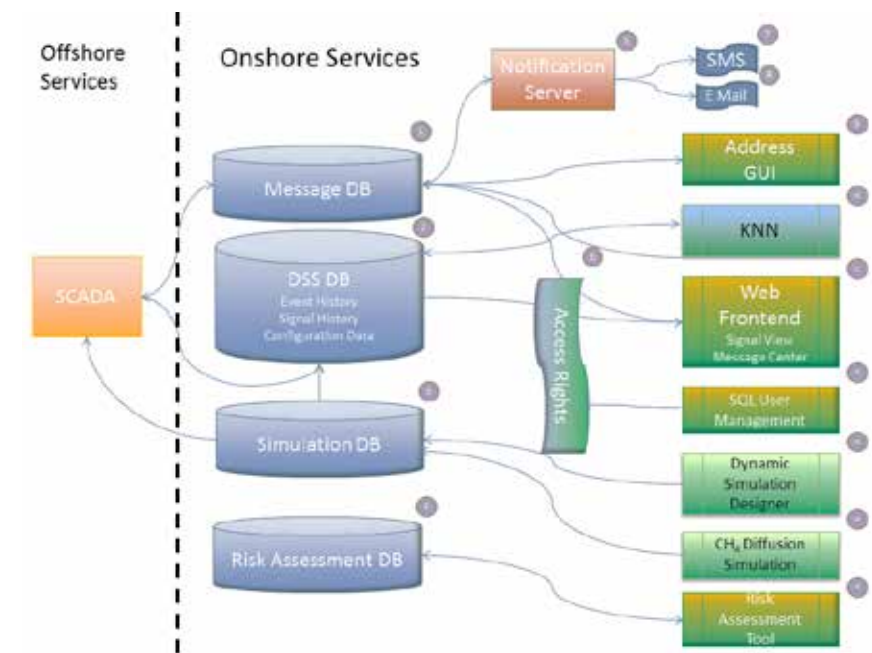


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der bei ECUP3000 von IMPaC entwickelten ‚Service-Module‘ des Monitoring Systems



## Künstliches Neuronales Netz (KNN)

Der neu erschaffene Künstliche Neuronale Netz (KNN) Algorithmus arbeitet als autonomes Modul, das die Signaldaten aus der DSS Datenbank (System Zustandsdaten) liest (vgl. Abbildung 2) und auf die trainierten Ereignismuster hin überprüft. Wenn eines dieser Muster erkannt wird, so wird eine Benachrichtigung per SMS und Email an den Operator ausgegeben und ein Eintrag in die Log Tabelle vorgenommen. Über eine bereits implementierte Webservice-Schnittstelle werden diese mit Daten über den aktuellen Zustand der Komponenten des UPS versorgt. Das Expertensystem dient dazu, Handlungsempfehlungen zu generieren, welche einen vorausschauenden Betrieb des UPS ermöglichen. Hierzu wird Wissen von den Öl- und Gas-Experten (dem Fachpersonal der jeweiligen Anlagenbetreiber) im Rahmen einer Risikoanalyse mit den aktuellen Zustandsdaten des Systems verknüpft, für die unterschiedlichen Clients gefiltert und zur weiteren Bearbeitung in Form von Maßnahmen an die zuständigen Stellen des Anlagenbetriebs weitergeleitet. Zuvor erzeugte 'Lessons' werden von einem so genannten 'Neural Sensor Network' verarbeitet und trainieren ein KNN mit Hilfe eines Back Propagation Algorithmus. In der GUI werden die Sensorwerte auf einen Bereich zwischen -1 und 1 normiert dargestellt, da die einzelnen Werte die Eingabeneuronen darstellen und eine Normierung für die weitere Verarbeitung nötig ist. Es muss nicht jeder Wert trainiert werden, sondern nur eine Reihe typischer Situationen. Anhand der Mustererkennung des KNN werden nach Abschluss einer gewissen Trainingsphase Abweichungen im Systemverhalten erkannt, auch wenn sie vorher nicht trainiert wurden. Die Zustände des KNN's werden in Echtzeit der Verarbeitung dargestellt, damit man die Entwicklung während der Lernphase verfolgen kann. Im Laufe der Trainingsphase werden die Zustände der Ausgabeneuronen immer eindeutiger bestimmt. In der Auswertungsphase ist festgelegt, wie die Ausgabeneuronen auf die Sensorwerte reagieren. Das 'Wissen' des KNN's liegt in einer Wichtungsmatrix vor, die bei Bedarf auch als XML Datei gespeichert werden kann. Mit der Wichtungsmatrix wertet das KNN die eingehenden Sensordaten in Echtzeit aus. Wenn ein Ausgabeneuron, welches einen Fehlerzustand abbildet, aktiviert ist, kann eine Notifikation an einen Operator per SMS und/oder Email erfolgen.

## Web Frontend und Nutzerschnittstelle / HMI

Das Web-Frontend dient dem Operator zur Prüfung des bestehenden Systems. Diese Anwendung wird zentral zur Verfügung gestellt und kann für Wartungsarbeiten auch zentral geändert werden. Der Anwender muss sich beim Anmelden autorisieren, bevor die Informationen bereitgestellt werden. Voraussetzung ist ein Standard Webbrowser. Allerdings: Nur wer sich im Netzwerk des Betreibers befindet, kann aus Sicherheitsgründen auch Zugriff

auf diese Anwendung erlangen. Moderne Netzwerkmechanismen erlauben auch den sicheren Zugriff von entfernten Standorten aus. Damit der Anwender nur die Informationen einsehen und ändern kann, für die er berechtigt ist, werden die Daten schon serverseitig gefiltert und nicht über das Netz übertragen. Die mit der Software WinCC OA (Fa. Siemens) durch IMPaC neu erstellte SCADA Oberfläche eröffnet neue Möglichkeiten der Vernetzung der Control Module im UPS. Neben einer redundanten Serverarchitektur in der Leitwarte mit sehr kurzen Umschaltzeiten ('heiße Redundanz') erhält jedes Control Modul einer Subkomponente einen eigenen lokalen SCADA-Server auf Basis eines Embedded PCs. Die sogenannten verteilten Systeme archivieren ihre lokalen Daten in einer eigenen systemspezifischen Datenbank (RAIMA-Datenbank). Der Austausch zum zentralen Serversystem mit der SQL-Datenbank erfolgt über Hintergrundprozesse, die die operativen Prozesse nicht behindern. Etwaige Datenverluste bei Kommunikationsstörungen werden solange vermieden, wie die (sehr große) Speicherkapazität des betroffenen verteilten Systems noch nicht erschöpft ist.

## Teilprojekt 'MFA - Multiphase Flow Assurance', ITT Bornemann

Das Teilprojekt MFA hatte das Ziel, unter dem Schlagwort Multiphase Booster Meter Messkonzepte zu entwickeln, die auf einem Pumpensystem basieren und durch zusätzliche, geschickt im einzigartigen Messumfeld der Pumpe angebrachte Messtechnik in der Lage sind, dem Betreiber Informationen über den mehrphasigen Durchfluss zu liefern. Um ein solches System in einer Unterwasserinstallation erfolgreich betreiben zu können, wurden noch vier weitere Schwerpunkte für den Entwicklungsbedarf identifiziert.

## Elektrische Energieversorgung

Die angestrebte Feinsteuerung der Produktion von Kohlenwasserstoffen über die Drehzahlregelung der im Feld installierten Pumpen erfordert eine detaillierte Kenntnis des elektrischen Versorgungssystems, um auch über große Distanzen eine stabile, bedarfsgerechte Energiebereitstellung für Ein- und Mehrpumpensysteme realisieren zu können. Die Untersuchungen ergaben, dass der Anfahrzustand die anspruchsvollste Situation darstellt (Abbildung 3).



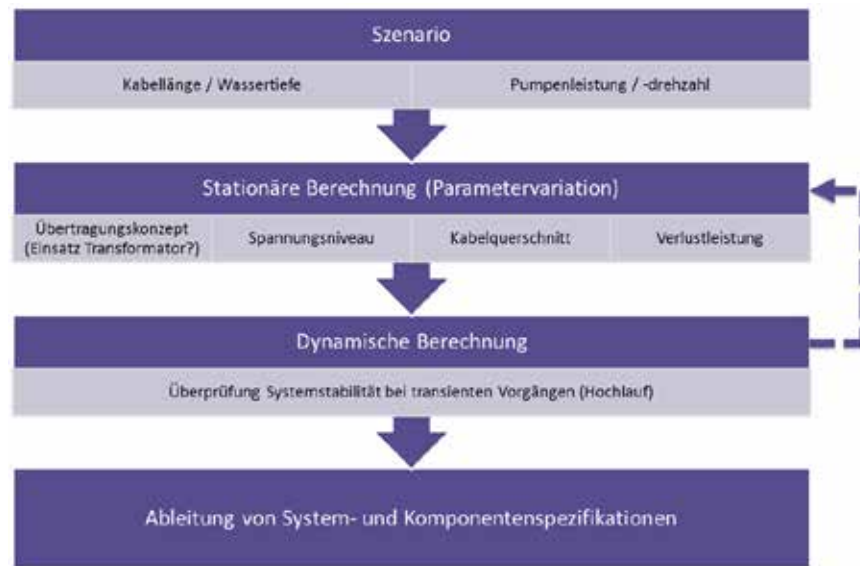


Abbildung 3: Vorgehen bei der Auslegung einer Energieversorgungslösung

## Hydraulikversorgung

Das im vorangegangenen Projekt ISUP bereits entwickelte und patentierte Unterwasserpumpenkonzept mit einem ölgefüllten, druckkompensierten Antriebsstrang setzt eine äußerst zuverlässige, ausreichend dynamische Regelung des Öldrucks voraus, um die Funktion sowohl der Subseapumpe als auch des Subsea Power Generators zu ermöglichen. Da diese Regelung in unmittelbarer Umgebung der Pumpe als Teil des Pumpensystems stattfinden muss, war ein Schwerpunkt des Forschungsprojektes die Entwicklung eines unterwassertauglichen Hydrauliksystems, welches die oben genannten Anforderungen an Verfügbarkeit und Dynamik erfüllt. Die erforderliche Zuverlässigkeit wird durch eine redundante Anordnung von Ventilkaskaden erreicht, welche durch je eine hochzuverlässige SPS angesteuert und durch eine USV mit Energie versorgt werden (Abbildung 4).

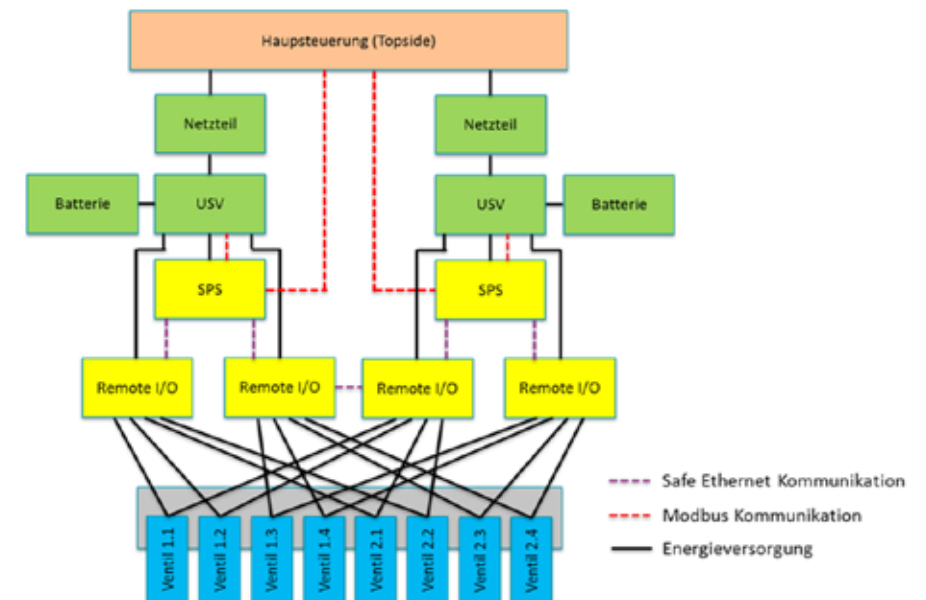


Abbildung 4: Redundanz-Konzept des Pressure Control Moduls

## Flow Assurance

Das Thema Flow Assurance ist von zentraler Bedeutung für die Öl- und Gasproduktion, insbesondere im Subseabereich, wo es durch lange Pipelines und geringe Umgebungstemperaturen zu einer deutlichen Abkühlung des Fördermediums kommt. Ziel war das Zusammentragen von grundlegendem Wissen, um einerseits kritische Betriebsbereiche für das Unterwasserproduktionssystem zu identifizieren und andererseits zu analysieren, mit welchen Maßnahmen ein Pumpen- bzw. Messsystem zur Aufrechterhaltung des Produktionsflusses beitragen kann.

## Felderprobung

Die hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit gelten selbstverständlich auch für das zentrale Pumpenmodul. Um hier weitere Erfahrungen und Daten zu sammeln, wurde eine Schraubenspindelmaschine (MTM), welche nahezu baugleich mit dem Subsea-Pumpenmodul ist, einem Test unter realen Ölfeldbedingungen unterzogen. Ziel war es, einen Ölfeldbetreiber mit subsea-ähnlichen Betriebsbedingungen als Partner zu gewinnen, die Installation und den Betrieb der Pumpe im Feld zu begleiten und anschließend zu beurteilen, ob aus den Testergebnissen weitere Verbesserungen abgeleitet werden können.

## Teilprojekt ‚Non-radioactive Multiphase Flowmeter‘, Krohne Messtechnik

In diesem Teilprojekt wurde ein Messverfahren basierend auf dem Coriolis-Prinzip für die Mehrphasendurchflussmessung von Öl-Wasser-Gas-Gemischen in der Tiefsee entwickelt. Ein Ziel dieser Entwicklung war die Kombination des genannten Messverfahrens mit den vom Projektpartner RUB entwickelten bildgebenden Verfahren, um auf diese Weise das Konzept eines neuartigen multiphasen Durchflussmessgerätes umzusetzen, welches den mehrphasigen Massenstrom und dessen Zusammensetzung zuverlässig und genauer messen kann, als dies mit aktuell verfügbarer und nicht auf radioaktiven Quellen basierender Messtechnik möglich ist.

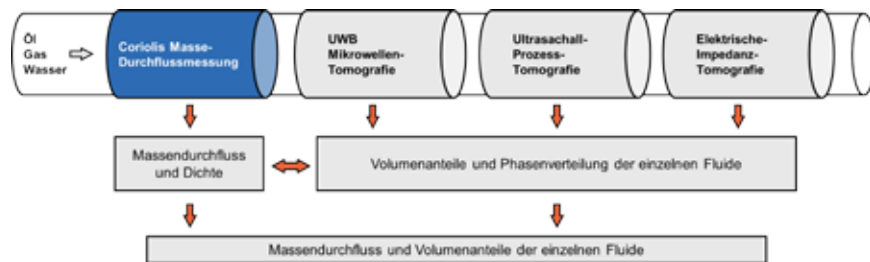


Abbildung 5: Messkonzept zur Bestimmung der Massendurchflüsse sowie der Volumenanteile einzelner Phasen innerhalb von Mehrphasenströmungen.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Teilprojektes die Integrationsmöglichkeiten des Coriolis-Messprinzips in eine Multiphasenpumpe untersucht, und mittels Implementierung der neuentwickelten Messtechnik in eine Schraubenspindelpumpe des Projektpartners BOR das Konzept eines Multiphasen Booster Meter (MBM) umgesetzt.

### Coriolis-Prinzip

Bei der Coriolis-Massendurchflussmessung wird ein beidseitig eingespanntes Messrohr zu einer mechanischen Schwingung bei seiner Resonanzfrequenz angeregt. Bei Vorhandensein eines Massendurchflusses wirkt auf das fließende Medium die Corioliskraft, wobei diese auf die einlaufende und auslaufende Rohrhälfte in entgegengesetzter Richtung wirkt. Dies führt zu einer sehr kleinen Phasenverschiebung zwischen den sinusförmigen Schwingungen der beiden Rohrhälften, welche entlang der Längsachse des Messrohres an zwei Stellen gemessen wird.

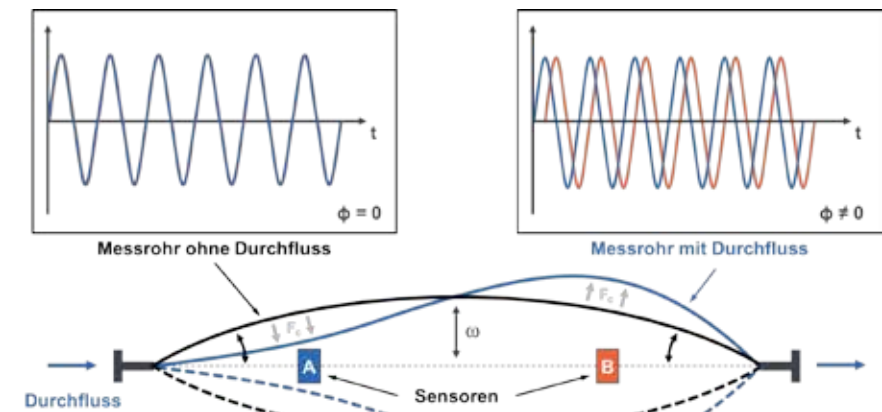


Abbildung 6: Funktionsweise eines CMD am Beispiel eines einzelnen schwingenden Messrohres.

Als direkte Messgrößen erhält man die Phasenverschiebung  $\phi$  zwischen den Signalen beider Sensorspulen, die Resonanzfrequenz  $\omega$  des gefüllten Messrohres sowie über einen zusätzlichen Sensor die Temperatur  $T$  des im Messrohr befindlichen Fluids. Aus diesen Messgrößen kann man den Massendurchfluss  $m'$ , die Dichte des Fluids  $\rho$  und den Volumendurchfluss  $V'$  berechnen.

### Entwicklung des Coriolis-Massendurchflussmessers

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden mit Hilfe eines Echtzeitsimulationssystems umfangreiche Modellierungen des Messrohres samt Fluid durchgeführt und dabei unter anderem der Einfluss von Gasblasen im Fluid auf das Coriolis-Messverfahren genauer untersucht. Gasblasen wirken sich in mehrfacher Hinsicht negativ auf das Messverfahren aus, da sie sowohl die Messrohrschwingung dämpfen als auch Störungen in den Messsignalen verursachen, die wiederum dazu führen können, dass das Messrohr nicht bei seiner Resonanzfrequenz angeregt wird. Basierend auf den Modellierungsergebnissen wurden eine vollständig neue Messelektronik sowie neue Mess- und Regelalgorithmen entworfen. Eine weitere Herausforderung stellte der in einer Wassertiefe von 3000 m vorherrschende hydrostatische Außendruck dar, welcher bei der Dimensionierung des druckfesten Gehäuses berücksichtigt werden musste. Das Gehäuse wurde dabei in Form eines „Secondary Containment“ realisiert, welches neben der Funktion einer Kapselung gegenüber dem hydrostatischen Außendruck auch als Schutz gegen mögliche Leckagen des Messrohres fungiert und somit von innen zusätzlich dem Systemdruck standhalten muss. Dies ist insbesondere zum Schutz der Umwelt bei Betrieb in der Tiefsee erforderlich.

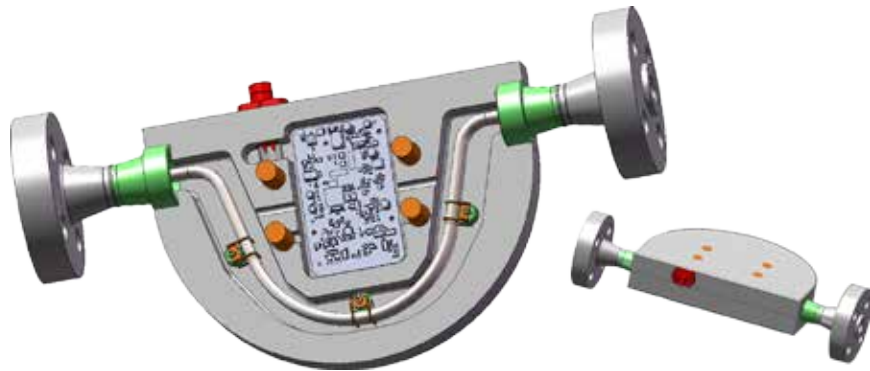


Abbildung 7: Finales Design mit druckfestem Gehäuse, eingebauter Platine, Sensor, Flanschanschlüssen und Subsea-Steckverbinder.

### Messergebnisse

Am Teststand von Projektpartner BOR wurden mit den Coriolisgeräten Messungen mit Gemischen aus Öl und Stickstoff durchgeführt, wobei die Fördermenge der Pumpe, die Druckdifferenz zwischen Pumpeneinlass und Auslass sowie der einstellbare Flusswiderstand zwischen den beiden Messgeräten variiert wurden. Die sehr gute Performance der neuentwickelten Messelektronik bezüglich der Toleranz gegenüber Gasblasen lässt sich anhand der dargestellten Messergebnisse gut erkennen (Abbildung 8). Die sich durch Absenken des Einlassdruckes und der damit verbundenen erhöhten Stickstoffausgasung verringernde Dichte des zweiphasigen Mediums wird, wie im linken Diagramm gezeigt, vom Messgerät am Pumpeneinlass korrekt erfasst. Trotz der signifikant unterschiedlichen Fluidichte und dem damit verbundenen variierenden Gasblasenanteil messen beide Coriolisgeräte einen nahezu exakt gleichen Massenstrom, was im rechten Diagramm zu erkennen ist

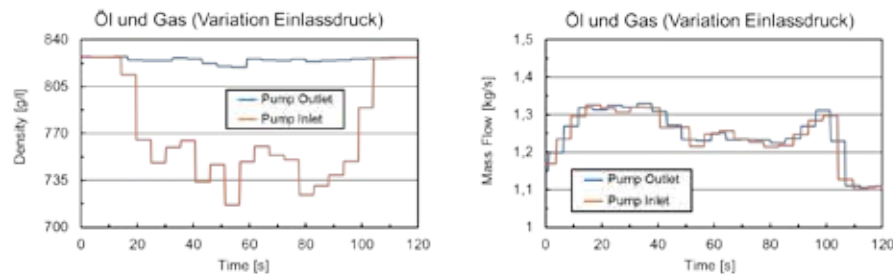


Abbildung 8: Messergebnisse zum Multiphasen Booster Meter (MBM)

Am Teststand des Projektpartners RUB wurden Versuchsreihen mit Wasser-Öl- und Wasser-Luft-Gemischen durchgeführt. Die Messwerte zeigen einen tendenziell linear ansteigenden Messfehler bei steigendem Gasanteil, doch selbst bei Gasanteilen von 60% arbeitet das Coriolisgerät zuverlässig

und hält die benötigte Schwingungsamplitude der Messrohre aufrecht. In Verbindung mit den bildgebenden Verfahren von RUB lassen sich die Messabweichungen über geeignete Rechenmodelle zudem drastisch reduzieren, was exemplarisch mit Hilfe von Messdaten der kapazitiven Impedanztomografie durchgeführt wurde. Bereits durch die rechnerische Kombination mit nur einem der bildgebenden Verfahren wurde der Messfehler auf ein Drittel reduziert, sodass im Zusammenspiel mit allen drei bildgebenden Verfahren mit einer weiteren signifikanten Reduzierung der Messabweichung gerechnet werden kann.

### Teilprojekt, Systemkonzepte für die Mehrphasendurchflussmessung und berührungslose Sensorik für Mehrphasenpumpen', EST, Ruhr-Universität Bochum

#### Multiphase Flow Meter

Zur Überwachung und Feinsteuerung des Öl-/Gas-Förderprozesses ist eine genaue Bestimmung der Volumenanteile und der Phasenverteilung des mehrphasigen Förderstroms in unmittelbarer Nähe der Bohrlöcher unverzichtbar. Bei Mehrphasenströmungen können die Strömungsverteilungen in Abhängigkeit von der Flussgeschwindigkeit, dem vorliegenden Druck und der Rohrgeometrie stark variieren, was eine Bestimmung der Zusammensetzung mit einem einzelnen Sensor unmöglich macht. Daher wurde ein Messsystem bestehend aus komplementären Einzelmesskonzepten, die miteinander kombiniert werden, entwickelt (siehe Abbildung 5). Die Einzelkonzepte basieren dabei auf unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien, der kapazitiven Impedanzmessung, der ultrabreitbandigen Mikrowellenmessung sowie Messungen mittels Ultraschalls.

#### Ultrabreitbandige Mikrowellentomografie

Die unterschiedlichen komplexwertigen Permittivitäten von Öl, Gas und Wasser beeinflussen die Ausbreitungseigenschaften von Mikrowellen innerhalb eines Messrohres. Auf Basis der Bestimmung der frequenzabhängigen Streuparameter des entwickelten 8-Tor-Sensors (s. Abbildung 9 a), kann die Permittivitätsverteilung innerhalb einer Querschnittsebene des Rohres rekonstruiert werden. (In Abbildung 9 b) ist als Beispiel die Rekonstruktion der Permittivitätsverteilung eines Polypropylen-Stabes in Luft dargestellt [1].

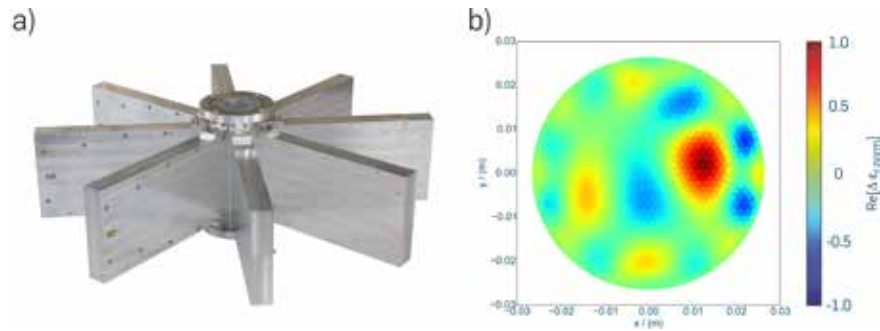


Abbildung 9: a) Ultrabreitbandiger Sensor für die Mikrowellentomografie, b) Rekonstruierte Permittivitätsverteilung im Fall eines Polypropylenstabes in Luft.

### Ultraschall-Prozesstomografie

Durch die deutlich unterschiedlichen akustischen Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen sind ultraschallbasierte Messverfahren zur Bestimmung von Gasanteilen besonders geeignet. Daher wurde ein echtzeitfähiges Ultraschall-Tomografiesystem entwickelt (Abbildung 10 a), welches die Verteilung gasförmiger Objekte im Rohrquerschnitt anhand von Echomessungen (Abbildung 10 b)) und Dämpfungsmessungen (Abbildung 10 c)) rekonstruiert [2].

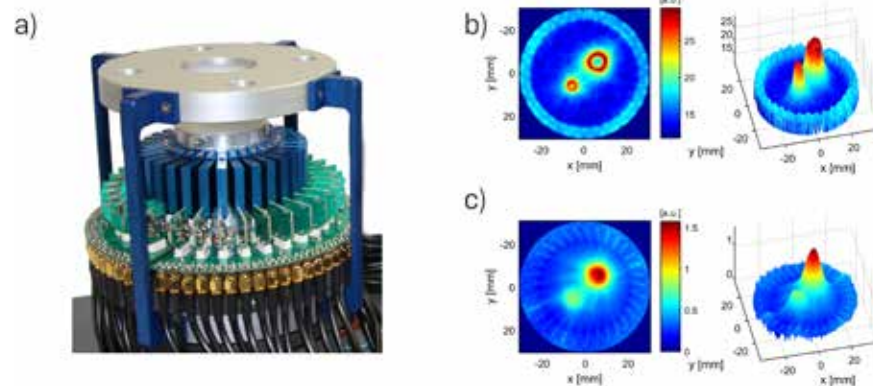


Abbildung 10: a) Messsystem für die Ultraschall-Prozesstomografie, Rekonstruktionen luftgefüllter Kunststoffstäbe ( $d= 3 \text{ mm}$ ,  $d= 7 \text{ mm}$ ) in Wasser aus b) Echomessungen, c) Dämpfungsmessungen.

### Elektrische Impedanz-Tomografie

Mittels der elektrischen Impedanztomografie kann die komplexe Leitfähigkeitsverteilung über dem Rohrquerschnitt rekonstruiert werden und somit auf die Fluidverteilung der Mehrphasenströmung geschlossen werden [3]. In Abbildung 11 a) ist ein Foto des realisierten kapazitiv gekoppelten Impedanz-Tomografiesystems dargestellt [4]. Außerdem sind in Abbildung 11 zwei Beispielrekonstruktionen von dielektrischen Phantomen dargestellt. Durch die komplexwertige Auswertung sind hierbei die Messobjekte bestehend aus Polypropylen (Abbildung 11 b)) und eines wassergefüllten Plexiglas-Rohres (Abbildung 11 c)) deutlich voneinander zu unterscheiden. Polypropylen hat elektrisch sehr ähnliche Eigenschaften zu Öl. Folglich ist mittels der Impedanztomografie eine orts aufgelöste Stoffunterscheidung von Öl, Wasser und Gas möglich.

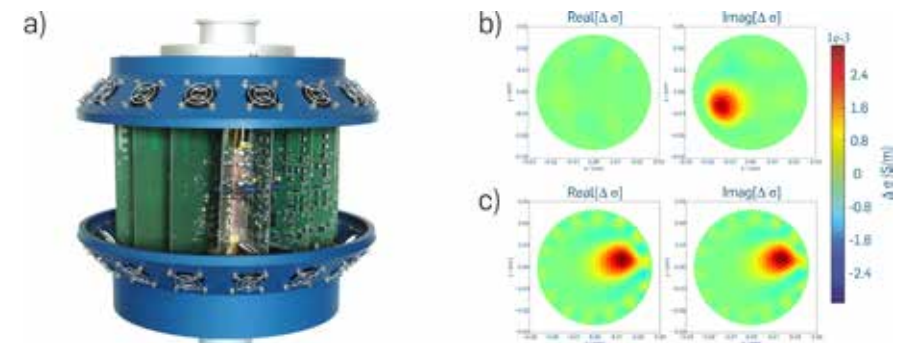


Abbildung 11: a) Kapazitiv gekoppeltes Impedanz-Tomografiesystem b) Rekonstruierte Leitfähigkeitsverteilung eines Polypropylen-Stab in Luft c) Rekonstruierte Leitfähigkeitsverteilung eines wassergefüllten Plexiglas-Rohres in Luft

### Berührungslose Sensorik für Mehrphasenpumpen

Teil des Monitoring-Konzeptes ist die Erfassung der Drehzahl der Mehrphasenpumpe, was im Hinblick auf eine Pumpenregelung von großer Bedeutung ist. Aufgrund der Druckkapselung der Pumpe ist es allerdings nicht möglich einen Drehwinkelgeber an der Pumpenwelle zu befestigen. Die erforderliche Messtechnik muss stattdessen außerhalb der Pumpenkammern angebracht werden, was nicht mit handelsüblichen Drehzahlmessern realisiert werden kann. Daher wurde ein ultraschallbasiertes Messsystem entwickelt (siehe Blockschaltbild in Abbildung 12 a), welches eine berührungslose Messung der Drehzahl eines Zahnrades ermöglicht. Hierbei wird ein dem Puls-Doppler-Verfahren ähnliches Messkonzept verwendet, dessen Signalverarbeitungsschrit-



te vom Messsignal bis zum drehzahlabhängigen Spektrum in Abbildung 12 b) dargestellt sind.

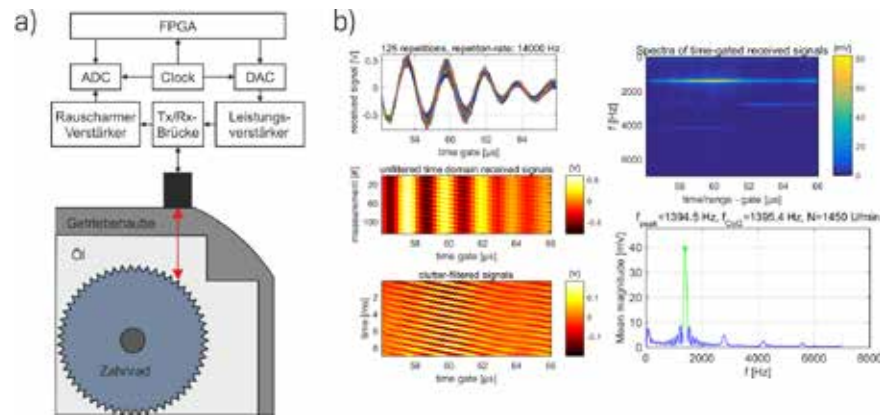


Abbildung 12: a) Blockschaltbild des Messsystems für die Ultraschallbasierte Drehzahlmessung, b) Verarbeitung von Empfangssignalen für eine Drehzahl von 1450 U/min.

### Teilprojekt , CoMoDOS – Condition Monitoring and Diagnosis based on Online Simulations ‘, IPR, Karlsruhe Institut für Technologie

Im Teilprojekt CoMoDOS wurde vom KIT eine Simulation für ein UPS erstellt, die neue Möglichkeiten beim Condition Monitoring und der Wartung solcher Anlagen erlaubt. Die Simulation wurde mit Hilfe der Modellierungssprache Modelica programmiert und berücksichtigt komplexe physikalische Phänomene, wie sie in realen Anlagen auftreten. Dazu gehören zum einen Modelle der verbauten Komponenten, wie etwa Pipelines, Ventile, Pumpen und Sensoren.

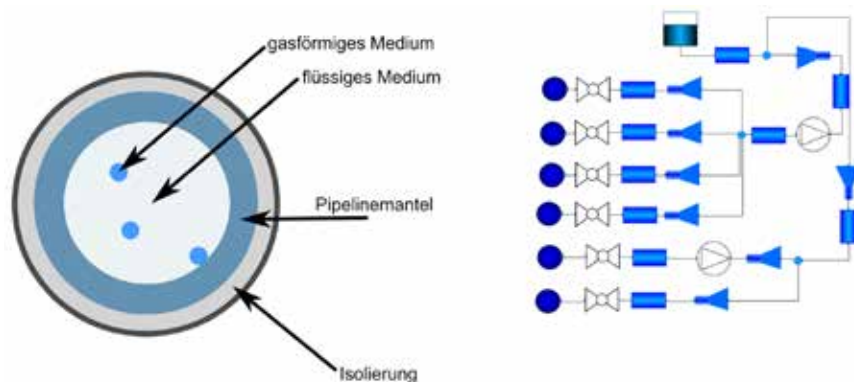


Abbildung 13: Schematischer Querschnitt einer Pipeline mit Multiphasengemisch (links). Beispiel einer vereinfachten Anlage in Modelica (rechts).

Zum anderen wurden auch die Prozessabläufe in den Pipelines mathematisch nachgebildet. Bei der Erdölförderung kommt es in den Pipelines zu einer Mischung aus dem zu fördernden Rohöl, Gas, Wasser und feinen Feststoffen wie etwa Sand. Dieses Multiphasengemisch kann in der Simulation nachgebildet werden. Auch die thermodynamischen Eigenschaften werden simuliert, um Expansion, Kompression oder Phasenzustände im Medium zu berechnen. Die Simulation ist eine Basistechnologie auf der zahlreiche weitere Technologien aufsetzen, die für den Betrieb komplexer Unterwasseranlagen benötigt werden. So können Simulationen etwa parallel zu einem realen UPS laufen, wobei sie, gleich der echten Anlage, Sensorwerte in eine Simulationsdatenbank schreibt. Durch den Vergleich der realen Messwerte mit den simulierten können Rückschlüsse auf den Anlagenzustand getroffen werden. Aber auch andere Assitenzsysteme können mithilfe der Simulation realisiert werden. So können verschiedene Situationen wie ein Rohrbruch, ein Pumpenausfall oder Sensorstörungen simuliert werden und als Trainingsdaten für einen Klassifizierungsalgorithmus wie das KNN vom Partner IMPaC genutzt werden. Weiterhin wurde ein präventives Wartungskonzept entwickelt, welches anhand von Abnutzungsmodellen den Zustand einzelner Komponenten in der UPS voraussagen und daraus Wartungsempfehlungen ableiten kann.

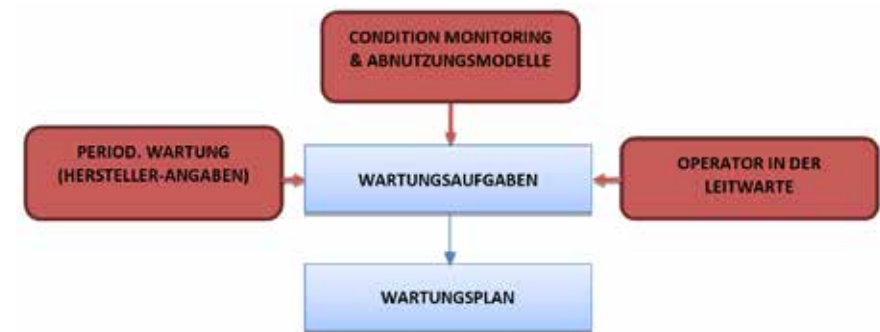


Abbildung 14: Elemente des Präventiven Wartungskonzeptes

### Danksagung

Die Teilprojekte von ECUP3000 bei den Firmen IMPaC, ITT Bornemann und Krohne sowie der Ruhr-Uni Bochum und dem KIT wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert, und durch den Projektträger Jülich (PTJ) administrativ betreut, wofür sich die Projektteilnehmer sehr herzlich bedanken. Auch bei den zahlreichen beteiligten Kollegen der Projektpartner möchten sich die Autoren herzlich für die Mitarbeit an dem Projekt bedanken.

## Korrespondenzadressen

- IMPaC Offshore Engineering GmbH, Hohe Bleichen 5, D-20354 Hamburg, Tel. +49 (0) 40 355440-0; Dr.-Ing. Sven Hoog (hoog(at)impac.de)
- ITT Bornemann GmbH, Industriestr. 2, D-31683 Obernkirchen, Tel. +49 (0) 5724 390-0, Dipl.-Ing. Jens-Uwe Brandt (Jens-Uwe.Brandt(at)itt.com)
- KROHNE Messtechnik GmbH, Ludwig-Krohne-Str. 5, D-47058 Duisburg, Tel.: +49 (0) 203 301 0, Dr.-Ing. Johannes Kunze (J.Kunze(at)krohne.com)
- Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik, Universitätsstr. 150, D-44780 Bochum, Tel.: +49 (0) 234-32 27115, Prof. Dr.-Ing. Thomas Musch (thomas.musch(at)rub.de)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Prozessrechen-technik, Automation und Robotik (IPR), Engler-Bunte-Ring 8, D-76131 Karlsruhe, Tel. +49 (0) 721 608-7131, Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn (heinz.woern(at)kit.edu)

## Literatur (Auswahl)

- [1] M. Mallach and T. Musch: Ultra-Wideband Microwave Tomography: A Concept for Multiphase Flow Measurement, 8th German Microwave Conference, Aachen, Germany, pp. 1-4. , 2014
- [2] S. Langener, T. Musch, M. Mallach, H. Ermert, and M. Vogt, A Non-Invasive System for Ultrasound Process Tomography of Multiphase Flows, Proc. 5th International Workshop on Process Tomography, 2014
- [3] P.Gebhardt, M. Gevers, and T. Musch, GPU Accelerated 2.5D Solver for Fast and Accurate Modelling of EIT Forward Problem in Tube Geometries, 7th World Congress on Industrial Process Tomography, Krakow, Poland, 2013
- [4] M. Gevers, P. Gebhardt, M. Vogt and T. Musch, An Electrical Capacitance Tomography System Allowing for Complex N-Port Calibration, 7th International Symposium on Process Tomography, Dresden, Germany, Sept. 2015
- [5] Hoog, S., Kupke, H., Ladig, S., Kunze, J., Koch, C., Musch, T., Gevers, M., Irgenfried, S.: A modern approach to integrated asset management, Ship & Offshore, 2014, N° 3

## PrOWOO – Prognose Optimaler Wetterfenster für Offshore Operationen

Förderkennzeichen: 03SX358

Günther Clauss, Marco Klein, Matthias Dudek  
(Bereich Schiffs- und Meerestechnik, Technische Universität Berlin)  
Katrin Hessner, Tyson Hilmer (OceanWaveS GmbH)

### Motivation

Offshore-Operationen sind sicherheitskritische Prozesse, welche die Wirtschaftlichkeit der beteiligten Systeme maßgeblich beeinflussen. Die Durchführbarkeit von Offshore-Operationen hängt von limitierenden Absolut- bzw. Relativbewegungen der beteiligten Systeme ab. Diese Entwurfskriterien sind üblicherweise an limitierende Seegangparameter wie Wellenhöhe oder -periode gekoppelt, welche mittels stochastischer Systemanalyse identifiziert werden. Die Stochastik liefert ausschließlich Aussagen über Zulässigkeit bzw. Unzulässigkeit bestimmter Seegänge, kann jedoch keine kurzfristigen, geeigneten Seegangsbedingungen bzw. Operationsfenster im laufenden Betrieb identifizieren. Dies kann zu unnötigen Ausfallzeiten führen, da in den meisten Seegängen (insbesondere im Übergangsbereich zwischen zulässigen und unzulässigen Seegängen) häufig günstige Wellensequenzen auftreten, die eine kurzfristige Operation im Minutenbereich erlaubt hätten, so aber ungenutzt verstreichen. Ein deterministisches Prognoseverfahren zur Identifizierung kurzfristiger, geeigneter Seegangsbedingungen kann diese Lücke schließen und sowohl die Sicherheit als auch die Wirtschaftlichkeit von Offshore-Operationen erhöhen.

### Konzept

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Programmsystems zur Identifizierung günstiger Zeitfenster für Offshore-Operationen mittels deterministischer Bewegungsvorhersage für die beteiligten Strukturen. Das Programmsystem setzt sich dabei aus den drei unabhängigen Systemkomponenten Seegangserfassung, Seegangsvorhersage und Bewegungsvorhersage zusammen. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Systemkomponenten sowie deren Schnittstellen.

Der in größerer Entfernung vom Operationsgebiet vorherrschende, stochastische Seegang wird durch das schiffseigene Radarsystem erfasst. Die räumliche Entwicklung des aufbereiteten, radarbasierten Wellenbildes wird im

nächsten Schritt nach numerischen, nichtlinearen Methoden berechnet. Hieraus folgen die am Ort der Strukturen wirkenden Wellensequenzen, über die die Bewegungen ermittelt werden. Die Nutzung numerischer Methoden mit sehr schnellen Berechnungszeiten ermöglicht die Bewegungsprognose – den Blick in die Zukunft – für die geplante Offshore-Operation. Als gegebene Eingangsgrößen werden die operationsabhängigen Systemeigenschaften der beteiligten Strukturen in Form von Impulsantwortfunktionen benötigt.

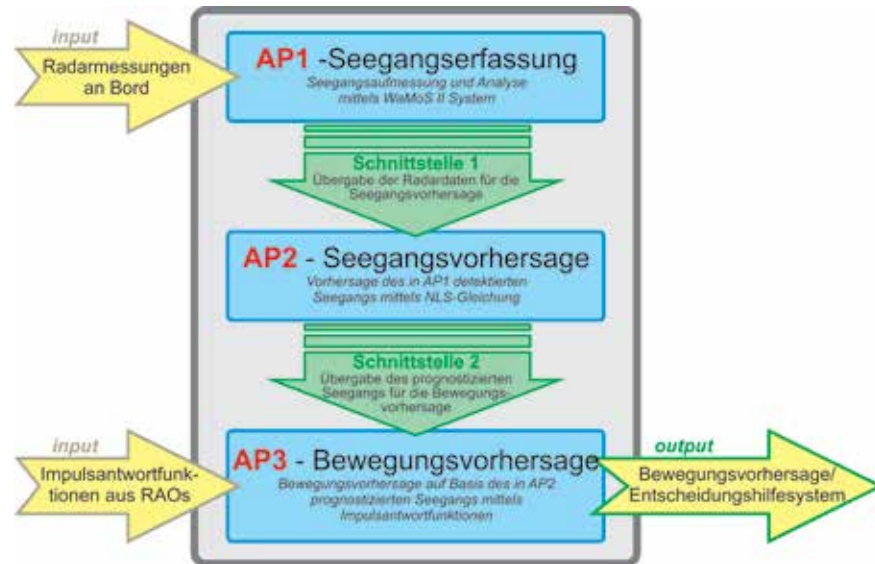


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Seegang- und Bewegungsvorhersagesystems.

Die Systemkomponenten werden in einem Programm zusammengefasst und ermöglichen eine automatische Seegang- und Bewegungsvorhersage. Nachfolgend werden die Teilkomponenten im Detail beschrieben.

### Seegangserfassung

Für die Erfassung von Wellen in Zeit und Raum werden die Daten eines nautischen X-Band Radar benutzt werden. Ein nautisches Radar liefert im Nahbereich ( $<3\text{sm}$ ) Bilder der Wasseroberfläche mit hoher zeitlicher ( $\sim 2\text{s}$ ) und räumlicher ( $4\sim 8\text{m}$ ) Auflösung und ermöglicht so eine richtungseindeutige Erfassung des Seegangs in Zeit und Raum. Die erfolgreiche, operationelle Nutzung solcher Systeme basiert auf umfangreichen, wissenschaftlichen Untersuchungen zum Abbildungsmechanismus und zur effizienten Berechnung von Seegangparametern aus Radardaten.

Ein solches System wurde von der Firma OceanWaveS GmbH erfolgreich unter dem Namen WaMoS II entwickelt und wird zur operationellen Datenaufnahme vermarktet. Ein großer Anwendungsbereich für WaMoS II sind alle festen und schwimmenden Offshore-Strukturen bzw. Schiffe. WaMoS II wird zunehmend auch von Land aus zur Überwachung des küstennahen Bereiches eingesetzt.

Im Laufe der letzten Jahre wurden für WaMoS II zusätzlich zur Berechnung der statistischen Seegangparameter neue Analysemethoden entwickelt. In diesem Zusammenhang ist das Invertierungsverfahren zu erwähnen. Dieses Verfahren ermöglicht es, aus den Radarbildern Karten der Wasseroberflächenauslenkung zu berechnen. Aus diesen Karten können dann Eigenschaften einzelner Wellen abgeleitet werden, wie z.B. die maximale Wellenhöhen, Wellensteilheiten und die Eigenschaften von Wellengruppen. Diese deterministische Erfassung des Seegangs bietet Anwendungsmöglichkeiten die weit über die statistischen Parameter hinausgehen.

Neben unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten haben sich zudem die Anforderungen an die operationelle Seegangsmessung in den letzten Jahren verändert. Lag früher der Fokus auf der genauen Messung im hohen Wellenhöhenbereich ( $HS > 2\text{m}$ ), so gibt es heute viele neue Offshore-Aktivitäten, die eine akkurate Messung der Wellenhöhen im unteren Messbereich ( $0,5 < HS < 2\text{m}$ ) benötigen.

Im Rahmen dieses Projektes soll die Prognose von Schiffsbewegungen auch bei niedrigem Seegang mit hinreichender Messgenauigkeit ermöglicht werden ( $HS \leq 2\text{m}$ ). Des Weiteren soll die deterministische Einzelwellenerfassung durch den Einsatz neuester WaMoS II – Hard- und Software optimiert werden. Dafür wird erstmals ein X-Band Radar mit VV-Antenne verwendet. Die VV-Antenne kennzeichnet im Vergleich zur herkömmlichen HH-Antenne eine höhere Sensitivität, eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung und die Möglichkeit der Einzelaufnahme. Im Zuge der Integration neuer Hardware in das bestehende WaMoS II – System wird die Analysesoftware umfassend überarbeitet.

### Seegangsvorhersage

Das im vorangegangenen Teilschritt mittels Radar ermittelte Wellenbild wird als Eingangsgröße für die Seegangsvorhersage verwendet. Oberstes Ziel der deterministischen Seegangsvorhersage ist die sehr schnelle Berechnungszeit bei gleichzeitiger hoher Genauigkeit, um den vorhergesagten Seegang am Ort der Strukturen in einer ausreichenden Zeitspanne im Voraus zu erhalten. Dieser Zusammenhang zeigt den Grundkonflikt der Seegangsvor-

hersage, da mit zunehmender Komplexität der mathematischen Modelle die Genauigkeit, aber auch die Berechnungsdauer, steigt. Nur wenige Methoden sind in der Lage komplexe Seegangszustände über große Distanzen und Zeiträume mit hinreichender Geschwindigkeit für eine Vorhersage zu berechnen.

Das einfachste und schnellste Verfahren für die Seegangsvorhersage ist die lineare Beschreibung der Wellenausbreitung. Lineare Methoden sind in den letzten Jahren unter der Prämisse der Seegangsvorhersage intensiv untersucht worden (Payer & Rathje (2004); Clauss et al. (2007); Naaijen & Huijsmans (2008); Clauss et al. (2009a, 2009b); Naaijen et al. (2009); Naaijen & Huijsmans (2010); Kosleck (2013)). Dabei zeigte sich, dass die lineare Theorie adäquate Ergebnisse liefert, insbesondere für moderate Seegänge geringer Wellensteilheit. Jedoch impliziert die lineare Theorie große Unwägbarkeiten hinsichtlich der Genauigkeit aufgrund der zugrundeliegenden Annahmen und Vereinfachungen. Nichtlineare Methoden erzielen höhere Genauigkeiten, sind jedoch bezüglich der Rechendauer langsam. Eine der wenigen Ausnahmen stellt hierbei die Higher Order Spectral Methode (HOSM) dar. Wu (2004) und Blondel et al. (2008) verwendeten die HOSM für die deterministische Rekonstruktion und Vorhersage von nichtlinearen Wellenfeldern. Sie zeigten, dass die HOSM ein sehr effektives Verfahren ist, um komplexe Seegänge über lange Zeiträume und Distanzen akkurat und schnell zu simulieren. Clauss et al. (2014) wiesen nach, dass das Ausbreitungsverhalten von nichtlinearen Wellengruppen mit der HOSM für beliebige Wassertiefen sehr gut vorhergesagt werden kann. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird die HOSM für die Seegangsvorhersage verwendet, um eine hohe Genauigkeit der Vorhersage bei gleichzeitiger ausreichender Schnelligkeit der Simulation zu gewährleisten.

Die HOSM wurde unabhängig von West et al. (1987) und Dommermuth & Yue (1987) entwickelt. Für das hier präsentierte Vorhersagesystem wird die Prozedur von West et al. (1987) verwendet. Die Annahme, dass das Wasser inkompressibel, reibungsfrei und rotationsfrei ist, ermöglicht die Beschreibung des Flüssigkeitsraumes (Geschwindigkeits- und Druckfeld) als Gradient eines Potentials, welches der Laplace-Gleichung genügt. Um diese zu lösen, müssen zusätzlich die Randbedingungen des Flüssigkeitsraumes erfüllt werden.

Im Gegensatz zu den meisten gängigen potentialtheoretischen Verfahren wird das Randwertproblem des freien Flüssigkeitsraums bei der HOSM auf die unbekannte freie Flüssigkeitsoberfläche transformiert. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass nur die unbekannte Oberfläche und nicht der gesamte Flüssigkeitsraum diskretisiert werden muss, wodurch der Rechenaufwand signifikant verringert ist. Ein weiterer Grund für die Schnelligkeit dieser

numerischen Methode ist die Annahme von periodischen Randbedingungen. Dadurch kann das Potential und deren Ableitungen im Fourier-Raum sehr schnell berechnet werden. Das unbekannte Potential an der freien Oberfläche wird dabei mittels Taylorreihenentwicklung und Perturbationsansatz im Ortsbereich approximiert, wodurch Lösungen höherer Ordnung sukzessiv aus den Lösungen niedrigerer Ordnung ermittelt werden können. Die zeitliche Entwicklung des Seegangs erfolgt über ein numerisches Zeitschrittverfahren. So lässt sich die Wellenauslenkung an beliebigen Orten des Wellenfeldes, insbesondere an der Position der Strukturen, als Funktion der Zeit berechnen. Innerhalb des Projektes ist die HOSM bis zur 4. Ordnung entwickelt worden und als Zeitschrittverfahren wird die Runge-Kutta-Gill Methode 4. Ordnung verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der numerischen Prozedur findet sich bei West et al. (1987) sowie bei Clauss et al. (2014).

### **Bewegungsvorhersage**

Im letzten Teilschritt des deterministischen Prognoseverfahrens wird an der Position der Offshore-Strukturen der berechnete Seegang als Grundlage für die Bewegungsvorhersage verwendet. Auch für diesen Teilschritt ist eine sehr kurze Berechnungszeit maßgeblich, um die Bewegungsvorhersage in einer ausreichenden Zeitspanne im Voraus zu erhalten. Die lineare Betrachtung ist im Fall der Bewegungsvorhersage nicht nur die schnellste Methode, sondern im Hinblick auf den Anwendungsbereich (moderate Seegänge) auch ausreichend genau.

Die Bewegungen der beteiligten Offshore-Strukturen werden mittels Impulsantwortfunktionen (IAF) bestimmt – diese beschreiben die direkte Kausalität von Ursache (Seegangserregung) und Wirkung (Strukturantwort) im Zeitbereich unter Berücksichtigung der „memory effects“ (Cummins (1962)). Jacobsen (2005) modifizierte und erweiterte diese Methode (F2T+) auf Grundlage der FORTRAN Routine F2T von J.N. Newman, um das Seegangsverhalten von Mehrkörpersystemen im Zeitbereich zu untersuchen. Hierfür sind in einem ersten Schritt die Impulsantwortfunktionen (IAF) aus den Übertragungsfunktionen (RAO) zu ermitteln. Diese stellen die Reaktion des Systems auf eine impulsartige Einheitskraft dar. Die Bewegungen der Strukturen in beliebigen Wellensequenzen ergeben sich sukzessive aus deren Faltung mit der Impulsantwortfunktion. Damit können beliebige Strukturen und Mehrkörpersysteme unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Kopplung direkt im Zeitbereich analysiert werden, ohne den Umweg über Zeitschrittverfahren gehen zu müssen. Mit Hilfe des zuvor ermittelten Systemverhaltens in Form von RAOs – abhängig von Seegangsrichtung, Ladezustand, etc. – kann die IAF einmalig im Vorfeld bestimmt werden (unter der Voraussetzung standardisierter Vorhersagezeitlängen). Dadurch wird die Anzahl an Operationen für die Vorhersage der Strukturbewegung



signifikant reduziert, was den Vorhersageprozess an sich beschleunigt. Die dazu benötigten Bewegungsübertragungsfunktionen werden mit einem hybriden Ansatz ermittelt. Das auf linearer Potentialtheorie basierende Programm WAMIT wird hinsichtlich seiner bekannten Einsatzgrenzen modifiziert, indem die Dämpfungsterme für die Roll- und Stampfbewegungen aufgrund der nichtlinearen viskosen Effekte mittels Modellversuchen angepasst werden.

Das Verfahren vereint die Vorteile von Frequenzbereichsanalysen (sehr schnelle Berechnung im Vergleich zu Zeitschrittverfahren) mit der Möglichkeit deterministischer Untersuchungen eines Systems in beliebigen Seegängen. Die Implementierung der Impulsantwortfunktionen ermöglicht eine sehr schnelle Ermittlung der Strukturbewegungen in allen Freiheitsgraden mit sehr geringem Rechenaufwand und stellt somit eine elegante Analysemöglichkeit dar.

### Systemvalidierung

Innerhalb des Forschungsprojektes werden sowohl die drei unabhängigen Systemkomponenten als auch das Gesamtprogrammssystem experimentell validiert. Dies beinhaltet sowohl Versuche im Seegangsbecken als auch Untersuchungen mittels realer Seegangsdaten.

- Das optimierte WaMoS II – System mit VV-Antenne wird anhand von bereits vorhandenen Datensätzen des etablierten Systems mit HH-Antenne validiert, um Rückschlüsse über den Verbesserungsgrad und die optimierten Einsatzgrenzen zu erhalten.
- Die Seegangs- und Bewegungsvorhersage wird in der kontrollierten Umgebung eines Seegangsbeckens anhand eines Fallbeispiels intensiv untersucht. Dabei werden sowohl die beiden Einzelkomponenten als auch deren Zusammenspiel validiert, um Aussagen über deren Genauigkeit und Einsatzgrenzen zu erhalten.

Schließlich wird die Seegangsvorhersage auf Basis von WaMoS II Datensätzen des optimierten Systems in realen Seegangsbedingungen untersucht. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse exemplarisch präsentiert.

### Seegangserfassung

Für die Validierung des neuen Systems ist die Forschungsplattform FINO1 ausgewählt worden, da neben dem älteren HH-System das neue VV-System sowie eine Boje zur Seegangserfassung installiert sind.

Als ein Datensatz für die Validationsszenarien wurde der 8. September 2014 mit 4 Gezeitenzyklen gewählt (siehe Abb.2). In diesem Zeitraum steigt die signifikante Wellenhöhe von 0,5 auf über 2m an, wobei gleichzeitig auch entsprechend die Hauptwellenperiode und -richtung variieren.

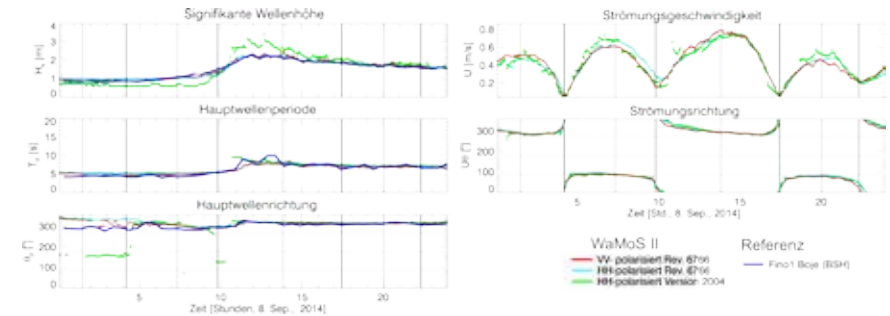


Abbildung 2: Zeitserien der Hauptwellenparameter (links) und Strömung während des Testzeitraums (rechts).

Zu Beginn des Validierungszeitraums (08.09.2014, 01:30:11 UTC) wurden mit  $TP < 5s$  und  $HS < 1m$  sehr kurze und niedrige Wellen gemessen. Die zugehörigen Frequenzrichtungsspektren sind in Abbildung 3 dargestellt. Da die Energie kurzer Wellen bei der HH-Systemversion 2004 (Abb.3, links) nicht erfasst werden konnte, liegt die gemessene signifikante Wellenhöhe unter der der Boje. Die optimierte WaMoS II-Analysesoftware ermöglicht die Erfassung von kürzerem und niedrigerem Seegang (Abb.3, mittig), jedoch bleibt das HH-System auf Grund der technisch bedingten räumlichen Auflösung auf Wellen mit  $f < 0,22Hz$  ( $TP > 4,5s$ ) begrenzt. Insgesamt konnte die Qualität des Spektrums hinsichtlich Aliasing und Hintergrundrauschen erheblich verbessert werden. Die Nutzung des VV-Radars (höhere räumliche Auflösung) mit optimierter Software (Abb.3, rechts) ermöglicht die Erfassung von Wellen im Bereich von  $0,22 < f < 0,27Hz$  ( $TP = 3,7-4,5s$ ). Dadurch konnten die Referenzparameter (Boje) sehr gut reproduziert werden.

Als Grundlage für die Seegangsvorhersage zeigt Abbildung 4 einen Ausschnitt der Oberflächenauslenkung – links den Radarbildausschnitt, rechts die entsprechende, invertierte Oberflächenauslenkungskarte. In einem ersten Schritt werden radiale Schnitte (1D) extrahiert. Die Richtung des Schnittes liegt in Hauptwellenrichtung (vertikale weiße Linien), so dass die Wellen betrachtet werden, die sich auf die Radarantenne zubewegen. In einem zweiten Schritt werden hieraus die 2D-Oberflächenauslenkungskarten für die Vorhersage ermittelt.

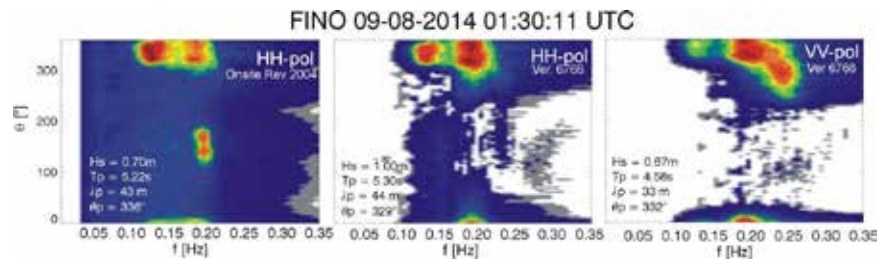


Abbildung 3: WaMoS II Frequenzrichtungsspektren. Links: HH-polarisiert Version 2004, Mitte: HH-polarisiert mit optimierter Software (Vers. 6766), Rechts: VV-polarisiert mit optimierter Software (Vers. 6766).

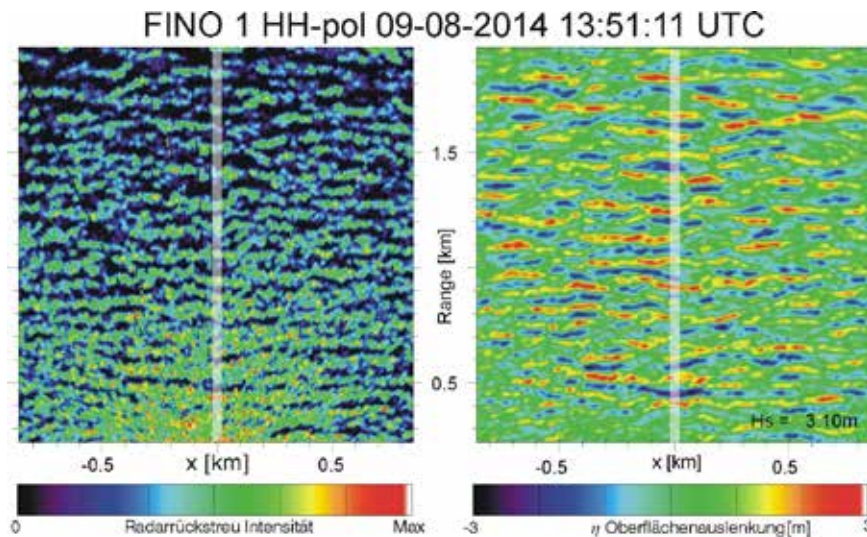


Abbildung 4: Links: In Wellenlaufrichtung orientierter Radarbildauschnitt. Rechts: Entsprechende Oberflächenauslenkungskarten

### Kombinierte Seegangs- und Bewegungsvorhersage

Als Validierungsszenario für die Seegangs- und Bewegungsvorhersage wird eine Offshore-Kranoperation mit einem Kranhalbtaucher und einer Transportbarge analysiert (Hauptabmessungen siehe Tabelle 1). Abbildung 5 zeigt das Mehrkörperszenario im Maßstab 1:75 während der Modellversuche im Seegangsbecken der TU Berlin. Die Barge ist leeseitig des Halbtauchers mit einem Abstand von 15m positioniert. Beide Modelle sind in einer elastischen Aufhängung verankert, welche die Längs- (Halbtaucher) und Querbewegung (Barge) limitiert, die relevanten Körperbewegungen (Tauchen und Stampfen für den Halbtaucher, Tauchen und Rollen für die Barge) jedoch ungestört zulässt. Die Strukturbewegungen werden mit einem optischen Trackingsystem mit Hilfe von IR-LEDs kontaktfrei aufgezeichnet. Alle Daten (Seegang und Strukturbewegungen) werden für die Großausführung angegeben.



Abbildung 5: Versuchsaufbau der Offshore-Kranoperation im Seegangsbecken der TU Berlin, M 1:75.

Als Beispielseegang wird ein irregulärer Seegang (JONSWAP Spektrum,  $H_s=8.5$ m,  $T_p=13$ s und  $\gamma=3$ ) präsentiert. Die ausgewählten Seegangparameter, insbesondere die signifikante Wellenhöhe, stellen ein extremes Szenario (hinsichtlich einer realen Kranoperation) dar, zeigen jedoch das Potential bzw. die Grenzen der Seegangs- und Bewegungsvorhersage.

Tabelle 1: Hauptparameter der untersuchten Offshore-Strukturen.

PARAMETER	KRANHALBTAUCHER	BARGE
Länge	154,1 m	164,6 m
Breite	87,8 m	74,6 m
Tiefgang	27 m	4,9 m
Verdrängung	182.380 m <sup>3</sup>	59.738 m <sup>3</sup>

Im Rahmen der Versuchsreihe ist die Ausbreitung des Seegangs in einem ersten Versuch ungestört, d.h. ohne Strukturen, gemessen worden – anschließend wurden die Versuche mit dem Mehrkörperszenario an der Ziellokation wiederholt.

Um die Radarinformationen für die Seegangsvorhersage im Modellversuch substituieren zu können werden zahlreiche irreguläre Seegänge generiert. Die ungestört gemessenen Seegänge werden zunächst verwendet, um die nichtlineare Seegangsvorhersage mittels HOSM zu validieren. Nachfolgend wird der für die Ziellokation vorhergesagte Seegang als Input für die Bewegungsvorhersage verwendet und mit den Modellversuchen validiert.

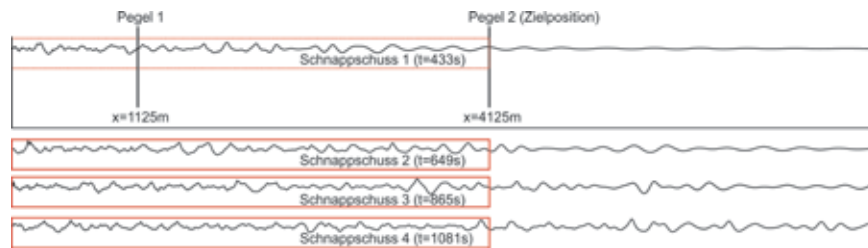


Abbildung 6: Darstellung des semi-experimentellen Ansatzes (M 1:75).

Die HOSM lässt sich im Seegangsbecken nur sehr zeitintensiv validieren, da als Input ein Wellenbild zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigt wird. Dies ist zwar zwingend erforderlich für die reale Anwendung auf Basis von Radarwellenbildern, führt aber dazu, dass die zu untersuchenden Seegänge erst aufwändig im Ortsbereich (sukzessive Messungen entlang des Kanals) gemessen werden müssten. Aus diesem Grund wird ein semi-experimenteller Ansatz gewählt, um die Anzahl der benötigten Messungen so gering wie möglich zu halten. Für die Ermittlung der benötigten Wellenbilder wird der etablierte und validierte nichtlineare numerische Wellenkanal WAVETUB (Clauss und Steinhagen (2001)) verwendet, da das Seegangsbecken der TUB damit exakt modelliert werden kann (inklusive Wellenmaschine), wodurch identische Randbedingungen an der Wellenklappe (einheitliche Startbedingungen für die Wellenentwicklung) vorherrschen. Der somit generierte Eingangsschnapsschuss (WAVETUB) sowie die HOSM Simulationen werden im Zeitbereich punktuell im Seegangsbecken validiert, wodurch der Versuchsaufwand signifikant reduziert ist.

Abbildung 6 veranschaulicht den semi-experimentellen Ansatz. Der Längsschnitt des Seegangsbeckens ist oben abgebildet, mit den beiden Kontrollmesspunkten nahe der Wellenklappe (P1) und an der Zielposition (P2) der Offshore-Operation. Die Prozedur verläuft wie folgt:

- Der irreguläre Seegang wird mit WAVETUB reproduziert und am Kontrollmesspunkt P1 im Zeitbereich validiert.
- Vier aufeinanderfolgende Schnapsschüsse der Oberflächenauslenkung (alle 216s - rote Rechtecke in Abbildung 6) werden als Eingangssignal für die Seegangsvorhersage verwendet.
- Der Vorhersagezeitraum beträgt 260s. Es ergeben sich vier aufeinanderfolgende, sich überlappende Teilseegänge für die Ziellokation (vgl. Abb.6), welche am Kontrollmesspunkt P2 validiert werden.

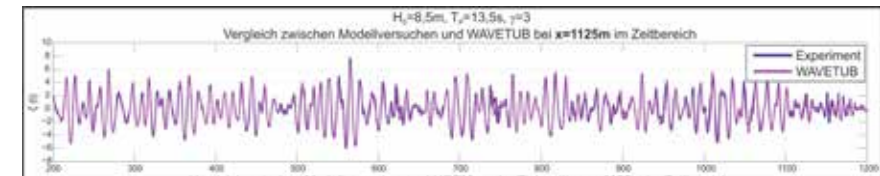


Abbildung 7: Validierung des numerischen Eingangssignals (WAVETUB) für die Seegangsvorhersage an Pegel 1.

Abbildung 7 zeigt die Validierung des numerisch erzeugten Eingangssignals (WAVETUB) für die nichtlineare Seegangsvorhersage im Zeitbereich an der Position nahe der Wellenklappe (P1). Die sehr gute Übereinstimmung zu Beginn der Seegangsentwicklung zeigt, dass die Seegangsgenerierung mit ausreichender Genauigkeit reproduziert wird, was die Anwendbarkeit dieser semi-experimentellen Methode bestätigt.

Abbildung 8 präsentiert die Ergebnisse der Seegangsvorhersage an der Zielposition (P2) im Vergleich zu den Modellversuchen. Der Vorhersagehorizont (260s), welcher direkt von den vier sequentiellen Eingangsschnapsschüssen abhängt (vgl. Abb.6), ist zusätzlich für die vier Vorhersagesequenzen gekennzeichnet. Die Seegangsvorhersage an der Ziellokation weist eine sehr gute Übereinstimmung zu den Modellversuchen auf, insbesondere im Hinblick auf die Steilheit des untersuchten Seegangs. Des Weiteren ist die Vorhersagegenauigkeit der einzelnen Vorhersagesequenzen innerhalb der Überlappungsbereiche sehr gut, was eine kontinuierliche Vorhersageprozedur ermöglicht.

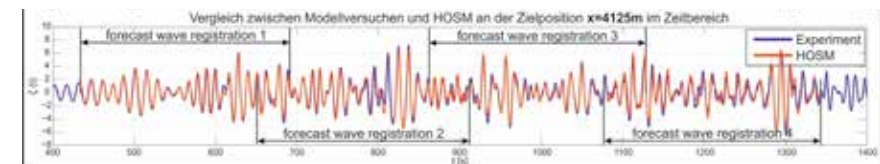


Abbildung 8: Validierung des vorhergesagten Seegangs (HOSM) für die Ziellokation (Pegel 2).



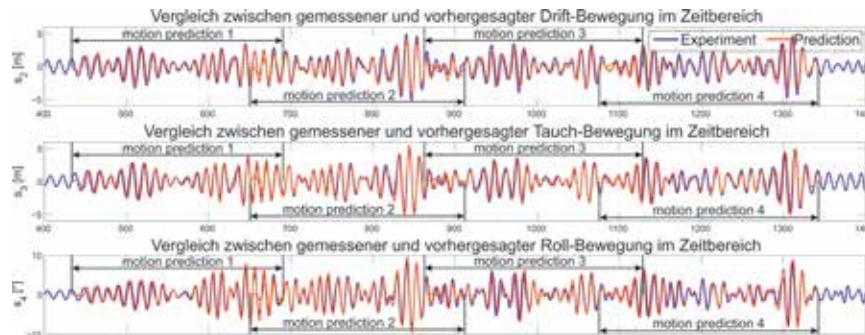


Abbildung 9: Bewegungsvorhersage für die Transportbarge im Mehrkörpersystem an der Zielposition (P2) – Darstellung der vorhergesagten Quer-, Tauch- und Rollbewegung.

Als nächster Schritt wird die Seegangsvorhersage an Pegel 2 (basierend auf den vier Vorhersagesegmenten) als Input für die Bewegungsvorhersage verwendet. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Bewegungsvorhersage für die Quer- (oben), Tauch- (mittig) und Rollbewegung (unten) der Transportbarge – rote Graphen stehen für die numerischen Berechnungen, blaue für die experimentelle Validierung. Analog zu Abbildung 8 sind die Vorhersagehorizonte zusätzlich dargestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass die vorhergesagten Bewegungen gut mit den gemessenen übereinstimmen. Kleine Abweichungen in den Tauch- und Rollbewegungen sind auf leicht überschätzte RAO-Amplituden bestimmter Frequenzbereiche zurückzuführen. Da der ausgewählte Seegang eine Art Grenzfall für die lineare Faltung darstellt, kann für moderate Seegänge sogar von noch besserer Vorhersagegenauigkeit ausgegangen werden.

### Zusammenfassung

Das Verbundvorhaben PrOWOO adressiert die Entwicklung eines deterministischen Systems zur Seegangs- und Bewegungsvorhersage, das für operative Entscheidungen genutzt werden kann. Das System setzt sich aus drei wesentlichen Komponenten zusammen: Seegangserfassung, nichtlinearer Seegangsvorhersage und Bewegungsvorhersage.

Die etablierte WaMoS II - Seegangserfassung über das schiffseigene Radarsystem konnte durch Optimierung der Hard- und Software – insbesondere für niedrige, kurze Wellen im Bereich von  $0,3 < HS < 1,0\text{m}$  und  $2,5 < TP < 6,0\text{s}$  – signifikant verbessert werden.

Auf Grundlage des Radarbasierten Wellenfeldes lässt sich mit der schnellen Higher Order Spectral Method (HOSM) die Wasserspiegelauslenkung an be-

liebigen Punkten mit hoher Genauigkeit berechnen. Versuche im Seegangsbecken zeigen, dass die HOSM bestens geeignet ist, die Entwicklung nichtlinearer Wellensequenzen über weite Entfernungen zeitnah vorherzusagen.

Die Bewegungsvorhersage auf Grundlage der vorhergesagten Seegangssequenzen wird mittels Impulsantwortfunktionen berechnet. Damit können beliebige Strukturen und Mehrkörpersysteme unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Kopplung im Zeitbereich analysiert werden, ohne den Umweg über Zeitschrittverfahren gehen zu müssen. Ähnlich der Seegangsvorhersage sind die Ergebnisse der Bewegungsvorhersage sehr gut – die Anwendbarkeit des entwickelten Entscheidungshilfesystems konnte damit bewiesen werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die vorgestellten Methoden die kontinuierliche deterministische Vorhersage des eintreffenden Seegangs sowie der zu erwartenden Strukturbewegungen ermöglichen. Der Vorhersagehorizont ist dabei abhängig von der Schnappschusslänge des Radars sowie den vorherrschenden Seegangparametern. Im präsentierten Fall stellt der erzielte Vorhersagehorizont mit 260s ein konservatives Validierungsszenario dar, da der untersuchte Seegang durch eine hohe Peakperiode TP, d.h. einer langen dominanten Wellenlänge, gekennzeichnet ist. Die damit verbundene hohe Gruppengeschwindigkeit bedeutet ein schnelles Erreichen der Ziellokation im Vergleich zu Seegängen mit einer kürzeren, dominanten Wellenlänge. Die ausgewählte Schnappschusslänge liegt innerhalb der Spezifikationen des WaMoS II Systems, wodurch kürzere Seegänge deutlich höhere Vorhersagehorizonte haben würden. Die Berechnungszeit für die Vorhersage (Generierung und Aufbereitung der Radarbilder, nichtlineare Simulation der Wellenausbreitung und Bewegungsvorhersage) ist in dieser Betrachtung noch nicht enthalten. Bisherige Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass eine effektive Vorhersage von mindestens 90s realistisch ist.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung des Projektes sowie für die hervorragende fachliche und administrative Betreuung durch den Projektträger Jülich (PtJ), namentlich bei Herrn Dipl.-Ing. Detlef Lehmann und Herrn Dipl.-Betriebswirt Stephan Herrmann.



## Literatur

- Blondel, E., Ducrozet, G., Bonnefoy, F., and Ferrant, P. (2008). Deterministic Reconstruction and Prediction of a Non-linear Wave Field using Probe Data. In OMAE 2008 - 27th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal.
- Clauss, G. F. and Steinhagen, U. (2001). Generation and Numerical Simulation of Predetermined Nonlinear Wave Sequences in Random Seaways. In Proceedings of OMAE 2001, 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.
- Clauss, G., Kosleck, S., Testa, D., and Stück, R. (2007). Forecast of Critical Wave Groups from Surface Elevation Snapshots. In OMAE 2007 - 26th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, USA.
- Clauss, G., Kosleck, S., and Testa, D. (2009a). CASH- Decision Support System for Computer Aided Ship Handling. In Jahrbuch der Schiffbau-technischen Gesellschaft, Hamburg, Germany.
- Clauss, G., Kosleck, S., and Testa, D. (2009b). Critical Situation of Vessel Operations in Short Crested Seas - Forecast and Decision Support System. In OMAE 2009 - 28th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, USA.
- Clauss, G., Klein, M., Dudek, M., and Onorato, M. (2014). Application of Higher Order Spectral Method for Deterministic Wave Forecast. In OMAE 2014 - 33rd Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, USA.
- Cummins, W. (1962). The Impulse Response Function and Ship Motions. Schiffstechnik, Band 9(Heft 47):101–109.
- Dommermuth, D. G. and Yue, D. K. P. (1987). A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. Journal of Fluid Mechanics, 184:267–288.
- Jacobsen, K. (2005). Hydrodynamisch gekoppelte Mehrkörpersysteme im Seegang – Bewegungssimulationen im Frequenz- und Zeitbereich. Dissertation, Technische Universität Berlin (D 83).
- Kosleck, S. (2013). Prediction of Wave-Structure Interaction by Advanced Wave Field Forecast. PhD thesis, Dissertation, Technische Universität Berlin (D83).
- Naaijen, P. and Huijsmans, R. (2008). Real Time Wave Forecasting for Real Time Ship Motion Predictions. In OMAE 2008 - 27th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal.
- Naaijen, P. and Huijsmans, R. (2010). Real Time Prediction of Second Order Wave Drift Forces for Wave Force Feed Forward in DP. In OMAE 2010 - 29th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Shanghai, China.
- Naaijen, P., van Dijk, R., Huijsmans, R., and El-Mouhandiz, A. A. (2009). Real Time Estimation of Ship Motions in Short Crested Seas. In OMAE 2009 - 28th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, USA.
- Payer, H. G. and Rathje, H. (2004). Shipboard Routing Assistance - Decision Making Support for Operation of Container Ships in Heavy Seas. In SNAME Annual Meeting.
- West, B. J., Brueckner, K. A., Janda, R. S., Milder, D. M., and Milton, R. L. (1987). A new numerical method for surface hydrodynamics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 92(C11):11803–11824.
- Wu, G. (2004). Direct simulation and deterministic prediction of large scale nonlinear ocean wave-field. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Ocean Engineering.

## UnderwaterINSPECT – Technologien zur zuverlässigen und effizienten Prüfung von Unterwasser-Tragstrukturen an Offshore-Windenergieanlagen

Förderkennzeichen: 03SX345

Dr. Herbert Friedmann (Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG)  
Jens Eppler (Baltic Taucher GmbH)  
Dr. Martin Kohlmeier (Fraunhofer IWES)  
Dr. Bianca Weihnacht (Fraunhofer IKTS)  
Dr. Gerlinde Winkel (Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt MV)

### Ziele und Projektdurchführung

Besonders die Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, OWEA, sind wegen des Angriffs von Wind und Wellen und durch die ständige Anregung von der Windenergieanlage selbst dynamisch hoch beansprucht. Dabei werden mehr oder weniger zyklische Lasten von stochastischen komplex überlagert. Das hat Auswirkungen sowohl auf die globale Standfestigkeit des Fundaments als auch auf die Entstehung von lokalen Schweißnahttrissen an der Gründungsstruktur. Beides kann zu einem Bauteilversagen führen. Aus diesem Grund schreibt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH, 2007 vor, dass bei OWEA „Tragstruktur (Turm, Unterwasserstruktur, Gründung) [auf] Korrosion, Risse, Vorspannung der Schraubverbindungen, unzulässige Kolke [und] Lage“ zu prüfen sind [1], Teil B, 6.5.4, S. 34, und jede 10. Anlage mit einem integrierten Messsystem ausgerüstet werden muss [1], Teil B, 3.2.3.3, S. 17. Allerdings gab es zum Zeitpunkt der Antragstellung weder ein geeignetes integriertes Messsystem zur Fundamentüberwachung noch Möglichkeiten, Schweißnähte anders als durch Taucher untersuchen zu lassen.

Das Verbundprojekt UnderwaterINSPECT hatte sich deshalb zum Ziel gesetzt, Demonstratoren für

- ein Monitoring-Gerät nebst Signalanalysetechniken zur kontinuierlichen Überwachung der globalen Standfestigkeit der Offshore-Gründung und
- eine Technologie zur halbautomatischen Prüfung und Überwachung von lokalen Schweißnähten

zu entwickeln [2].

Zu diesem Zweck fand sich das Konsortium im Verbundvorhaben UnderwaterINSPECT zusammen. Das Projekt stützt sich auf fünf Partner, die in ihren Teilvorhaben die nachfolgend genannten Aufgaben bearbeiteten:

- BALTIC Taucherei- und Bergungsbetrieb GmbH: Anforderungen für die Handhabung der Geräte durch Taucher, marine Systemerprobung, Versuch Rohrknotten
- Fraunhofer IKTS: Schweißnahtprüfung für die Überwachung von Gründungsstrukturen, Systementwicklung der Messmanschette, Signalanalyse, Versuch Rohrknotten
- Fraunhofer IWES: Boden-Struktur-Wechselwirkung an Offshore-Gründungen, Versuchsdurchführung Monopile und Langzeitversuche an geschweißten Platten in mariner Umgebung
- SLV M-V: Referenzobjekte für Schweißnahtsrisse, Versuch Rohrknotten
- Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG: Standfestigkeit von Offshore-Gründungen, Monopileversuch, Signalanalyse, Systementwicklung für Überwachung der Standfestigkeit, Projektkoordination

Ergänzt wurde dieses Konsortium durch EnBW Energie Baden-Württemberg AG, den Betreiber des ersten kommerziellen deutschen Offshore-Windparks Baltic I. Die Firma war als assoziierter Partner beteiligt und stellte dankenswerterweise Messmöglichkeiten auf einer OWEA bereit.

Um Fragestellungen aus der industriellen Praxis ins Projekt einzubinden und die potenziellen Endanwender über die Entwicklungen im Projekt zu informieren, wurde ein projektbegleitender Industrieausschuss mit ca. 20 Teilnehmern aus Industrie, Genehmigungsbehörden und Forschung ins Leben gerufen.

In UnderwaterINSPECT spielten Versuche auf drei Ebenen eine entscheidende Rolle für die Entwicklung, den Test und vor allem für die Praxistauglichkeit der neu zu entwickelnden Methoden und Technologien:

1. Laborversuche bei FhG IKTS, SLV und Wölfel zur Entwicklung von gezielten Fehlern, Methoden, Sensorik, Elektronik und Signalanalysetechniken und zur Ertüchtigung der Geräte für den Einsatz unter Wasser
2. Drei Großversuche im Technikumsmaßstab:
  - Mit dem Versuchsobjekt Monopile im Maßstab 1:10 in der mit Sand und

Wasser gefüllten Grundbauversuchsgrube im Testzentrum Tragstrukturen Hannover, TTH, der Leibniz Universität Hannover wurden dynamische Messdaten von einer auf einem großskaligen Monopfahlmodell gegründeten simulierten „Windenergieanlage“ gewonnen. Diese Messdaten lieferten die Grundlage für die Entwicklung einer automatisierten Signalanalyse, die Schäden frühzeitig erkennen, bewerten und gegebenenfalls vor ihnen warnen soll. Die Betriebslasten aus der „Windenergieanlage“ und die normalen Anregungen durch Wind und Wellen wurden mit einem elektrodynamischen Shaker realisiert, Extremlasten, die zu einer Schiefstellung des Pfahls führen können, wurden durch eine Hydraulik eingebracht. Der Versuch wurde von FhG IWES und Wölfel durchgeführt.

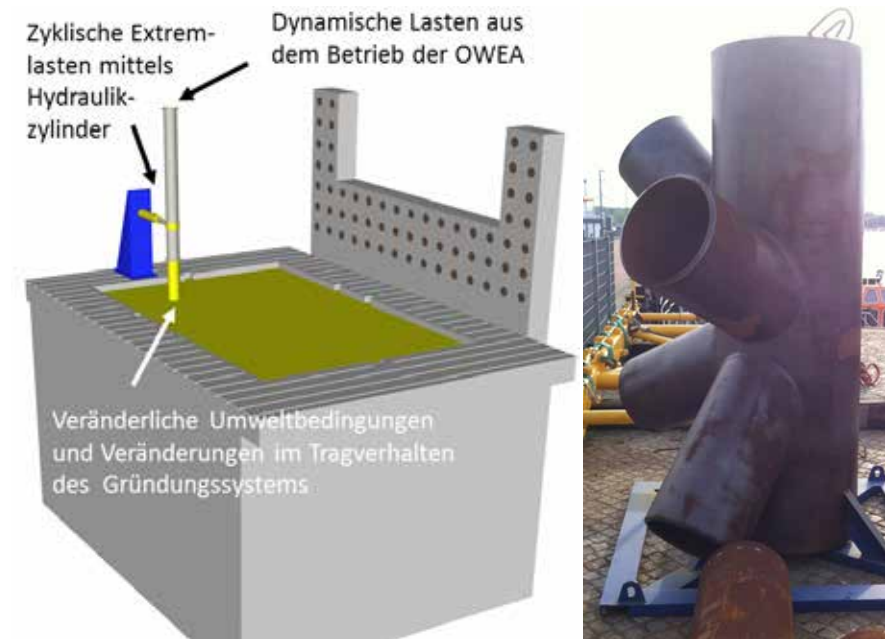


Abbildung 1: Grundbauversuchsgrube im TTH mit Monopileversuch (links); Versuch Rohrknotten für Tests der Manschette im Hafen von Rostock (rechts)

- Das Versuchsobjekt **Rohrknotten** diente der Erprobung einer Messmanschette, mit der Schweißnahtfehler detektiert werden können. Krönender Abschluss war ein Versuch im Hafenbecken.
- Die Versuchsobjekte **geschweißte Platten** dienten dazu, die Auswirkungen von Bewuchs auf die Detektionsmöglichkeit von Schweißnahtsrisse zu untersuchen. Auch in diesen Fällen spielte die PoD an Objekten, die von Bewuchs befreit wurden, eine Rolle. Beteiligt waren FhG IWES und IKTS.

### 3. Zwei Versuche unter **realen Bedingungen in mariner Umgebung**:

- Der **Rohrknoten** wurde mit der Messmanschette von Tauchern instrumentiert. Es wurden Messungen unter realistischen Einsatzbedingungen im Offshore-Windpark Baltic I durchgeführt. Dabei wurde neben der Probability of Detection vor allem auch die Handhabung der Manschette durch Taucher geprüft. An diesem Versuch waren SLV, Baltic Taucher und Fraunhofer IKTS beteiligt.
- Als Fortsetzung des Versuchs **Monopile** wurde auf einer OWEA in Baltic I von Wölfel in Zusammenarbeit mit EnBW und Baltic Taucher eine Anlage mit einem **SHM-System zur Fundamentüberwachung** instrumentiert. Die Messungen wurden begonnen und werden über das Projektende hinaus weiter geführt.

In UnterwaterINSPECT ist es gelungen, für zwei Aufgabenstellungen, nämlich die lokale Überprüfung von Schweißnähten und das globale Monitoring der Standfestigkeit von OWEA Demonstratoren zu entwickeln, die in naher Zukunft helfen können, die vielfältigen Überwachungsaufgaben an Offshore-Gründungen zu erleichtern.

### Experimente zur Überwachung der Standfestigkeit

Die Bewertung und Optimierung von Methoden zum Structural Health Monitoring für Offshore-Windenergieanlagen erfordern eine experimentelle Versuchsumgebung, die es in Bezug auf ihren Maßstab zulässt, reale Sensorik sinnvoll auf der Struktur applizieren zu können. Darüber hinaus sollten die charakteristischen strukturellen und strukturdynamischen Eigenschaften in geeigneter Weise skaliert sein. Die drei folgenden Abschnitte sollen einen Einblick in die bodenmechanischen Eigenschaften des Sandes in der Grundbauversuchsgrube geben, den Aufbau des durchgeführten Versuchs darstellen und exemplarisch einige Versuchsergebnisse im Vergleich mit begleitenden Finite-Elemente-Berechnungen zur Untersuchung der Monopile-Gründung vorstellen.

### Bodenkenngrößen in der Grundbauversuchsgrube

Für die Abschätzung von Tragfähigkeiten der in der Grundbauversuchsgrube zu installierenden Gründungsstruktur sind sowohl eine genaue Kenntnis der charakteristischen Bodeneigenschaften als auch die Ermittlung der erzielten Lagerungsdichte des eingebauten Sandkörpers von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde der Boden vor, während und nach dem Ein-

bau eingehend untersucht. Zu den verwendeten Untersuchungen zählten die Drucksondierung (cone penetration tests, CPT), die leichte Rammsondierung (dynamic probing light, DPL) sowie die Dichtebestimmung mittels Ausstechzylindern in allen Schichten und während des gesamten lagenweisen Einbauvorgangs. Es zeigte sich, dass die angestrebte mitteldichte bis dichte Lagerung erreicht werden konnte. Der sich ergebende Steifemodul  $E_s$  wurde für sechs unterschiedliche Positionen ermittelt und ist in Abbildung 2 über die Tiefe dargestellt. Die Messwerte an sechs verschiedenen Positionen in der Grundbauversuchsgrube zeigen einen relativ homogenen und über die Tiefe nichtlinear zunehmenden Verlauf. Zur Anwendung im numerischen Modell wird der Steifemodul durch die angegebene Funktion dritten Grades angenähert.

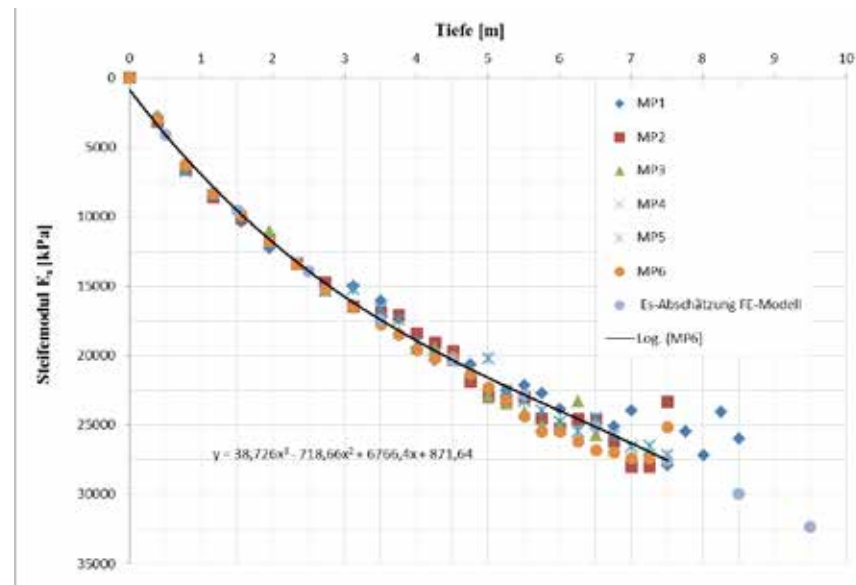


Abbildung 2: Steifemodul  $E_s$  ermittelt auf Basis von CPT-Ergebnissen und Dichtebestimmung mittels Ausstechzylinder an sechs Messpunkten (MP) und über die Tiefe der Grundbauversuchsgrube des TTH

### Versuchsaufbau

Der Versuchsentwurf basierte zunächst auf Ergebnissen vereinfachter numerischer Untersuchungen an Balkenmodellen und wurde später mit Hilfe höher aufgelöster dreidimensionaler Modelle konkretisiert. Diese Modelle sind parametrisiert entwickelt worden, sodass sie gut für den Entwurf und die Planung der Versuchsdurchführung verwendet werden konnten. Nach dem Vorliegen erster experimenteller Ergebnisse können sie aber auch zur Vali-



dierung der eingesetzten Simulationsmethoden verwendet und für weitergehende Untersuchungen beispielsweise an Materialmodellen genutzt werden. Zunächst sind jedoch auf Basis dieser numerischen Simulationen die erforderlichen Lasteinleitungskonstruktionen ausgelegt und der Versuchsaufbau umgesetzt worden. Abbildung 3 links zeigt den sich ergebenden Gesamtaufbau in der Ansicht von oben auf den elektrodynamischen Shaker am Turmkopf. Der Turm ist über Ringflansch mit dem Pfahl verbunden und nimmt die Lasten aus dem Hydraulikzylinder mittels Rohrklemme auf. Des Weiteren ist der im Verlauf der Experimente mit verschiedenen Tiefen (30 cm, 60 cm, 80 cm) hergestellte Kolk, hier mit einer aktuellen Tiefe von etwa 70 cm zu sehen. In der im Bild rechts dargestellten Testphase des Versuchs wurden Extremlasten über den Hydraulikzylinder aufgebracht und unter quasistatischer, dreiecksförmiger Lastaufbringung untersucht. Nach dem Erreichen einer neuen Laststufe wurde der Turm jeweils mit sinusförmiger Belastung über mehrere Perioden beaufschlagt, sodass das vorhandene nichtlineare zyklische Last-Verformungsverhalten des Gründungssystems dokumentiert werden konnte.



Abbildung 3: Foto des Versuchsaufbaus mit den Lasteinleitungssystemen elektrodynamischer Shaker (links) und Hydraulikzylinder (rechts)

## Versuchsdurchführung mit Simulations- und Messdaten im Vergleich

Das Verhalten des Versuchssystems ist im FEM-Modell unter stufenweiser Laststeigerung prognostiziert worden und in Abbildung 4 dargestellt.

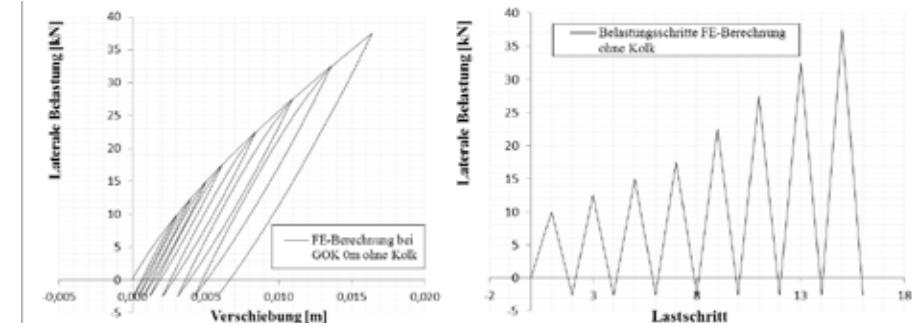


Abbildung 4: Prognose des Tragverhaltens des Monopiles; Finite-Elemente-Berechnungen zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens mit Darstellung des Verschiebungsverlaufs an der Geländeoberkante (links) und Darstellung der aufgetragenen Belastungsschritte in Höhe des Hydraulikzylinders (rechts)

Nach der Durchführung der Versuche unter Extremlast wurden die Simulationsergebnisse den Messdaten gegenübergestellt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Messergebnisse bei einer Mittellast von 40 kN. Das numerische Modell hat in der Entwurfsphase ausreichend genaue Ergebnisse geliefert, um den Versuchsablauf verlässlich zu planen. Die Kalibrierung der Eingangsparameter konnte auf Basis der Messdaten optimiert und das gesamte Simulationssystem und die Materialmodelle konnten validiert werden.

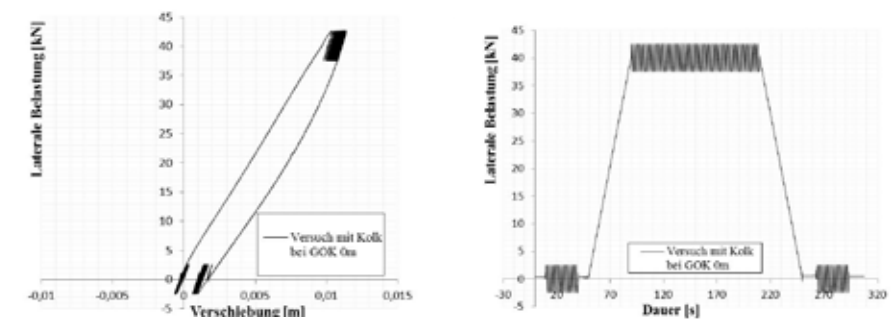


Abbildung 5: Monopile-Versuch mit rund 70 cm Kolk unter Extremlasten; gemessene Verschiebungen an der Geländeoberkante (links) während eines Be- und Entlastungsvorgangs mit ergänzenden zyklischen Belastungen (Amplitude von 2,5 kN) bei Mittellasten von 0 kN (je 15 Perioden) und 40 kN (60 Perioden)

## Ergebnisse für die Überwachung der Standfestigkeit

Für den Versuch wurde der Monopile auf 9 Ebenen über und unter der Bodenoberkannte mit Beschleunigungsaufnehmern, Dehnmessstreifen, Inklinometern und Temperatursensoren instrumentiert.

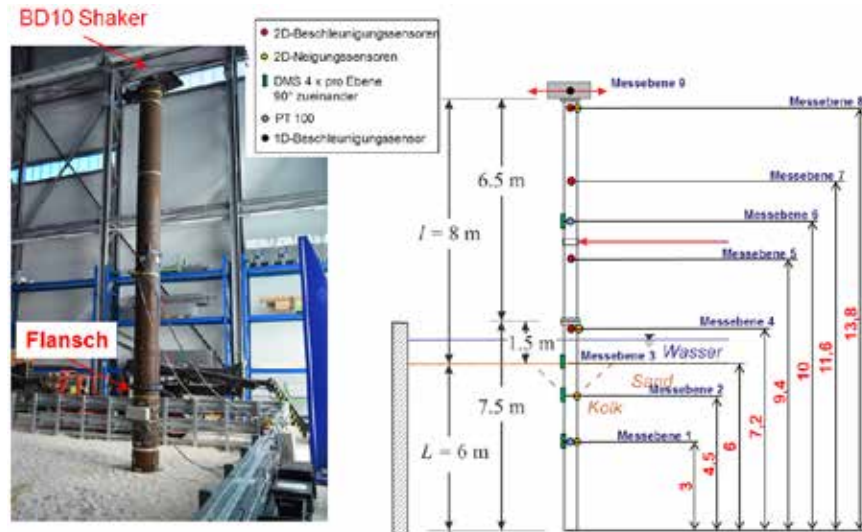


Abbildung 6: Monopileversuch im TTH; Monopile mit Shaker, der die OWEA bzw. die von ihr eingebrachten Betriebslasten simuliert (links); Instrumentierung des Monopile (rechts)

Mit der in Abbildung 6 dargestellten Anordnung wurde ein Testprogramm gefahren, bei dem sowohl Veränderungen der environmental and operational conditions, EOCs, als auch Schäden versuchstechnisch nachgestellt wurden. Das SHM-System stützt sich vornehmlich auf die Interpretation von Schwingungsdaten. Die Schwingungsanregung kommt einerseits durch Wind und Wellen und andererseits aus dem Betrieb der WEA. Diese Anregung durch Wind, Wellen und Betriebslasten wird im Versuch durch einen mechatronischen Shaker nachgebildet. Extreme Lasten wie z.B. Sturmereignisse, 50-Jahreswellen bzw. -böen etc., die u.U. zu einer Schiefstellung des Turms führen können, werden von der Hydraulik dargestellt. Da allein schon wegen der wechselnd steifen Einbindung in den Boden jede OWEA andere Randbedingungen und damit andere dynamische Eigenschaften hat, muss Health Monitoring mit einem selbstlernenden System betrieben werden, bei dem für jede Gründung die Eigenfrequenzen der Struktur als Referenz ermittelt werden. Deshalb wurden zunächst Messungen zur Referenzbildung durchgeführt. Im Anschluss daran wurden Messungen zur Bodendegradation und zur Schädigung des Turmes vorgenommen. Ein Steifigkeitsverlust der Tragstruktur wurde durch Lockerung von 2, 4, und 6 Schrauben am Flansch

erreicht. Zusatzmassen sollten den Einfluss von Bewuchs nachstellen. Dabei konnte der veränderte Strömungswiderstand oder Auftrieb bei Bewuchs mit Blasentang nicht simuliert werden. Die Annahme der Massenzunahme gilt nur für den Sonderfall, dass sich Bewuchs im Tidewasserbereich bildet und bei Niedrigwasser in der Luft hängt und somit als zusätzliche Masse den Pfahl belastet. Die Auskolkung konnte direkt durch Abgraben des Sandes nachgebildet werden [vgl. zu den Versuchsergebnissen 3, 4]. Zum Abschluss der Versuchsreihe wurde die Hydraulik angelegt, mit der Kräfte von bis zu 100 kN zur Verfügung standen. Damit sollte eine reversible Schiefstellung des Pfahles erreicht werden.

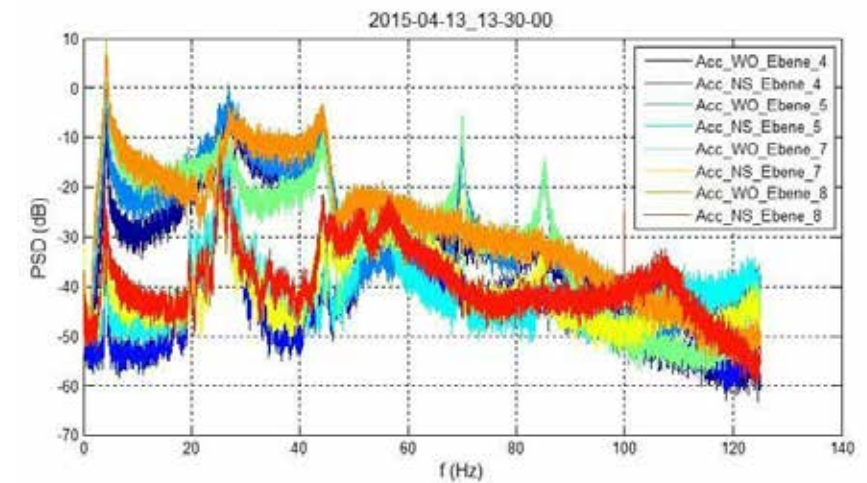


Abbildung 7: Leistungsdichtespektrum der Strukturantwort infolge von Schwingungsanregung durch Rauschen von 2 bis 50 Hz mit dem elektro-dynamischen Shaker und einer Kraft von 400 N

Für die automatische Datenanalyse wurden in UnderwaterINSPECT unterschiedliche Methoden verwendet. Die Algorithmen dafür wurden entweder im Projekt entwickelt oder auf das Verhalten von Gründungsstrukturen angepasst:

- Operational Modal Analysis, OMA
- Stochastic Subspace Fault Detection, SSFD
- Zeitreihenmodelle aus der ARMA-Familie
- Auswertung besonderer statistischer Kennzeichen
- Methoden der Mustererkennung

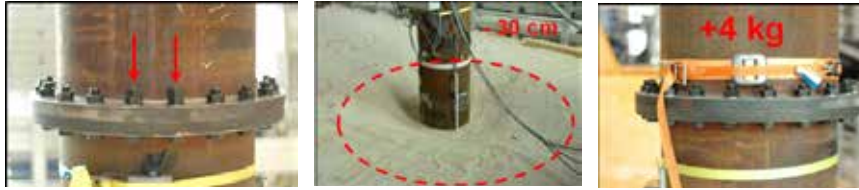


Abbildung 8: Strukturveränderungen von links nach rechts: 2 gelockerte Schrauben, Kolk von 30 cm Tiefe, Zusatzgewicht 4 kg

Bei der Ermittlung der Referenzwerte wurde mehrere Tage mit dem elektrodynamischen Shaker ein Rauschen in den Pfahl eingeleitet. Gestartet wurde mit 400 N, allerdings wurde dieser Wert wegen der Nachgiebigkeit des Bodens auf 250 N bis 350 N RMS reduziert. Dabei stellte sich, ganz im Gegensatz zu den Verhältnissen in marinen Sedimenten, eine Degradation des Bodens ein. Ob dieses versuchsspezifische Bodenverhalten auf das Einrütteln des Monopiles, auf fehlenden Wasserdruck, unvollständige Wassersättigung des Sediments, höhere Frequenzen oder andere Ursachen zurückzuführen ist, konnte noch nicht geklärt werden. Im weiteren Verlauf des Experiments konnten dann die charakteristischen Bodenverfestigungen gemessen werden

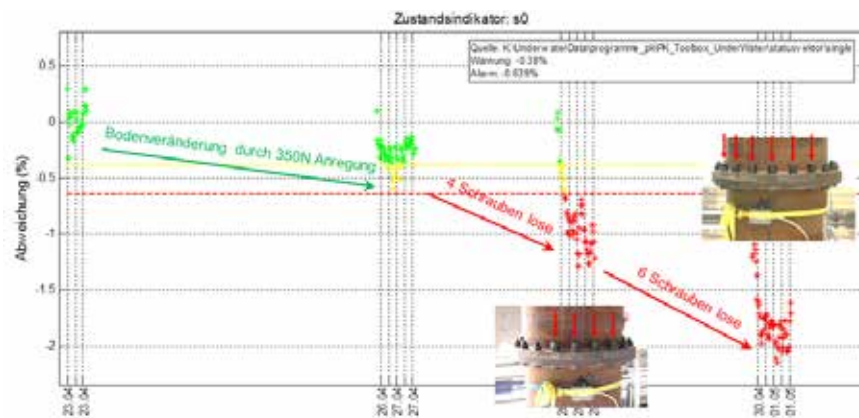


Abbildung 9: Veränderung eines Damage-Indikators durch Bodendegradation und Steifigkeitsverlust des Pfahls (Lösen von Schrauben) bei Rauschanregung von 2 bis 50 Hz. mit 350 N RMS

Ein Steifigkeitsverlust des Pfahles konnte bereits bei zwei gelockerten Schrauben erkannt werden. Extrem sensitiv reagiert das Verfahren auf Kolkbildung. Bereits eine Kolkentiefe von 30 cm führte zu einer dramatischen Veränderung der Residuen. Die Annahme ist begründet, dass das SHM-System bereits eine Auskolkung von 5 cm hätte erkennen können.

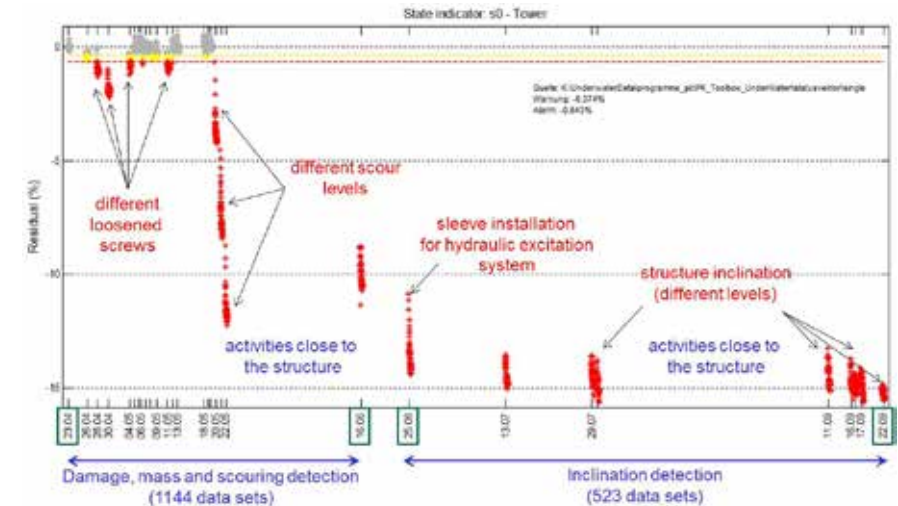


Abbildung 10: Darstellung der Residuen eines Damage-Indikators mit besonderer Sensitivität bezüglich Auskolkung bzw. Änderung der Einspannbedingungen

Bezüglich der Standfestigkeit wurden in UnderwaterINSPECT alle Projektziele erreicht und eine Methode zur Signalanalyse entwickelt, die die 2007 aufgestellten Forderungen des BSH [1] erfüllen kann.

### Ergebnisse für die Prüfung von Schweißnähten

Für die Bewertung von Schweißnähten an Offshore-Gründungsstrukturen werden Technologien gesucht, die dauerhaft an der Struktur verbleibende Sensortechniken verwenden und auch an schwer zugänglichen Stellen Risse zuverlässig detektieren können. Geführte Wellen eignen sich dafür hervorragend, da sie nicht nur global, sondern orts aufgelöst Fehler im cm-Bereich detektieren können. Niederfrequente Ultraschallwellen durchdringen die gesamte Plattenstruktur. In Abbildung 11 sind derartige unterschiedliche Wellenarten mit Laservibrometrie sichtbar gemacht.

Die Sensoren und Aktoren müssen im Gegensatz zum klassischen Ultraschallverfahren nicht direkt über dem Fehler angebracht sein (vgl. Abbildung 12, rechts). Der Fehler ist rot markiert, die Sensorpositionen der Manschette sind durch graue Kästchen gekennzeichnet. Eine derartige Anordnung minimiert den Installationsaufwand und gewährleistet die Überwachung schwer zugänglicher Bereiche.



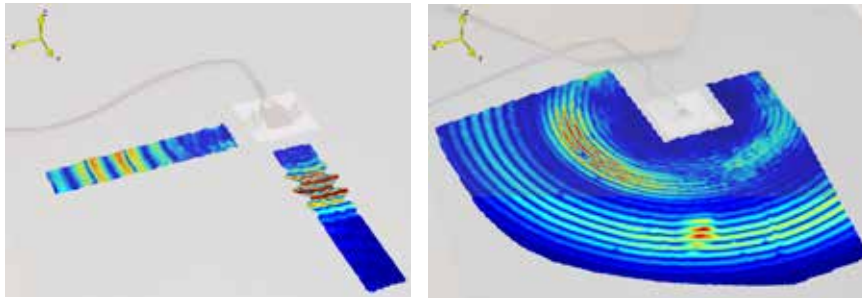


Abbildung 11: Charakterisierung von Aktoren mit Laservibrometrie (links: Scherwelle, rechts: Kompressions- und Longitudinalwelle)



Abbildung 12: Position der Überwachungsbereiche; links: an der Struktur, rechts: Sensorposition bezüglich des zu erwartenden Fehlers

Der Überwachungsbereich befindet sich zwischen den Sensormanschetten, wobei alle Wandler sowohl als Aktoren zum Transmittieren der Signale als auch als Sensoren zum Empfangen der Signale verwendet werden können (vgl. Abbildung 13). Die Wandler sind wasserfest einlamiert und besitzen eine wasserfeste Steckverbindung (vgl. Abbildung 14). Sie sind an der Gründungsstruktur befestigt und verbleiben dort. Damit ist eine dauerhafte Überwachung der Schweißnaht über den gesamten Umfang möglich.

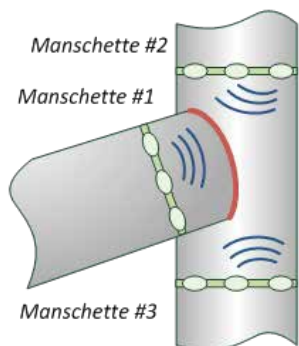


Abbildung 13: Sensormanschetten-technologie zur Überwachung der Schweißnaht (rot gekennzeichnet)



Abbildung 14: Taucher mit der Sensormanschette vor der Installation

Erste Unterwasserversuche wurden im Hafenbecken in Rostock an einem speziell in diesem Projekt gefertigten Rohrknotten durchgeführt. Um Interferenzen an den Rohrenden zu vermeiden, war der Knotten in seinen Dimensionen direkt auf die Bedürfnisse dieser Messungen mit geführten Wellen abgestimmt. Dadurch wurde das Auswerteverfahren beim ersten Test vereinfacht.

Der Rohrknotten wurde im Hafenbecken versenkt (Abbildung 15), die Messgeräte standen noch an Land. Bei der Messung wurde ein Video gedreht (Abbildung 16).



Abbildung 15: Rohrknotten mit Sensormanschette beim Versenken im Hafenbecken



Abbildung 16: Unterwasser-Bilder der Sensormanschette

Später wurde ein künstlicher Fehler in eine Flanke der Schweißnaht eingebracht mit 4,5 mm Länge, 5 mm Tiefe (entspricht 1/3 der Rohrstärke) und 0,9 mm Öffnungsweite (vgl. Abbildung 17).

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe eines Tomographiealgorithmus, der die verschiedenen Laufwege von der Manschette zur Schweißnaht berücksichtigt. Der Vorteil der Anwendung besteht insbesondere in der korrekten Lokalisierung und der besseren Eliminierung von Störsignalen. Die

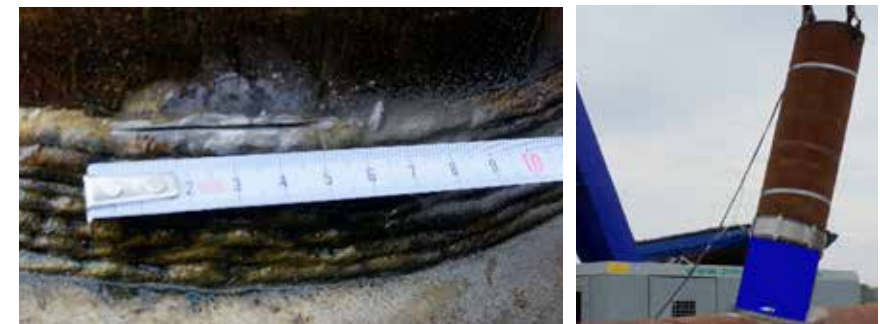


Abbildung 17: Künstlich eingebrachter Fehler, Größe 4,5 mm lang, 5 mm tief (1/3 Rohrstärke), 0,9 mm Öffnungsweite (links) und dessen Detektion mit Ultraschall (rechts)



Ergebnisse der Auswertung sind im rechten Teil der Abbildung 17 dargestellt und wurden zum besseren Verständnis auf den Rohrknoten projiziert.

Es war mit der verwendeten Messtechnik möglich, den Riss korrekt zu lokalisieren. Störsignale wurden durch den Algorithmus sehr gut unterdrückt, so dass eine eindeutige Interpretation ermöglicht wurde.

Zum Abschluss wurde die Manschette in Baltic 1 getestet (Abbildung 18). Dafür wurden zwei Manschetten verwendet, um zusätzlich zu dem Hafenbeckentest mit Reflexionssignalen auch die Transmissionssignale auswerten zu können. Die Messtiefe beträgt in Baltic 1 18 m, sodass in einem realistischen Anwendungsfeld getestet werden konnte.



Abbildung 18: Test des Unterwasserknötens im Offshore-Windpark Baltic 1



Abbildung 19: Taucherarbeiten in 18 m Tiefe am Rohrknoten im Offshore-Windpark Baltic 1

Die Handhabbarkeit durch Taucher wurde durch einen Anbringungstest unter Wasser getestet und positiv bewertet (vgl. Abbildung 19).

Ein Beispielsignal, wie es im oben beschriebenen Tomographie-Algorithmus zur Ortung von Schäden verwendet wird, ist in Abbildung 20 dargestellt. Durch einen eingebrachten Modell- oder künstlichen Riss wird die Amplitude des Signals deutlich verringert, wie im Vergleich zwischen der roten und der schwarzen Kurve zu sehen ist. Dies wird durch eine am Riss reflektierte Welle verursacht, die fehlende Energie führt zu geringeren Amplituden.

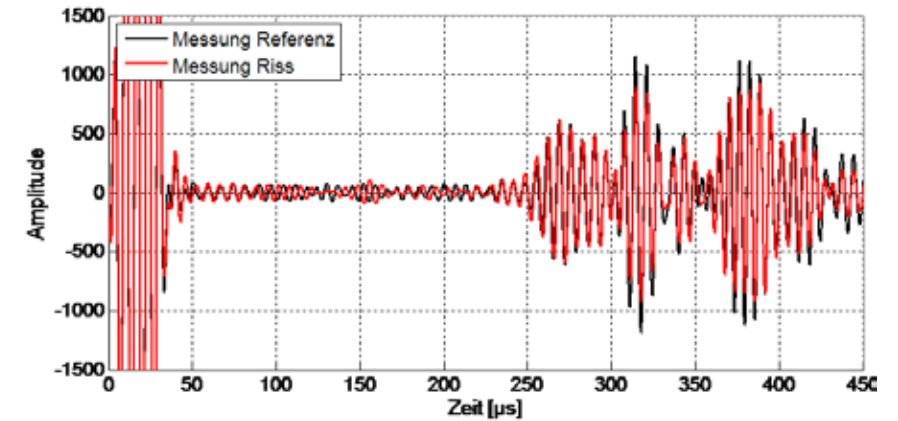


Abbildung 20: Typische Transmissionssignale zwischen den Manschetten zur Rissdetektion in 18 m Tiefe im Offshore-Windpark Baltic 1

Im Rahmen des Projektes UnderwaterINSPECT konnte eine derzeit nicht am Markt erhältliche Unterwassertechnologie für die Überwachung von Schweißnähten an Offshore-Gründungsstrukturen entwickelt und erfolgreich im Offshore-Windpark Baltic 1 in 18 m Wassertiefe erprobt werden.

## Literatur

- [1] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Standard, Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt, StUK 3, 2007.
- [2] P. Kraemer, C. Ebert, H. Friedmann: Schwingungsbasiertes Structural Health Monitoring (SHM) an Offshore-Windenergieanlagen - von der Überwachung des Rotorblatts zur Gründungsstruktur, Vortrag IWEC, 4. Sept. 2014, Hannover; Tagungs-CD
- [3] P. Kraemer, H. Friedmann, C. Ebert: Vibration-based Ice Detection of Rotor Blades in Wind Turbines – The Industrial Realization of an SHM-System, Vortrag am 02.09.2015 auf 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford 2015, Proceedings
- [4] P. Kraemer: Vibration-based structural health monitoring for tower and foundation of offshore wind turbines, Vortrag am 14. 10. 2015 in Bremerhaven auf der Offshore Wind R

## IS<sup>2</sup>U – Einsatz intelligenter Algorithmen für Auswertung und Monitoring in Unterwasserbildsequenzen

Prof. Dr.-Ing. Tim W. Nattkemper (Universität Bielefeld)  
Dr. Timm Schoening (Universität Bielefeld)  
Bc. Sc. Daniel Langenkämper (Universität Bielefeld)  
Dipl. Inform. Daniel Brün (saltation GmbH & Co KG)  
Björn Steinbrink (saltation GmbH & Co KG)  
Alexander Medina (saltation GmbH & Co KG)

### Einleitung

In der Meerestechnologie ist aktuell ein stark ansteigender Einsatz von bildgebenden Techniken in sehr heterogenen Einsatzfeldern und –kontexten zu beobachten, der deutlich die Tendenz zeigt, sich weiter zu verstärken. Die Anwendungsfelder reichen von der Exploration der in marinen Umgebungen gelagerten Rohstoffe über das Monitoring der wirtschaftlichen Nutzung mariner Räume bis zur wissenschaftlichen Untersuchung der Lebensräume. Der Grund für die Verstärkung liegt in den Fortschritten im Bereich der Bildaufnahme- und Trägertechnologie, dem relativ geringen Preis und der Verfügbarkeit der Technologie und der Notwendigkeit, um den Zustand eines Habitats oder einer technischen Infrastruktur unter Wasser mit ausreichend Information zu beschreiben. Um die Effizienz und Effektivität des Einsatzes dieser bildgebenden Technologien zu gewährleisten, sind neue computergestützte Ansätze zur Auswertung der in großem Umfang anfallenden Daten notwendig, so dass eine ausreichende Geschwindigkeit und Robustheit der Auswertung mit akzeptablen Kosten ermöglicht wird. Durch eine Zusammenarbeit zwischen der Arbeitsgruppe Biodata Mining (Universität Bielefeld) und dem Softwareunternehmen saltation wurden in diesem Verbundprojekt neue algorithmische Lösungsansätze für die (semi-)automatische Auswertung von Unterwasserbilddaten und für die manuelle Annotation und Verwaltung von Bilddaten (Digital Asset Management) entwickelt und in moderne Softwarearchitektur übertragen, um eine ausgereifte technologische Plattform für eine Kommerzialisierung der neuen Informationstechnologien, die man auch als Marine (Image) Informatics bezeichnen könnte, zu etablieren. Der besondere Fokus in der Entwicklung lag in der Frage, wie weit lernende Algorithmen die Aspekte intelligenten Verhaltens simulieren, in unterschiedlichen Anwendungskontexten geeignet sind, die Auswertung der großen Bilddaten zu automatisieren, um so den Flaschenhals in der Datenauswertung zu überwinden.

## Motivation und Hintergrund

Seit ungefähr 10-15 Jahren vollzieht sich aus Sicht der Informatik ein Wandel in der Anwendung von bildgebenden Verfahren in den Meereswissenschaften und in der Meerestechnik. Durch Fortschritte in der Aufnahme-Hardware und durch ein gesteigertes Interesse an Bildinformation zur Erfassung, Klassifikation und Quantifizierung von so genannten Objects of Interest (OOI) verschiebt sich die bildgebende Technologie in Richtung einer Hochdurchsatztechnik. Die für eine Transekte gewonnenen Daten erreichen Volumen, die durch einfache menschliche Evaluation nicht mehr auf tabellarische Größen abbildbar sind, so dass seit ca. 8 Jahren die ersten Arbeitsgruppen mit der Entwicklung von Bildverarbeitungs-Algorithmen begonnen haben. Aus diesem Grund ist der Zustand des Forschungs- und Entwicklungsumfelds der Unterwasserbildverarbeitung, auch zum Projektende und besonders im Vergleich zu anderen industriellen Bildverarbeitungsdomänen, noch im Aufbau und nur durch eine kleine Anzahl akademischer Gruppen mit Projekten dünn besetzt, die sich während der letzten Jahre (geschätzt) verdoppelt hat. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Tatsache, dass in der Unterwasserbildverarbeitung spezielle Probleme auftauchen, weswegen ein einfacher, d. h. direkter Technologietransfer bestehender Bildverarbeitungs-Lösungen aus anderen Anwendungskontexten zu Projektbeginn korrekt als nicht möglich eingeschätzt wurde. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklung (FuE) liegt aktuell im nichteuropäischen Ausland, in den USA (Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) [1,2,3] und Woods Hole Oceanographic Institution [4]), Kanada [5] und Australien (Australian Centre for Field Robotics, University of Sydney [6]). In Deutschland hat die Arbeitsgruppe Biodata Mining an der Universität Bielefeld bereits für mehrere Anwendungskontexte erfolgreich zeigen können, wie mit algorithmischen Methoden der Mustererkennung und des maschinellen Lernens zeitaufwändige Bildanalyseschritte automatisiert werden können, wie z.B. die Segmentierung von Kaltwasserkorallen [7], die Detektion von Shrimps and die Analyse ihrer Lokalisierungsmuster [8], sowie die Klassifikation von Megafauna [9-11].

Eine wesentliche Voraussetzung in der Entwicklung der aufgezählten Systeme zur Überwachung von UW Video-/Bilddaten ist ein effizientes und effektives Datenmanagement, welches unter anderem die einfache Verfügbarkeit und flexible Annotation der Daten (Bildregionen, Videoframes) ermöglicht. Auch in diesem Bereich gibt es seit wenigen Jahren erste Entwicklungen, die das Potential haben, die Erhebung, Fusion, Annotation und Auswertung in der Meerestechnologie zu revolutionieren. Erste Systeme zielten auf die Vereinfachung der Annotation digitaler Bilddaten, wie z.B. das einfache aber bekannte Visual Basic Programm Coral Point Count [12], welches allerdings auf einen einzelnen Arbeitsplatz beschränkt war und ohne Perspektive auf die Entwicklung des Internets entwickelt wurde. Ein sehr umfassendes und inte-

gratives Projekt ist die Entwicklung der informationstechnologischen Infrastruktur für die kanadischen Projekte VENUS und NEPTUNE. Diese Infrastruktur dient dazu, Daten aus zahlreichen heterogenen Sensoren zu sammeln, zu fusionieren, zu explorieren und zu visualisieren, wobei ein starker Fokus auf den weltweiten Zugang durch das World Wide Web (www) gesetzt wurde [13, 14]. Aus der gleichen Motivation entwickelte die AG Biodata Mining das Online UW Bilddatenbanksystem BIIGLE (BioImage Indexing, Graphical Labeling and Exploration), welches zurzeit in diversen Projekten erfolgreich eingesetzt wird [15, 16]. Der Erfolg von BIIGLE findet auch in den Initiativen NICAMS, VARS (Video Annotation and Reference System), SQUIDLE und CATAMI (Collaborative and Automated Tools for Analysis of Marine Imagery) Ausdruck, welche einige Konzepte und Ideen von BIIGLE aufgreifen, kopieren und weiterentwickeln. Eine wesentliche Lücke besteht in der Verfügbarkeit einer kommerziellen Lösung für die Verwaltung der Bilddaten und der Annotationen, die Anwendungen im industriellen Umfeld eine nachhaltige und effektive Arbeit mit den Bilddaten ermöglicht.

[www.biigle.de](http://www.biigle.de), Login: test, Passwort: test

<http://nzoss.org.nz/projects/nicams>

websites <http://www.mbari.org/vars/>

<http://squidle.acfr.usyd.edu.au/>

<http://catami.org>

## Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsergebnisse des IS2U-Projekts zusammengefasst und anschließend an Beispielanwendungen illustriert.

## Vorverarbeitung

Um die stark variierende Bildqualität aufzubessern wurden verschiedene Methoden implementiert und getestet, um den Ausleuchtungskegel zu korrigieren und die Farbverteilung (chromatische Verschiebung) zu korrigieren. Es wurden sowohl Algorithmen aus der Fachliteratur getestet, als auch ein neues Verfahren namens fSpice entwickelt. Das fSpice Verfahren optimiert den Parameter der Ausleuchtungskorrektur durch eine Auswertung verschiedener Bildmerkmale und passt die RGB-Farbkanäle durch ein alignment der drei Mittelwerte im Histogramm an. Im Vergleich mit den Verfahren aus der Literatur hat sich das fSpice Verfahren auf Beispieldatensätzen als ebenbürtig bzw. überlegen herausgestellt (s. Abbildung 1 und [17]).



Abbildung 1: Vergleich des entwickelten fSpice Verfahrens mit anderen Vorverarbeitungs-routinen aus der Fachliteratur: A) Original Eingabebild (Copyright: AWI Bremerhaven), B) ACE, C) UCC, D) AUIP, E) fSpice.

## Merkmalsberechnung

Ein wesentlicher Schritt in der Analyse von Bilddaten durch Methoden des maschinellen Lernens und der Mustererkennung ist die Repräsentation der lokalen Bildinformation durch geeignete Merkmale. Diese Funktionen, die für einen Bildpunkt  $p$  oder seine  $N \times N$  Pixel-Nachbarschaft eine neue numerische Repräsentation  $x(p)$  definieren, können auf unterschiedliche Arten realisiert werden: (i) durch explizit definierte Deskriptoren (Kantenhistogramme, Grauwert-/Farbhistogramme, Texturmaße, etc.), (ii) durch datengetriebenen Merkmalsextraktoren (Principal Component Analysis, Independent Component Analysis, etc.) oder durch Merkmale höherer Ordnung (e.g. Bag of Visual Words). In den untersuchten Bilddaten und Anwendungskontexten hat sich gezeigt, dass für die Klassifikation von Megafauna besonders die Merkmale der Kategorie (i) geeignet sind [9,11]. Die Berechnung einiger Merkmale konnte durch eine Anpassung und Optimierung stark beschleunigt werden,

so dass nun eine Echtzeitberechnung auf Standardhardware möglich ist [18,19] (siehe unten).

Um Objekte von heterogener Merkmalsausprägung klassifizieren zu können wurde ein neues Verfahren namens Bag-of-Prototypes [20] entwickelt, welches eine Pixelnachbarschaft in zwei Schritten auf einen Merkmalsvektor  $x(p)$  abbildet. Schritt 1: für jeden Bildpunkt in der Nachbarschaft  $N \times N(p)$  wird ein Merkmalsvektor  $x(p)$  mit einem gewählten Deskriptor berechnet. Schritt 2: Die Merkmalsvektoren werden auf Codebuchvektoren nach dem best-matching-unit Kriterium abgebildet und ein Histogramm über die Verteilung der Codebuchvektoren berechnet, welches anschließend als Merkmalsvektor  $h(x(p))$  verwendet wird. Das Verfahren wurde mit anderen Segmentierungsalgorithmen verglichen und hat sehr niedrige Fehlerraten bei der Segmentierung geologischer Strukturen erreicht (siehe Abbildung 2).

## Entwicklung von neuen Lernalgorithmen

Um die berechneten Merkmalsrepräsentationen von Pixeln und Regionen auf semantische Kategorien (z.B. Manganknollen, unterschiedliche Megafauna, Kaltwasserkorallen, Schwämme) wurden unterschiedliche Algorithmen aus dem Feld des maschinellen Lernens eingesetzt und verglichen. Als besonders effektiv und effizient hat sich eine besondere Variante der selbstorganisierenden Karte, die H2SOM erwiesen. Im Rahmen des IS2U Projekts wurde dieser Algorithmus in drei Richtungen weiterentwickelt. Erstens wurde das Lernverfahren so modifiziert, dass die Anzahl der Referenzknoten  $n$ , die während des Lernprozesses hierarchisch wächst, sich an die Dichte im Merkmalsraum  $X$  anpasst. Es hat sich in den Studien gezeigt, dass die Klassifikationsrate leicht unter der Rate von anderen Klassifikationen (z.B. SVM)

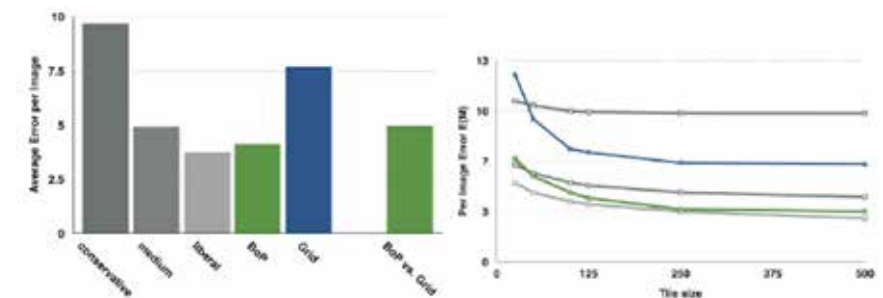


Abbildung 2: Die Bag-Of-Prototypes Merkmalsrepräsentation wurde mit unterschiedlichen Schwellwertbasierten Verfahren verglichen, sowie mit einer alternativen Segmentierung (GRID). Besonders für größere Pixel-Nachbarschaften  $N$  ist zeigt das BoP Verfahren deutlich geringere Fehlerraten als die anderen Verfahren.



liegt, aber die Rechenzeit bei der Klassifikation um den Faktor 100 geringer ist, was den Algorithmus zur Anwendung auf mobilen unabhängigen Plattformen geeignet erscheinen lässt.

Zweitens wurde des H2SOM Verfahren so erweitert, dass mittels eines evolutionären Optimierungsprozesses, die gelernten Prototypen  $\{ui\}$  in einen Pixelsegmentierer für konvexe geschlossene Pixelgruppen transformiert und sehr gut zur Segmentierung von Manganknollen (siehe Anwendungsbeispiel Echtzeitsegmentierung von Manganknollen unten und [21]) und Schwämmen geeignet ist. Die Effizienz und Effektivität der Segmentierung von Manganknollen ist durch die Entwicklung dieses neuen Algorithmus namens ES4C signifikant gesteigert worden, da ein manuell durchgeführter Bedienungsschritt eingespart wird (ca. 120 min Ersparnis pro Bildserie).

Drittens ist die Laufzeit des Lernalgorithmus und des Klassifikationsschritts um mehrere Größenordnungen reduziert worden (siehe Abschnitt Machine Learning Integration unten).

## Nachbearbeitung

Nachdem die Bildpixel durch algorithmisch gelernte Funktionen auf semantische Kategorien abgebildet wurden, müssen diese neuen Pixelwerte durch einen Nachbearbeitungsschritt noch auf die Größen transformiert werden, die sich in Tabellen ausdrücken lassen (Transekte ID, Bild ID, Datum, Pixelkoordinaten, Spezies, Tiefe, Größe des Bildausschnitts etc.), welche dann in einem Analyse Workflow durch statistische Verfahren, Data Mining oder einfache Visualisierung in einem GIS System verwertbar sind. Es wurden mehrere so genannte Pipelines aus morphologischen Operatoren bzw. deren Anpassung mit unterschiedlichem Datenmaterial getestet. Die Segmentierungsergebnisse von Objekten wie Korallen oder Manganknollen wurden dabei von den Kooperationspartnern (STATOIL ASA, BGR) als sehr gut bewertet, d.h. sie korrelieren stark mit den menschlichen Segmentierungsergebnissen. Bei den Klassifikationen der einzelnen Biota, z.B. von Megafauna (Seesterne, Seegurken, etc.) zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Einige Biota sind sehr gut zu detektieren, einige werden mit deutlich zu vielen False Positives (>50%) detektiert. Eine wichtige Einflussgröße ist hierbei die Qualität des Bildmaterials, welche z.B. durch Bewegungsunschärfe oft stark beeinträchtigt war.

Ein weiteres Problem ist die teilweise sehr geringe Dichte der Biota. Einige Klassen / Kategorien tauchen nur sehr selten auf, sind aber für die Bewertung des Zustands des Ökosystems sehr wichtig (sog. Schlüsselspezies). Die Entwicklung von Bildanalyseverfahren zur schnelleren Klassifikation

solch seltener Biota könnte ein sehr interessantes Entwicklungsziel für zukünftige Arbeiten darstellen, was aber bzgl. der thematischen Ausrichtung und des Entwicklungsaufwands außerhalb des Rahmens dieses Projekts liegt.

Um innerhalb des IS2U Projekts einen pragmatischen und sehr effektiven Lösungsansatz für die Reduktion der False Positives für seltene oder sehr heterogen abgebildete Spezies anzubieten, wurde ein online Werkzeug namens ATE entwickelt und in der Kooperation mit dem AWI intensiv eingesetzt. Das Werkzeug nutzt die Eigenschaft des menschlichen visuellen Systems, Klassifikationsentscheidungen in kleinen Bildausschnitten um Größenordnungen schneller durchführen zu können als im Gesamtbild (siehe Abbildung 3). Die Ergebnisse der maschinellen Detektion und Klassifikation der Megafauna werden in einem Gitter dargestellt, welches i.e. Nutzer sehr schnell visuell erfassen und jede einzelne Zelle mit „richtig“, „falsch (unbekannt)“, „falsch (richtige Spezies)“ markieren können. Auf diese Weise müssen die Nutzer auf der einen Seite noch ein paar Arbeitsstunden in die finalen Ergebnisse investieren, allerdings gewinnt die Gesamtanalyse stark an Transparenz und Plausibilität und die zeitliche Einsparung und Aufwand gegenüber einer rein manuellen Analyse entspricht  $n \cdot 100$  h.

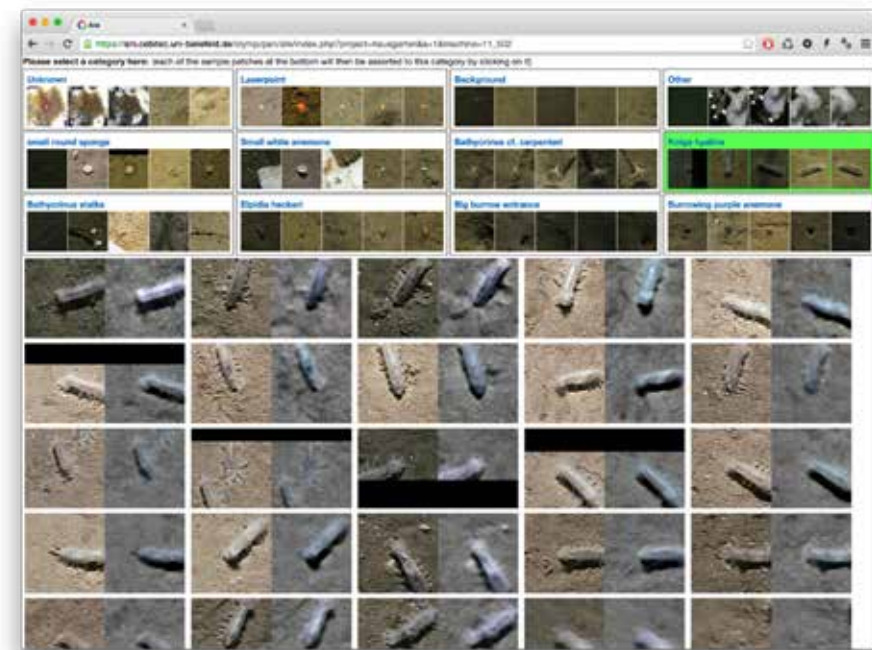


Abbildung 3: Mit dem ATE Werkzeug, lassen sich die Zwischenergebnisse der computergestützten Detektion und Klassifikation sehr schnell online manuell bewerten

## Konzeption

Bei der Konzeption der Technologieplattform stand der Praxisbezug im Vordergrund, um die Akzeptanz des Gesamtsystems, insbesondere der Lern- und Analyseverfahren, bei den Nutzern zu stärken. Konkret bedeutete dies, dass die Technologieplattform folgende Anforderungen erfüllen musste:

- Bild-Analysen müssen on-shore und off-shore, möglichst auch off-line, möglich sein
- Die große Bilddatenmenge erfordert hochperformante Analysen, um in vertretbarer Zeit Resultate zu erhalten
- Intuitive, zielgruppenorientierte Nutzeroberflächen
- Gute Integration in Randprozesse, um manuelle Schnittstellen zu vermeiden

Im Rahmen der Konzeptionsphase wurden als Server-Technologie zur Umsetzung der verschiedenen Komponenten der Plattform die funktionale Programmiersprache Scala und als Desktop-Technologie das plattformunabhängige Qt-Framework (C++) ausgewählt. Zum Betrieb des Web-Interfaces und zur Integration des Gesamtsystems kommt das auf Scala basierende Play-Framework mit Lift als ORM (Object-Relational-Mapping) zum Einsatz.

## Machine Learning Integration

Kernbestandteil der automatischen Bildanalyse ist ein Machine Learning-Verfahren, welches durch algorithmische Optimierungen und Parallelisierung auf GPUs extrem beschleunigt werden konnte. Mit durchgängiger CUDA-Anpassung von Bild-Vorverarbeitung, Laserpunkt-Detektion, Segmentierung und Klassifikation konnte die Analysedauer für ein Bild auf Standard-Desktop-Hardware mit CUDA-kompatibler Grafikkarte um den Faktor 400 verbessert und somit auf rund 380ms reduziert werden.

Zur Erreichung einer Beschleunigung in dieser Größenordnung wurden die Analyseverfahren derart optimiert, dass alle beteiligten Hardwarekomponenten (CPU, GPU, RAM, IO) durch Parallelisierung der Einzelschritte gleichmäßig maximal ausgelastet werden, um Flaschenhälse in der Datenverarbeitung zu vermeiden. Die so optimierte Analyse-Komponente kommt in Form einer standalone-Desktop-Anwendung für die Offline-Verwendung auf Standard-PC-Hardware und in Form eines Server-Moduls für die Online-Verwendung zum Einsatz.

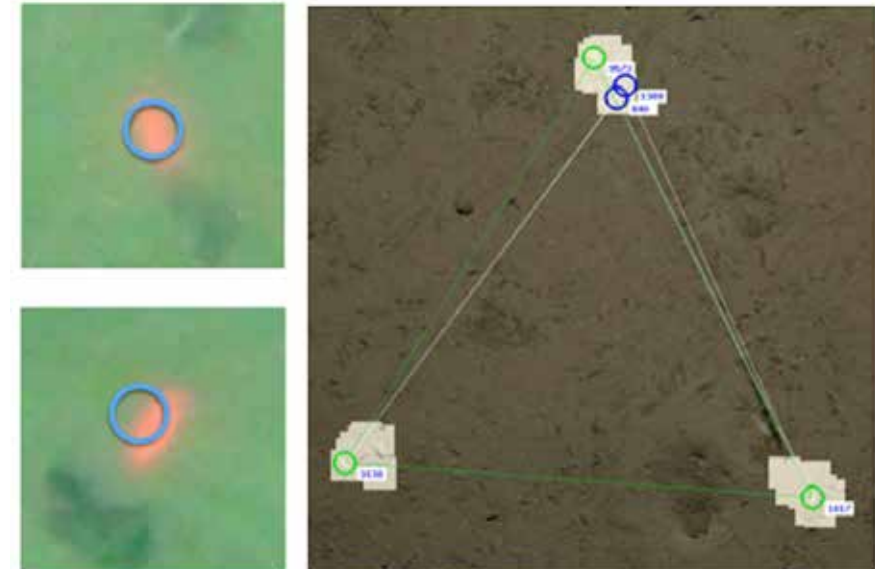


Abbildung 4: Mit dem neu entwickelten Delphi Verfahren kann die Detektion der Lasermarker in Bildern und die Berechnung der abgebildeten Bildfläche automatisch durchgeführt werden. Die Nutzer markieren in einer kleinen Menge Beispiel Bilder (zB 10-20) die Marker mit einem Mauszeiger. Anschließend lernt Delphi das räumliche Muster der Marker und die typischen Farbmuster der marker im Bild, um im Rest der Bildtransekte die Marker automatisch zu detektieren.

## MAMAS (Marine Asset Management and Analysis System)

Neben der automatischen Analyse von Bildern ist auch das Management und die Annotation vieler tausender Aufnahmen eine Herausforderung, die im IS2U-Projekt mit einem webbasierten, integrativen Asset-Management-System angenommen wurde. Das „MAMAS“ getaufte System vereint dabei die Fähigkeiten eines Asset-Management-Systems zur manuellen Annotation mit denen der automatischen Analyse von großen Bilddatenmengen in einer Software [22,23]. MAMAS ist darauf ausgelegt, die zentral gespeicherten Bilddaten kollaborativ annotieren, explorieren und analysieren zu können. Dazu kommen neben den hochperformanten Machine-Learning-Verfahren auch manuelle Funktionen zur Annotation von Flächen und Punkten gemäß einer konfigurierbaren Taxonomie und Bemaßungswerkzeuge zum Einsatz.

## Intelligente und adaptive Lasermarkerdetektion

Um belastbare quantitative Daten aus Bildern zu extrahieren, müssen die (manuellen oder algorithmischen) Annotationen im Bild in Relation zur abgebildeten Bodenfläche gesetzt werden. Hierzu ist es in der Regel notwendig, projizierte Lasermarker zu detektieren und auszuwerten. Da die räumliche Anordnung und die Farbmuster der Marker extrem stark zwischen den Expeditionen variiert, schlagen wir vor, die Lasermuster individuell für jede neue Transekte aus einer kleinen Menge handgelabelter Bilder zu mit Clusteralgorithmen zu lernen und dann auf die restlichen Bilddaten anzuwenden. So wurde ein neues Verfahren namens DELPHI entwickelt und erfolgreich getestet, welches die Farbinformation und die geometrische Anordnung der Lasermarker Punkte (x,y) und ihrer lokal ausgeprägten Farbmerkmale im RGB-Raum aus einer kleinen Menge von handgelabelten Bildern mit Hilfe eines Vektorquantisierungsverfahrens lernt und mit hoher Genauigkeit die Lasermarker Punkte im Rest der Bilder vollautomatisch detektiert [24].

## Echtzeitsegmentierung von Manganknollen

Die Segmentierungsalgorithmen zur Quantifizierung von Manganknollen (siehe oben) sind grundsätzlich überarbeitet und bzgl. der Ausnutzung der Hardware Merkmale auf einem Notebook (Graphikkarte und Multi-Core) optimiert worden. Die aktuellen Rechenzeiten zur Durchführung der Bildanalyse auf einem handelsüblichen Notebook werden in Tabelle 1 aufgelistet und werden in einem Konferenzbeitrag publiziert [18]. Die wesentlichen Probleme in der Segmentierung bereiteten a) die Entdeckung von relativ kleinen Strukturen und b) die teilweise Bedeckung der Manganknollen durch Sediment. In Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner wurden die Segmentierungsergebnisse mit den Auszählungen aus Kastengreifermessungen verglichen und es zeigte sich früh, dass die bildbasierte Erfassung die tatsächliche Menge der Manganknollen noch unterschätzt. Aus diesem Grund wurde a) die Nachverarbeitung der Segmentierungsergebnisse verbessert, um kleine Knollengrößen besser zu berücksichtigen und b) die Rechenzeit beim Training der H2SOM für die Anwendung auf einem Notebook an Bord während der Expedition stark reduziert (s. Tabelle 1), wodurch es möglich ist, für individuelle Bildtransekten neue Klassifikatoren schnell zu trainieren, die sich an die individuellen Bildmerkmale der einzelnen Fahrten besser anpassen können (siehe Abbildung 4).

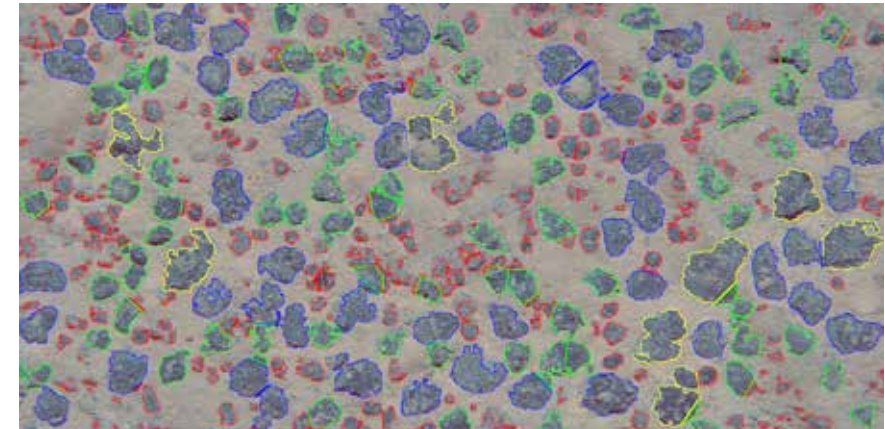


Abbildung 5: Das Ergebnis der Manganknollensegmentierung wird den Nutzern als Overlay angezeigt. Die Nutzer definieren individuell Größenintervalle, die im Ergebnis farblich codiert sind. Die Ergebnisse können in tabellarischer Form in verschiedenen Formaten abgespeichert und in Datenbanken abgelegt werden, um sie in einem weiteren Schritt mit anderen Signalquellen (Backscatter) zu vergleichen.

Tabelle 1: Rechenzeiten für die Standardimplementierung und die neue, durch saltation optimierte Software. Durch die stark gesteigerte Performanz ist der Einsatz der Software auch für große Datenmengen auf einem Notebook während einer Expedition möglich.

VERARBEITUNGS-SCHRITT	RECHENZEIT (STANDARD IMPLEMENTATION)	RECHENZEIT (HIGH PERFORMANCE IMPLEMENTATION VON SALTATION)
a) fSpice	5.77 sec	0.087 sec
b) H2SOM Segmentierung	18.1 sec	0.237 sec
c) H2SOM Training	1900 sec	650 sec

## Klassifikation von Megafauna in Bilddaten aus heterogener Qualität

Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in der Vorverarbeitung, der Merkmalsextraktion, des maschinellen Lernens zur Objektdetektion und Klassifikation und in der Nachbearbeitung wurden unter anderem auf Bilddatensätzen vom HAUSGARTEN Observatorium getestet. Die Bilder stellten eine typische nichttriviale Herausforderung dar, da die Bildtransekten von



unterschiedlichen Jahren deutliche qualitative Unterschiede aufweisen (bedingt durch Variationen in der eingesetzten Hardware oder in der Geschwindigkeit und Tiefe des Aufnahmeschlittens).

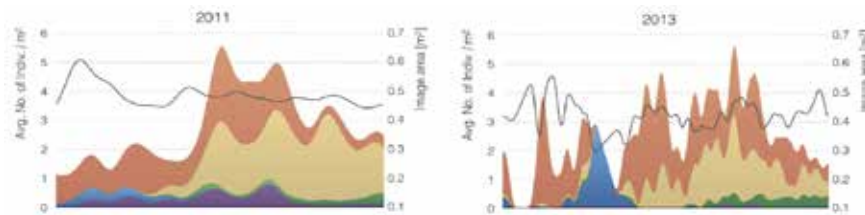


Abbildung 6: Die berechneten räumlichen Dichten entlang der Bildtransekten vom HG Observatorium. Es werden die räumlichen Dichten entlang der Strecke des Aufnahmeschlittens für folgende Klassen angezeigt: Schwämme (violett), *Kolga hyalina* (blau), *Bathycrinus carpenteri* (Krone) (grün), *Bathycrinus carpenteri* (Stock) (gelb), weiße Anemone (orange), durchschnittliche Gesamtzahl von Individuen (schwarze Linie).

Durch die Beschleunigung in der Vorverarbeitung und die Optimierung der Merkmalsauswahl und den Einsatz des ATE Tools war es möglich, für diese komplexe Bilddomäne quantitative Daten zu generieren siehe Abbildung, die zeitnah in einem Fachjournal veröffentlicht werden sollen [11].

## Diskussion

Es wurden auf unterschiedlichen Feldern signifikante Fortschritte erzielt, welche den Einsatz von Algorithmen aus der Bildverarbeitung und aus dem maschinellen Lernen im Kontext der Meerestechnologie auf das Niveau einer Anwendung und konkreten Produktentwicklung bewegt haben. Die Kombination aus einer methodischen Neuentwicklung und einer professionellen Softwareentwicklung ermöglichte erstmalig die Entwicklung eines Demonstrators, in dem neben der Effektivität (z.B. die Genauigkeit der Segmentierung oder die Korrektheit der Klassifikation) auch die Effizienz und Ergonomie berücksichtigt wurden. Der stärkste Grad der Integration dieser Aspekte spiegelt sich am Beispiel der Manganknollensegmentierung wieder.

Eine große noch offene Herausforderung ist die Entwicklung von Methoden, um die Integration der in IS2U entwickelten und optimierten Algorithmen und Software Module in bestehende und neue Workflows und die Vernetzung mit weiteren Signaldomänen (Backscatter [25], Hyperspectral, LIDAR).

Im Laufe der Projektlaufzeit wurde deutlich, dass viele Anwender mit der anfallenden Datenmenge und deren Analyse stark überfordert sind. Das betrifft nicht nur die Gewinnung von Erkenntnissen aus dem Bildmaterial, sondern

auch die einfache Archivierung und das Management der Informationen. Oft steht in Unternehmen oder Institutionen nicht die erforderliche IT-Infrastruktur zur Verfügung, um große Bilddatenbestände zu verwalten oder zu analysieren. Vor diesem Hintergrund macht ein Ausbau der Technologieplattform auf eine stark parallelisierbare Cloud-Infrastruktur Sinn, um eine wirtschaftliche und mit den Datenmengen skalierbare Lösung zu ermöglichen. Gleichzeitig hat die im Projekt erarbeitete Performance-Steigerung der Analyse deutlich gemacht, dass dem Echtzeit-Einsatz der Analysesoftware auf einem Tauchroboter nicht mehr viel im Wege steht. Eine solche Echtzeit-Analyse ist vor dem Hintergrund der immensen Expeditionskosten attraktiv, weil bereits während einer Tauchfahrt auf Analyse-Ergebnisse reagiert werden kann, z.B. um noch mehr Detail-Aufnahmen der beobachteten Region zu erfassen. Die Integration eines Live-Ergebnisses in die Steuerung eines Tauchroboters ist eine noch offene Herausforderung, sowohl für AUVs als auch für ROVs.

## Literatur

- [1] D. Edgington, D. Cline, D. Davis, I. Kerkez, and J. Mariette. Detecting, tracking and classifying animals in underwater video. In Proc. of OCEANS, Boston (USA), pages 1–5, 2006.
- [2] P. Fonseca, P. Correia, A. Campos, P. Lau, and V. Henriques. Fishery-independent estimation of benthic species density - a novel approach applied to norway lobster nephrops norvegicus. Marine Ecology Progress Series (MEPS), 369:267–71, 2008.
- [3] C. Lebart, K. andSmith, E. Trucco, and D. Lane. Automatic indexing of underwater survey video: algorithm and benchmarking method. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 28(4):673– 86
- [4] J. Rowland, S. Gallager, H. Singh, A. Girard, L. Abrams, C. Griner, R. Taylor, and N. Vine. Development of a towed survey system for deployment by the fishing industry. In Proc. of IEEE OCEANS, Boston (USA), pages 1–5, 2006.
- [5] A. Gobi. Towards generalized benthic species recognition and quantification using computer vision. In 2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, Sep 2010
- [6] O. Pizarro, S. Williams, and J. Colquhoun. Topic-based habitat classification using visual data. In Proc. of IEEE OCEANS'09, Bremen (Germany), pages 1–8, 2009
- [7] A. Purser, M. Bergmann, L. T., J. Ontrup, and N. T.W. Use of machine-learning algorithms for the automated detection of cold-water coral habitats a pilot study. Marine Ecology Progress Series, 397:241–51, 2009
- [8] Microhabitat and shrimp abundance within a Norwegian cold-water



- coral ecosystem. A. Purser, J. Ontrup, T. Schoening, L. Thomsen, R. Tong, V. Unnithan, and T.W. Nattkemper. *BIOGEOSCIENCES*, 10, 5779-5791, doi:10.5194/bg-10-5779-2013, 2013
- [9] T. Schoening, M. Bergmann, J. Ontrup, J. Taylor, J. Dannheim, J. Gutt, A. Purser, and T. Nattkemper. Semi-automated image analysis for the assessment of megafaunal densities at the arctic deep-sea observatory hausgarten. *PLoS ONE*, 7(6), 2012
- [10] T. Schoening, M. Bergmann, A. Boetius, and T. Nattkemper. Investigation of hidden parameters influencing the automated object detection in benthic images. In *Proc. of IEEE OCEANS*, Hampton Roads, Virginia, USA, October 2012
- [11] ABBIE: a method for the quantification of megafauna in HAUS-GARTEN deep sea image collections from 2002 to 2013, T Schoening, D Langenkämper, M Bergmann, J Taylor, TW Nattkemper, *PLoS ONE* (in preparation)
- [12] K. E. Kohler and S. M. Gill. Coral point count with excel extensions (cpce): A visual basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers & Geosciences*, 32(9):1259 – 1269, 2006
- [13] M. Leslie, N. Scott, E. Guillemot, and V. Auger. Video acquisition, archiving, annotation and analysis: Neptune canada's real-time georeferenced library of deep sea video. In *OCEANS 2010*, pages 1 –9, sept. 2010
- [14] B. Pirene and E. Guillemot. The data management system for the venus and neptune cabled observatories. In *OCEANS 2009 - EUROPE*, pages 1 –4, May 2009
- [15] J. Ontrup, N. Ehnert, M. Bergmann, and N. T.W. Biigle - web 2.0 enabled labelling and exploring of images from the arctic deepsea observatory hausgarten. In *Proc. of OCEANS'09 IEEE*, Bremen, Germany, 2009
- [16] T. Schoening, N. Ehnert, J. Ontrup, and T. Nattkemper. Biigle tools-a web 2.0 approach for visual bioimage database mining. In *Proc. of IV 09 - Intl. Conference on Information Visualization*, Barcelone, Spain, 2009
- [17] Ranking Color Correction Algorithms Using Cluster Indices. Jonas Osterloff, Timm Schoening, Melanie Bergmann, Jennifer M. Durden, Henry A. Ruhl, and Tim W. Nattkemper, *Workshop on Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery, ICPR*, Stockholm Sweden, 2014
- [18] Rapid image processing and classification in underwater exploration using advanced high performance computing. T Schoening, D Langenkämper, B Steinbrink, D Brün, TW Nattkemper. *IEEE OCEANS*, Washington DC, USA 2015
- [19] Ultrafast segmentation and quantification of poly-metallic nodule coverage in high-resolution digital images. T. Schoening, B.Steinbrink, D.Brün, T.Kuhn, T.W.Nattkemper. *UMI 2013*, Rio de Janeiro
- [20] Seabed classification using a bag-of-prototypes feature representation. Timm Schoening, Thomas Kuhn, and Tim W. Nattkemper. *Workshop on Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery, ICPR*, Stockholm Sweden, 2014
- [21] Fully Automated Segmentation of Compact Multi-Component Objects in Underwater Images with the ES4C Algorithm. T Schoening, T Kuhn, TW Nattkemper -- Submitted to *Methods in Oceanography* – 2015
- [22] Integrated Digital Marine Image Analysis and Management - new solutions to handle large image collections in environmental monitoring and exploration. B Steinbrink, T Schoening, D Brün, TW Nattkemper. *GEO-HAB 2015*. Salvador, Brazil
- [23] Imagebased marine resource exploration and biodiversity assessment with MAMAS (Marine data Asset Management and Analysis System). T. Schoening, D.Brün, T.Kuhn, T.W.Nattkemper, *UMI 2014*, Lissabon, Portugal
- [24] DELPHI - fast and adaptive computational laser point detection and visual footprint quantification for arbitrary underwater image collections. Schoening, T; Kuhn, T; Bergmann, M; Nattkemper, TW *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, doi: 10.3389/fmars.2015.00020 2015

## **SOAM, Projekt zur berührungsfreien Sondierung von Gewässeruntergründen zwecks Auffindung von Altmunition und anderen Gefahrstoffen zur Gewährleistung der gefahrenlosen Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (WEA)**

Förderkennzeichen: 03SX341

Matthias Reuter (Projektkoordinator),  
Sven Birkenfeld,  
Sabine Bohlmann  
(CUTEC Institut GmbH)

Der in den kommenden Jahren geplante Aus- und Aufbau der Infrastruktur im Meer z.B. die Schaffung von Offshore-Wind-Kapazitäten setzt voraus, dass die Gebiete, die wirtschaftlich genutzt werden sollen, sicher und kosteneffizient erschlossen werden können. Zur Realisierung dieser Zielstellung sollte mittels des Verbundprojektes SOAM ein Beitrag für die maritime Technologie der nächsten Generation erarbeitet und in Form eines Demonstrators realisiert werden. Für diese Aufgabenstellung konnten Partner aus unterschiedlichen Kompetenzbereichen (Sensorik, Software, maritime Technologie, AUV) gewonnen werden, um Deutschland als meerestechnischen High-Tech-Standort zu bestätigen.

### **Projektziel**

Hintergrund der bearbeiteten maritimen Thematik war, dass mit Ende der Kampfhandlungen des Zweiten Weltkrieges große Mengen an Munition in Nord- und Ostsee sowie in Flüssen verklappt wurden, die nun ein erhebliches Gefahrenpotential z.B. beim Bau von Pipelines, Ölplattformen, Offshore Windanlagen oder beim allgemeinen Fischfang mittels Schleppnetzen darstellen. Bei dieser entsorgten konventionellen und chemischen Munition handelt es sich hauptsächlich um Sprengstoffreste, konventionelle Munition (Panzerfäuste, Granaten, Torpedoköpfe, Seeminen) sowie in geringerem Umfang um betonumhüllte Phosgengebinde, hochgiftige Substanzen wie Clark, Adamsit, Lost bzw. die Nervenkampfstoffe Sarin, Soman, Tabun und VX-Gas. Letztere sind nur bedingt wasserlöslich und können daher bei einer Zerstörung, Auflösung oder Beschädigung ihrer Behälter austreten und ggf. an der Wasseroberfläche zu Gefährdungen führen. In Summe geht man heute von ca. 1.600.000 t konventioneller Munition und ca. 230.000 t Giftgasmunition aus dem Zweiten Weltkrieg aus, die noch in Nord- und Ostsee verklappt sind.

Ziel des Projektes war daher die Testung von geeigneter Sensorik, das Aufsetzen einer computer-based-intelligence-basierten (CI-basierten) Datenauswertung, die Integration von analytischer Sensorik und Tests zur Detektion von Altlasten mit einem System-AUV.

Um dieses Ziel realisieren zu können, haben sich die Forschungseinrichtung CUTEC (Datenaufbereitung/-auswertung, softwareseitige Sensorfusion), das mittelständische Räumunternehmen Heinrich Hirdes EOD mit dem Subunternehmer CTK (Bereitstellung von Referenzeinsatzflächen, Test und hardwareseitige Kombination unterschiedlicher Sensoren), Atlas Elektronik (Bereitstellung einer UW-Plattform (AUV), Test und Verifikation neuartiger Laser-Raman-Spektroskop-Anwendungen), sowie die Wehrtechnische Dienststelle 71 (Sonardatenbereitstellung, Sonarbewertung, Seeexperimente) zusammengeschlossen, so dass umfangreiche Expertisen aus verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsbereichen in das Projektvorhaben SOAM einfließen.

Das Verfahrensschema nebst einer GPS-gestützten Referenzierung ist in Abbildung 1 dargestellt

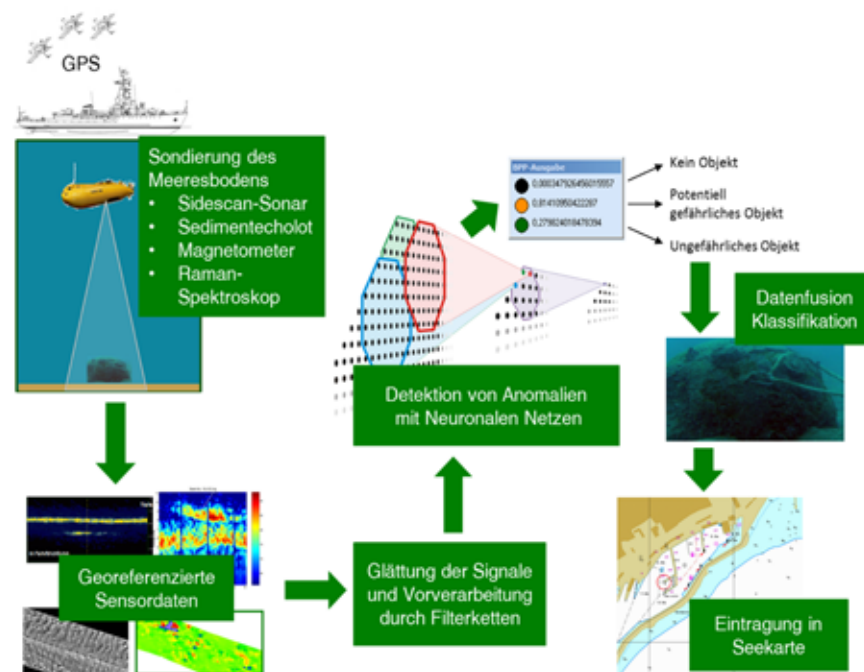


Abbildung 1: Gesamtschema des im Verbundprojekt SOAM angewandten Verfahrens zur Detektion und Lokalisation von auf oder im Meeresgrund befindlichen Objekten

Gemäß Abbildung 1 gliederte sich das Projekt SOAM in folgende F&E-Bereiche:

- Test verschiedener geeigneter Sensorik
- Intelligente Datenauswertung
- Modellhafte Begleitung der Sensorversuche und Auswahl einer bestmöglichen Sensorik für die Suche von Altmunition
- Konzeption einer AUV-basierten Testplattform unter Beachtung der dadurch bedingten Einschränkungen in Bezug auf Platz, Gewicht, Energie, usw.
- Bau eines AUV-basierten Demonstrators

Als umfassende „Klammer“ des Projektes kann gemäß dieser Aufstellung die Definition von Methoden und Verfahren sowie deren Test und Optimierung zur intelligenten, zeitnahen und robusten Datenauswertung von im Einsatz befindlichen Sensoren zur Sondierung des Meeresgrundes nach Gefahrstoffen verstanden werden.

Zur Projektumsetzung wurden zunächst die bei den Projektpartnern vorliegenden Daten genutzt, um eine Strategie für die geplante automatische Datenauswertung mittels neuronaler Netze zu entwickeln. Angedacht war dabei die Verwendung neuartiger neuronaler Netzstrukturen mit integrierten rezeptiven Feldern und einer hybriden Struktur, da Szenarien mit vielfältigen Informationsbestandteilen (in diesem Fall: Sedimentschichten, Gesteinsschichtungen, vielfältige eingesunkene Objekte, usw.) mittels klassischer Mustererkennung wenn überhaupt nur schwer interpretierbar sind bzw. oft eine nicht akzeptable hohe Falschalarmrate aufweisen. Bei dem zugrundeliegenden Bildmaterial handelte es sich um ungefilterte 3D-Daten in voller Auflösung, die unter Einbeziehung von Verfahren zur synthetischen Apertur für die automatische Auswertung aufbereitet wurden.

Die Datenerhebung während des Projektes erfolgte zunächst für jeden Sensortyp einzeln auf verschiedenen georeferenzierten Referenzflächen, über welchen bereits im Vorfeld detektionsspezifische Daten gemessen wurden. So konnten sensorspezifische Signaturen von munitionstypischen Objekten bekannter Dimension als Referenzobjekte für das Training der neuronalen Netze identifiziert werden. Zudem wurden Daten von Metalldetektoren, Magnetometern, Side Scan Systemen, Fächer Echoloten (MBES) sowie Bildaufnahmegeschäften aus laufenden Kampfmittelräumprojekten und bereits durchgeführten Projekten herangezogen, was eine breite Datenbasis ermöglichte. Ferner erfolgte die Erprobung des parametrischen Echolots Innomar SES

2000, des SAS Systems und eines Raman-Spektrometers. Für all diese Geräte musste die Definition einer Schnittstelle und die exakte Übertragung der Daten an ein Datenbanksystem implementiert werden.

Der vorliegende Beitrag beschreibt schwerpunktmäßig Ergebnisse der entwickelten CI-basierten Datenanalyseverfahren. Dies ist zum einem den vielen einem Geheimschutz unterliegenden Hardware-Bereichen, andererseits aber schlicht und einfach einer verständlichen Präsentation der im Projekt SOAM erzielten Ergebnisse geschuldet.

## 1. Datenauswertung

Die Objekterkennung und damit die Detektion und Referenzierung relevanter - also potentiell gefährlicher Objekte - erfolgte im Projekt SOAM auf Basis zweier Hauptsensorarten, welche beide in der Lage sind, Signaturen unterhalb und auf dem Meeresboden zu erfassen. Klassenmäßig können diese einerseits dem Bereich der Magnetiksensoren, andererseits dem Bereich der Sedimentecholot-Systeme zugeordnet werden.

Die jeweiligen Signaturen dieser Sensorsysteme wurden im Verbundprojekt SOAM individuell ausgewertet und klientelrelevant mit dem Ziel einer möglichst genauen Ortsreferenzierung und Objektkategorisierung visualisiert. Durch eine – sich der Einzelauswertung anschließende - Datenfusion der Ergebnisse der beiden Sensorarten kann dabei die Referenzierungs- und Detektionsgüte signifikant erhöht werden. Der CI-basierten Entwicklung des Datenauswertungs- und Visualisierungstools lagen dabei Daten sowohl aus Messungen auf Testfeldern mit definierten verbrachten Objekten, als auch aus realen Bergungsmissionen des Projektpartners Heinrich Hirdes zu Grunde. Der Betrieb, die Aufrüstung und die Wartung der projekteigenen Messung wurde durch die Projektpartner Atlas Elektronik und die WTD 71 dargestellt.

### 1.1 Datenimport und Vorverarbeitung

Im Projekt SOAM wurden nicht nur Daten unterschiedlicher Sensorsysteme, sondern auch von vergleichbaren Systemen unterschiedlicher Hersteller verwendet, so dass zunächst der Umgang mit einer Vielzahl unterschiedlicher Datenformate sichergestellt werden musste. Dies bedingte – neben dem eigentlichen Datenstoring – die Entwicklung und die Implementierung entsprechender Importfilter gemäß den jeweiligen Datenformatspezifikationen, um die Vereinheitlichung der Sensordaten für die nachgelagerten allgemein gültigen Analyseverfahren zu gewährleisten. Da insbesondere die Positionsdaten in diversen unterschiedlichen Formaten vorlagen, wurde im ersten Entwicklungsschritt die Projektion der Daten auf ein einheitliches Koordinatensystem sichergestellt. Zudem wurden in diesem Schritt umfangreiche Glättungsroutinen für die Daten realisiert, um dem in der Praxis häufig

auf tretenden Problem fehlender oder falsch verorteter Positionen zu begegnen.

Bemerkung: Die hier verwendete Verarbeitungskette galt gleichermaßen für die Magnetikdaten wie für die Sedimentecholotdaten.

## 1.2 Verfahrensbeschreibung Magnetik

### Datenglättung / Dateninterpolation

Was die Magnetik-Sensorsysteme angeht, kamen im Projekt SOAM sowohl Horizontal- und Vertikalgradiometer als auch Totalfeldsensoren (einzeln oder als festes Array mit bis zu acht Sensoren) zum Einsatz, deren Daten mittels verschiedener Vorverarbeitungsfilter zur erwähnten Vereinheitlichung, Rauschunterdrückung und der Erhöhung des Nutzsignalanteils belegt wurden. Ein weiterer Verarbeitungsschritt bestand in der Interpolation der entlang der gefahrenen Spuren eingemessenen Punkte, um ein geordnetes 2D-Datengitter zu erzeugen. Zur Veranschaulichung dieses Verarbeitungsschrittes sei auf Abbildung 2 verwiesen, welche oben eine Reihe typischer Magnetik-Messspuren zeigt, auf welche – mittig gezeigt - eine auf einem variablen Suchradius basierende lokale Interpolation und schließlich – unten gezeigt - die vollständige Interpolation des entsprechenden Messgebietes erfolgte. Aufgrund der sehr hohen Zeitkomplexität dieses Verfahrens wurden dessen Berechnungskerne durch Verwendung von CUDA massiv parallelisiert, d.h. auf eine leistungsfähige Grafikkarte exportiert

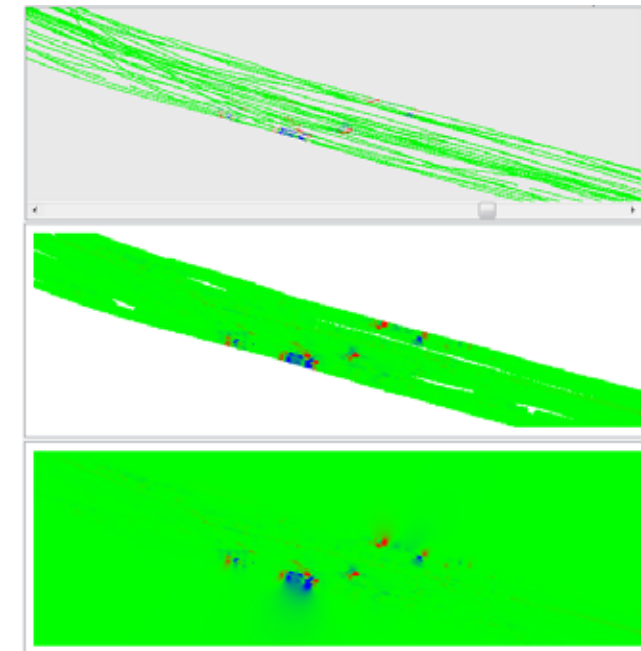


Abbildung 2: Magnetik-Fahrspuren sowie mit Suchradius bzw. vollständig interpolierte Daten zur Analyse-vorbereitung



Ergänzend zu diesem zweidimensionalen Interpolationsverfahren der Magnetikdaten wurde auch die Möglichkeit der eindimensionalen, fahrspurbasierten Analyse implementiert, um mittels dieser den exakten Verlauf einer magnetischen Signatur untersuchen zu können.

Bemerkung: Prozessbedingt steht letztere nach einer 2-dimensionalen Interpolation nicht mehr zur Verfügung.

In Abbildung 3 (unten) ist exemplarisch der interpolierte Einzelverlauf einer Fahrspur (oben farbiger markiert) gezeigt.

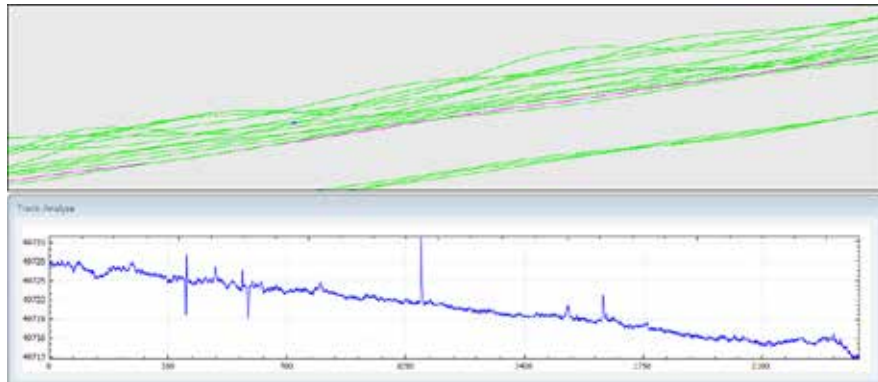


Abbildung 3: Einzeltrackanalyse der im oberen Abbildungsabschnitt farbiger hervorgehobenen Fahrspur

### Anomalie-Hervorhebung / Detektion mittels neuronaler Strukturen

Auf die interpolierten Daten wurden zur Detektion potentieller Objektsignaturen verschiedene (schwerpunktmäßig CI-basierte) Analyse-Methoden angewendet, welche zum Teil aus der Objektdetektion mittels Bodenradar und landbezogenen Magnetsensoren stammen [1][2][3][4]. Die Stärke dieser CI-basierten Verfahren liegt dabei darin, dass ihre Struktur und Verarbeitungsmechanismen der (teils aufmerksamkeitsgesteuerten) visuellen Perception der unteren retinalen Bereiche nachempfunden wurde, wobei vor allem Bohlmann [5] jüngst nachweisen konnte, dass die physiologischen Grundlagen dieser Perception in situ durch neuronal basierte Selbstorganisationsprozesse belegbar ist.

Im Gegensatz zu den später beschriebenen überwachenden lernenden Detektoren benötigen diese selbstorganisierenden Verfahren keine Lern- und Solddaten, sondern erkennen und elaborieren aus einer gegebenen Bildstruktur automatisch auf höchst sensible Art die Bildbereiche, welche sich strukturell von einer mehr oder weniger hintergrundbezogenen Information abheben. Es ist dann auch genau diese Eigenschaft, welche sie für die im Projekt

SOAM vorliegende Aufgabenstellung der „Spot-Aufdeckung“ bzw. „Spot-Markierung“ mittels einer automatisierten Datenseparierung, d.h. Auffälligkeitsdetektion bzw. Anomalieerkennung prädestiniert. In Abbildung 4 ist eine solche Anomalieerkennung mittels des umrissenen CI-Verfahrens gezeigt. Im oberen Teil der Abbildung sind die ursprünglichen Fahrspuren vor und nach deren 2D-Interpolation gezeigt, während im unteren Teil der Abbildung zwei Ergebnisse des Anomalie-Detektors mit verschiedenen gewählten Empfindlichkeiten des Verfahrens visualisiert sind.

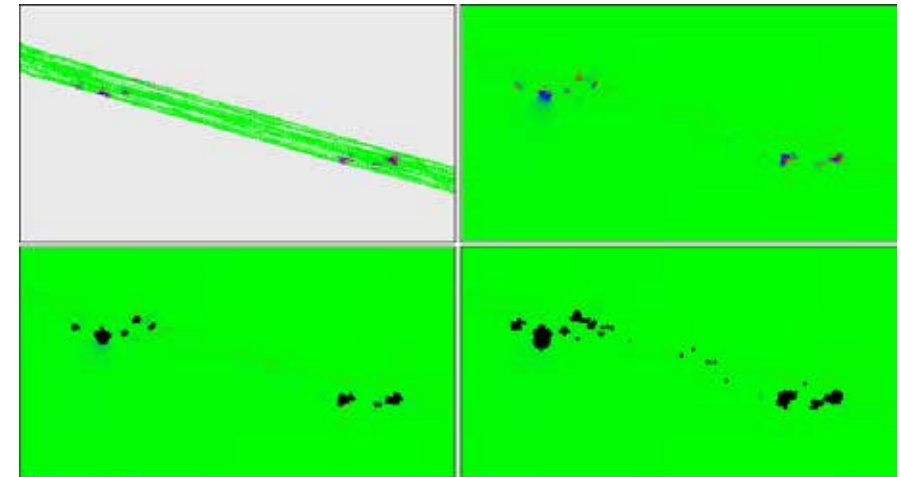


Abbildung 4: Fahrspuren (oben links), deren Interpolation (oben rechts) sowie Anwendung des Anomalie-Detektors mittels zweier verschiedener Sensitivitätsstufen (unten links und rechts)

Es ist diesen CI-Verfahren zu eigen, bzw. es zeichnet sie aus, dass abhängig von der Wahl ihrer rezeptiven Feldgrößen kleinere Signaturen und damit tatsächliche Objekte hervorgehoben werden, wohingegen größere Anomalien, wie sie z. B. durch geologische Strukturen erzeugt werden, ignoriert werden. Abbildung 5 zeigt einen solchen Fall, hier werden die umfangreichen großflächigen Signaturen, hervorgerufen durch geologische Strukturen, durch Wahl eines geeigneten rezeptiven Feldes unterdrückt und nur jene Signaturen hervorgehoben, die tatsächlich einen detektionsrelevanten Ursprung haben, wie ein Vergleich mit den zugehörigen Objektlisten aus der entsprechenden Bergungsmission gezeigt hat.

Es bleibt damit festzuhalten, dass auch die im Verbundprojekt SOAM bearbeitete Problematik mittels CI-basierter Verfahren bearbeitet werden kann, also selbstorganisierende Verfahren dazu genutzt werden können, anhand von durch ein AUV erhobene Sensordaten aufgabenorientierte Aufmerksamkeitsfoki bzw. problemorientierte Darstellungen von Datenstrukturen als Vor-

verarbeitung für andere Filter und Detektoren zu definieren. Auf Grundlage dieser Darstellungen ist es ferner möglich, Auswahlprozesse für Trainingsmuster für hierarchisch höhere Detektionsverfahren - z. B. für überwachtes lernende Neuronale Netzstrukturen – auszulegen, um besonders im Fall eines ungünstigen S/N-Verhältnisses noch eine Objektdetektion zu ermöglichen.

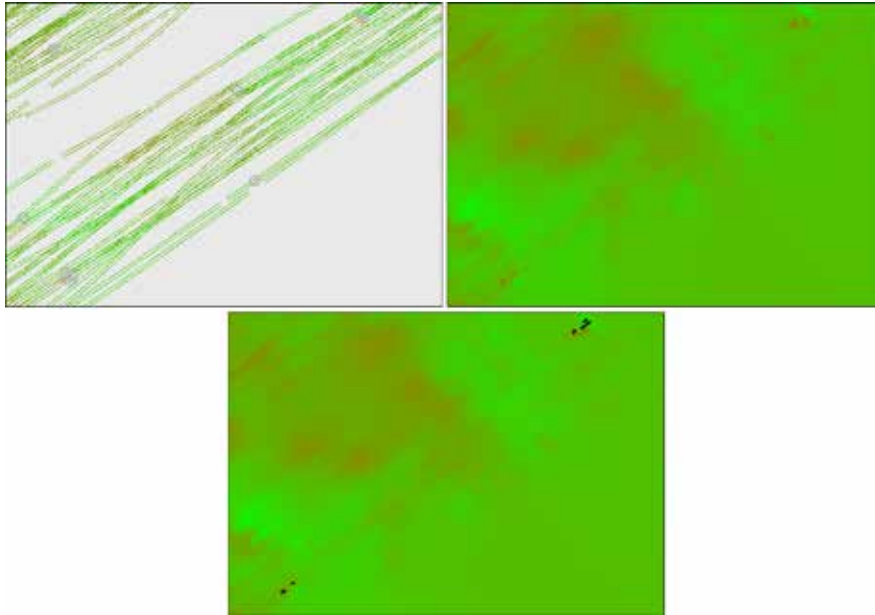


Abbildung 5: Fahrspuren (oben links), deren Interpolation (oben rechts) sowie Anwendung eines Anomalie-Detektors bei vorliegenden geologischen Strukturen (unten)

### Anomalie-Hervorhebung / Detektion mittels Differenz-Leistungs-Spektren

Ein weiteres Verfahren, welches in der Lage ist, Signaturen für den eigentlichen Auswertungsvorgang so vorzubereiten, dass automatisiert und effektiv „uninteressante“ Informationsanteile wie z. B. geologische Strukturen eliminiert werden, ist das Verfahren der sogenannten adaptiven Differenz-Leistungs-Spektren (DLS) [6][7]. DLS-Algorithmen dienen seit vielen Jahren in der automatisierten Systemsteuerung dazu, niederfrequente Informationsanteile von hochfrequenten Informationsanteilen zu separieren, um beide – wiederum aufgabenbezogen – ggf. getrennt zu verarbeiten. Im Gegensatz zu anderen Standardverfahren sind DLS-Strukturen dabei sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich (wechselseitig) anwendbar und bedingt durch ihre simple numerische Struktur nicht nur äußerst robust sondern auch höchst parallelisierbar und damit äußerst performant. Zudem erlauben sie durch ihre

parametrierbare Struktur ebenfalls die Definition von rezeptiven Feldern (und zwar im Ein- wie im Zweidimensionalen), was ihre Anwendung im Projekt SOAM nahelegte.

Die Anwendung von DLS-Algorithmen auf Magnetikdaten ermöglichte es im Projekt SOAM, lokale Signaturanteile in den Datensätzen herauszuarbeiten und globale Trends sowie geologische Strukturen und messbedingte globale Schwankungen zu unterdrücken, beispielhaft gezeigt an einer Fahrspuranalyse in Abbildung 6. In der Abbildung ist der ursprüngliche Datenverlauf der Messung blau dargestellt, während der rote Verlauf das „bereinigte Signal“ darstellt. Wie gut zu erkennen ist, gelang es mittels der DLS-Struktur, das gewünschte Nutzsignal klar herauszuarbeiten, und damit eine erhöhte Detektionssicherheit zu gewährleisten.

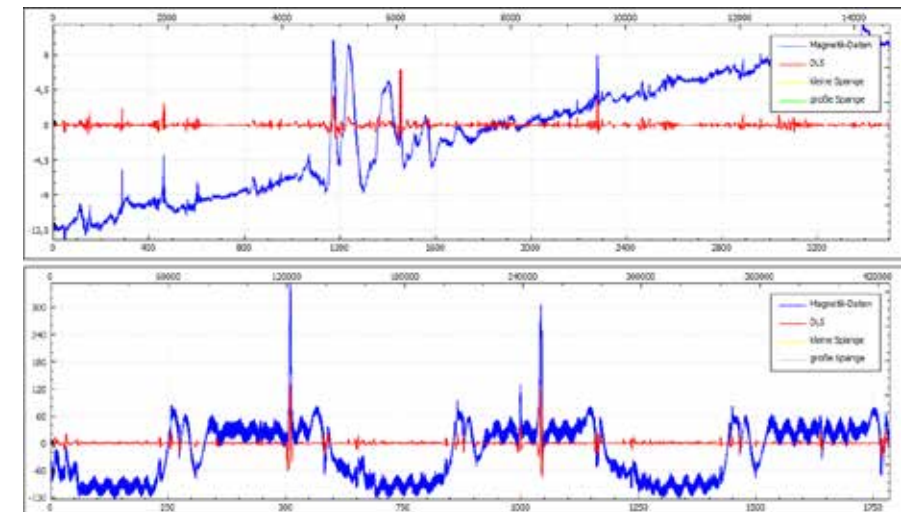


Abbildung 6: Trendbereinigung und Verbesserung des Nutzsignals durch DLS-Filter

Die Anwendung des DLS-Verfahrens bzw. des DLS-Filters auf interpolierte 2D-Daten ist in Abbildung 7 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung – wie gehabt - die Fahrspuren sowie deren Interpolation, durchsetzt mit deutlichen geologisch bedingten Signaturen. In der Mitte der Abbildung sind die bereinigten Daten nach Anwendung des Filters dargestellt, während im unteren Teil der Abbildung das Ergebnis des auf diese Daten angewandten Anomalie-Detektors dargestellt ist. Wie man erkennt, werden relevante Magnetsignaturen signifikant herausgearbeitet, welche – wie im Experiment der Vergleich mit zugehörigen Objektlisten zeigte – auf die potentiellen Objekte zurückzuführen sind.

Bemerkung: Die in der Abbildung dargestellten Kreise im oberen Teil beziehen sich auf Positionen potentieller Objekte, von denen aber die meisten auf „geologischen Strukturen“ basieren. Lediglich die vom Anomalie-Detektor nach Anwendung des DLS erkannten Positionen sind im Sinne der Munitionsdetektion tatsächlich von Interesse.

### Objektdetektion mittels überwachter MLFF-Netzstrukturen

Neben dem selbstorganisierenden Verfahren zur Anomalie-Detektion wurden im Projektverlauf auch überwachte lernende neuronale Netze verwendet und hier speziell sog. Multilayer Feed Forward Netze (MLFF-Netze). Die MLFF-Netze wurden dabei daraufhin trainiert, in den (2-dimensionalen) Signalverläufen als relevant definierte Signaturen aus dem Hintergrund heraus zu detektieren sowie von anderen – als nicht relevant definierten - Signaturen zu unterscheiden. Anders als bei den bisher beschriebenen Verfahren benötigen diese Netze für diese Relevanzabstimmung während ihrer sog. Trainings- bzw. Konditionierungsphase ausgewählte Datensätze, welche eben diese Relevanzbestimmung anhand von Beispielen definiert, d.h. dem entstehenden Detektionsalgorithmus quasi sagt, zu welcher Klasse („relevant“, „nicht-relevant“) ein präsentierter Bildausschnitt gehört. Da es nun aber den Standardfall von relevanten bzw. nicht-relevanten Signaturen nicht gibt, mussten die MLFF- Netze anhand von umfangreichen, aus vielen Magnetik-Messungen zusammengestellten Lerndatenmengen in die Lage versetzt werden, ihre innere Detektionsstruktur so anzupassen, dass sie nach ihrer Konditionierung nicht nur die präsentierten, sondern auch unbekannte (aber den vorgegebenen Relevanzklassen in der Struktur gleichenden) Signaturen korrekt zuordneten, um zuverlässig potentielle Objekte zu detektieren.

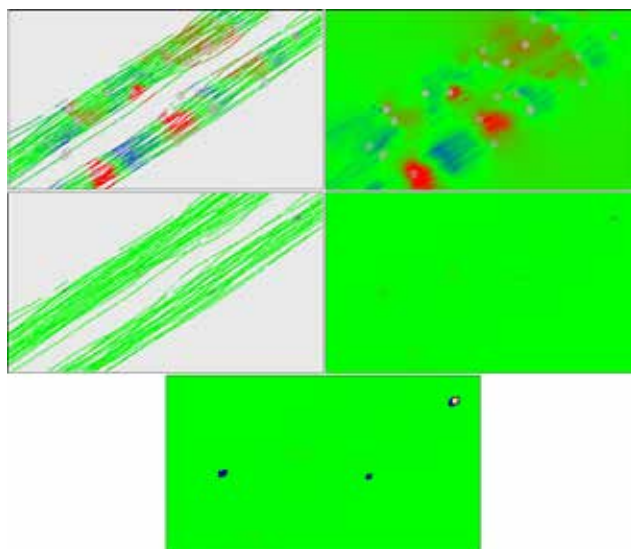


Abbildung 7: Totfelddaten vor (oben) und nach DLS-Filter (Mitte) sowie nachfolgend angewandter Anomalie-Detektor (unten)

Der Vorteil dieses – im ersten Ansatz eher komplex erscheinenden - Verfahrens ist dabei, dass die Detektionsgüte mit wachsender Trainingsdatenmenge ansteigt, sprich, ein so ausgelegtes System mit der Zeit immer exakter/ erfolgreicher im Feldeinsatz agiert.

In Abbildung 8 sind zwei Beispiele des Agierens eines solch ausgelegten und konditionierten MLFF-Netzes gezeigt. Links und mittig sind in der Abbildung wiederum die Fahrspuren bzw. deren Interpolation gezeigt, während rechts - als kleine Kreise markiert - jene Positionen dargestellt sind, an denen das Netz Objekte detektiert hat.

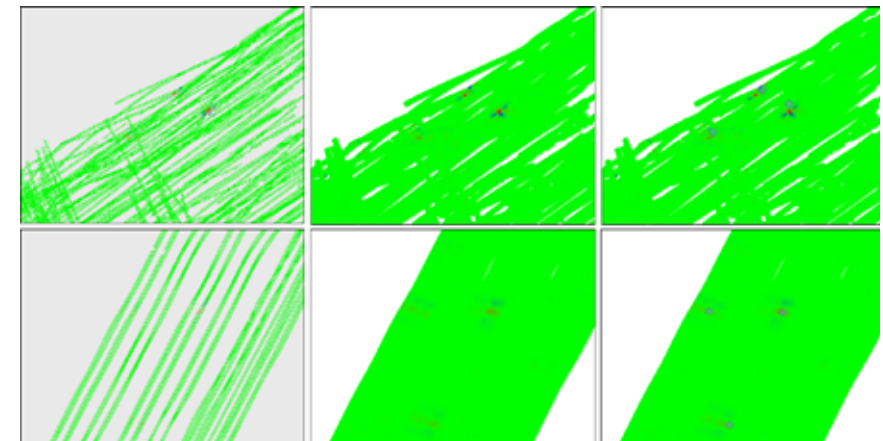


Abbildung 8: Objektdetektion durch Neuronales MLFF-Netz: Fahrspuren (links), Interpolation (Mitte) und Positionsmarkierung (rechts)

### 1.3 Verfahrensbeschreibung Sediment-Echolot

Der zweite Hauptsensortyp, welcher dem Projekt SOAM zur Verfügung stand, war das Sediment-Echolot. Das Sediment-Echolot zeichnet sich dabei vor allem dadurch aus, dass seine akustischen Signale in der Lage sind, mehrere Meter in den Meeresboden einzudringen, wobei aber - anders als bei den magnetischen Verfahren - nunmehr potentielle Objekte im aber auch direkt auf dem Meeresboden in den Datensätzen als Reflexionshyperbeln erscheinen. Damit verlagerte sich die Hauptaufgabe der Detektion und der Positionsbestimmung derart, dass nun die zuverlässige Detektion von Hyperbeln bzw. hyperbelartigen Strukturen und die Identifikation derer Aufpunkte für die Positionsbestimmung der potentiellen Objekte sichergestellt/vollzogen werden muss.

#### Datenglättung/Dateninterpolation

Ähnlich wie die Magnetikdaten unterliegen auch die Messdaten der Sedimentecholote zunächst einer umfangreichen Vorverarbeitung, um Störungen



zu eliminieren, das S/N-Verhältnis zu optimieren und vorhandene Hyperbelanteile bestmöglich herauszuarbeiten. Da auch auf diesem Gebiet im Laufe des Projektes umfangreiche Daten mittels verschiedener Sensorkonfigurationen erhoben wurden und diese unterschiedlichen Parametrisierungen unterlagen, wurde zunächst ihre vereinheitlichende Skalierung notwendig, um dann mittels einer adäquaten Normierung der Hyperbelanteile bzgl. ihrer Dimensionierung eine neuronale Analyse zu ermöglichen. Zudem war es notwendig, mittels spezieller Vorverarbeitungsroutinen/Vorverarbeitungsfilterschiffsbewegungsbedingte (durch das Stampfen des Schiffes hervorgerufene) Informationsanteile in den Datensätzen zu identifizieren und möglichst vollständig zu eliminieren. Dieser Bereinigungsverfahren bedingte, dass die diese Bewegung kodierenden Informationen während der Messung aufgezeichnet und im Filterverfahren berücksichtigt wurden. Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Anwendung einer solchen sog. ‚Heave Correction‘. Während linksseitig in der Abbildung deutlich der Einfluss einer Schiffsbewegung als Schwingung zu erkennen ist, sind rechtsseitig die weitestgehend korrigierten Daten mit einem nunmehr geglätteten Verlauf der Meeresbodenoberfläche sowie der darunter liegenden Strukturen gezeigt.

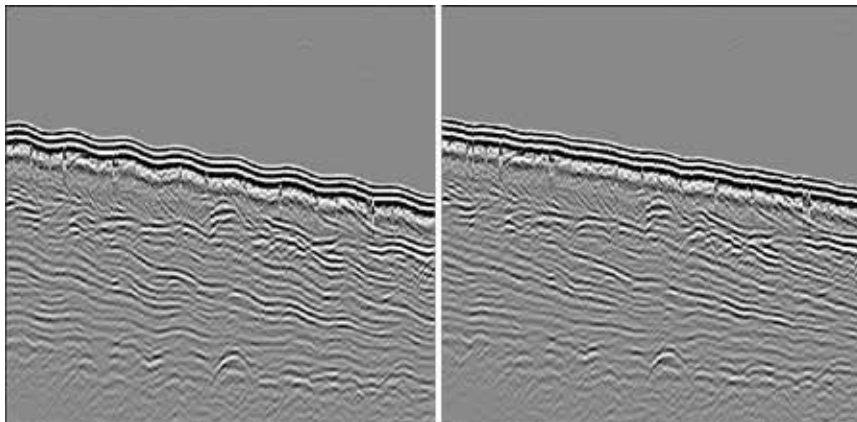


Abbildung 9: Heave Correction zum Herausrechnen der Schiffsbewegung

### Eliminierung von Bodenreflexionseinflüssen

Ein weiteres Problem bei Sedimentecholotbasierten Messdaten ist die Maskierung relevanter Datenanteile durch die starke erste Bodenreflexion sowie deren multiple Echos. Insbesondere solche Objekte, welche in unmittelbarer Nähe des Meeresbodens liegen, werden durch diese Echos derart maskiert, dass der Verlauf von Reflexionshyperbeln erheblich gestört ist, was deren Detektion und anschließende Analyse nicht nur erschwert, sondern oft sogar unmöglich macht. Mittels eines speziellen – wiederum den Prinzipien der retinalen Perzeption folgenden - Filters ist es jedoch möglich, zunächst

den mehr oder minder globalen Verlauf des Meeresbodens zu ermitteln, um anschließend Teile dieser Bodenreflexionsinformation und deren tieferliegende Echos zu eliminieren. Voraussetzung dafür, dass dieses Verfahren zur Eliminierung von Störinformationen optimal arbeitet, ist dabei, dass Restinformationen über die Hyperbelanteile über diesen maskierenden Informationsanteilen des Datensatzes liegen, eine Hyperbelanteilrestauration ist nicht Bestandteil des hier beschriebenen Verfahrens.

Ein Ergebnis der Anwendung eines solchen Filters verdeutlicht Abbildung 10. Treten linksseitig in der Abbildung noch deutliche Meeresbodenstrukturen und deren Echoanteile auf, weist die rechtsseitige Abbildung diese im oberen Bereich unterdrückt, bzw. im unteren Echobereich gar nicht mehr auf. Zudem treten nunmehr vormals mehr im Hintergrund liegende Signaturen klarer hervor.

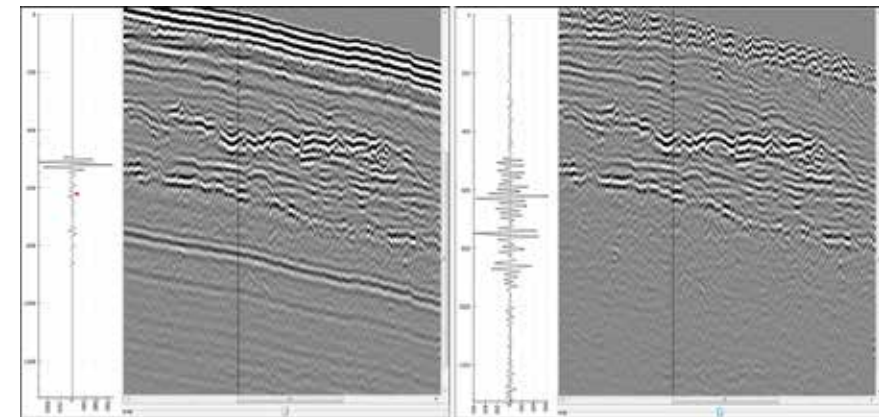


Abbildung 10: Eliminierung von Meeresbodeninformationen und dessen multipler Echos mit rezeptiver Feldstrukturen

Wie elementar die Reduzierung des Einflusses der Reflexion des Meeresbodens für eine erfolgreiche Detektion von Hyperbelanteilen und damit für die Objektdetektion sein kann, erschließt sich vor allem in den in Abbildung 11 gezeigten zwei Beispielen. Wiederum sind linksseitig nicht gefilterte Datensätze mit multiplen Reflexionen gezeigt, während rechtsseitig die bereinigten Datensätze dargestellt sind. Bedingt durch diese Bereinigung gelang es, die mehr oder minder vollständig maskierten Hyperbelanteile so herauszuarbeiten, dass die Detektion dieser Strukturen dadurch ermöglicht wurde.



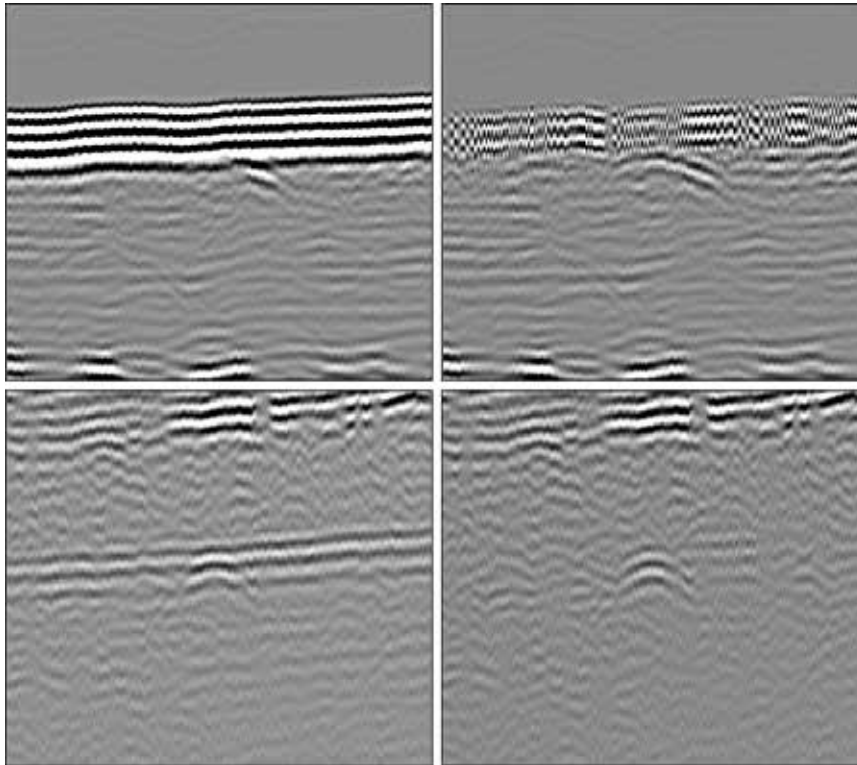


Abbildung 11: Erhöhung der Detektierbarkeit von Hyperbeln durch Eliminierung multipler Bodenreflexionen

### MLFF-Netz basierte Hyperbeldetektion

Entsprechend der Objektdetektion in den Magnetikdaten wurde für die eigentliche Detektion auch bei den Sedimentecholot-basierten Messdaten eine neuronale MLFF-Struktur verwendet. Dazu wurden – aufgabenspezifisch adäquat - einerseits normierte Reflexionshyperbeln relevanter Objekte, andererseits Muster, welche keine Hyperbeln sondern diverse Hintergrundbeispiele kodieren, in einem Lerndatensatz zusammengestellt und als Konditionierungsgrundlage verwendet.

Wie in Abbildung 12 gezeigt gelang es so, nach der Lernphase einzelne Fahrspuren dahingehend auszuwerten, dass Hyperbelpositionen detektiert, markiert und entsprechend ihrer Relevanz bewertet werden konnten (jeweils durch einen roten Kreis markiert).

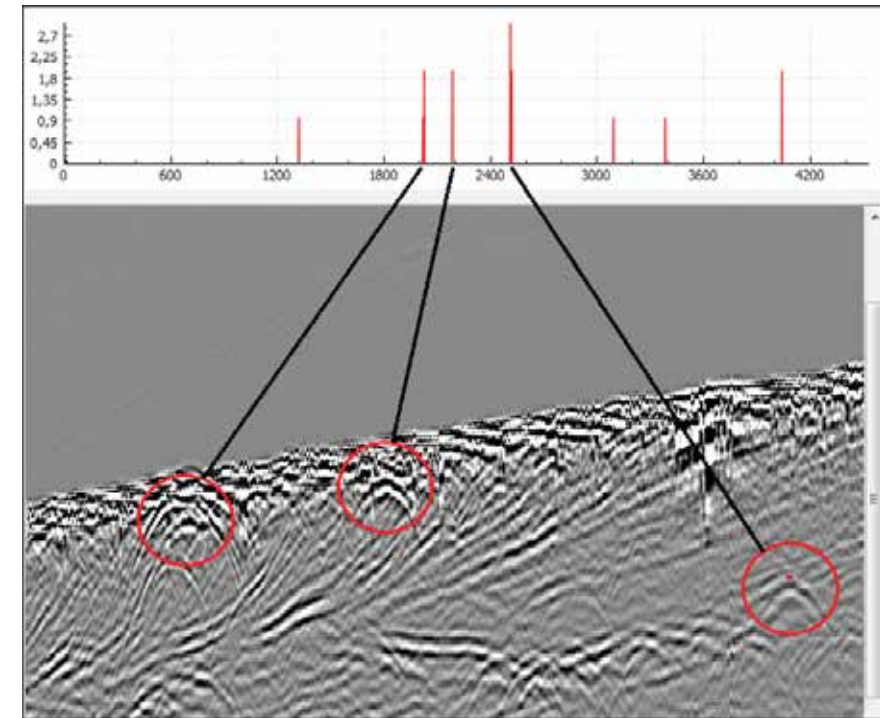


Abbildung 12: MLFF-basierte Objektdetektion

Ähnlich den bereits beschriebenen Verfahren kann die Sensitivität der MLFF-basierten Objektdetektion ebenfalls durch Wahl verschiedener Parametereinstellungen gesteuert/beeinflusst werden. So ermöglicht beispielsweise eine empfindlichere Einstellung bzgl. der Detektion von hyperbelähnlichen Strukturen, dass nunmehr Strukturanteile auch an sich nicht relevanter Objekte markiert werden. Ist andererseits das Messgebiet eng genug vermessen worden, kann die dadurch initiierte Mehrfacherkennung von Hyperbelanteilen verschiedener Fahrspuren als Verifikationskriterium herangezogen werden.

Ein solcher Fall ist in Abbildung 13 dargestellt. In dieser Abbildung markieren die drei im Bild markierten Positionen die Bereiche, an denen die Gesamtheit der in verschiedenen Fahrspuren ermittelten Hyperbelbewertungen einer gewissen Signifikanz unterliegt. Jene Markierungen, denen kein Objekt zugrunde liegt, sondern die durch eine zu empfindliche Einstellung des Detektors hervorgerufen wurden, verlieren jedoch nunmehr an Signifikanz, d.h. sie fallen aus der Endbewertung heraus.

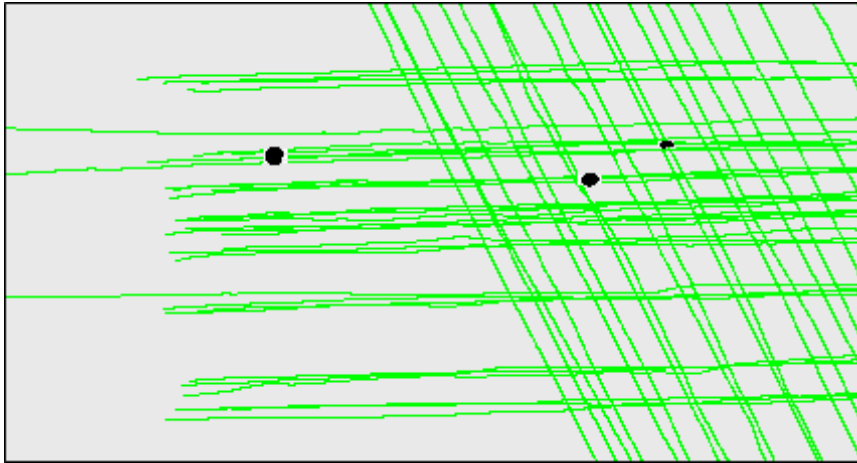


Abbildung 13: Zweidimensionale Auswertung eines Messgebietes zur Positionsbestimmung von Objekten

### Resümee

Das Projektziel, anhand verschiedener Sensorik im und auf dem Meeresboden verbrachte Munition zu detektieren und deren Lage zu referenzieren, konnte mittels der entwickelten CI-basierten Verfahren erreicht werden. Es zeigte sich dabei, dass vor allem die Überführung von biologisch begründeten Verfahrensweisen in eine algorithmische Applikation zur Rauschunterdrückung und Objektdetektion es ermöglicht, bisher scheinbar „nicht greifbare“ Kategorisierungsergebnisse zu erzielen. Eingbracht in technisches Equipment auf AUV-Basis, versprechen die Ergebnisse des Verbundprojektes SOAM daher eine Fortschreibung der Entwicklung für die maritime Technologie der nächsten Generation.

### Literatur

- [1] M. Reuter, H.H. Tadjine, S. Harneit, „Localisation and Detection of Buried Objects like Mines in Diverse Soils with Soft-Computing Methods“, 9. European Conference on Non-Destructive Testing, ECNDT, Berlin, Germany, 2006.
- [2] M.Reuter, C. Bohling, K. Hohmann, D. Scheel, G. Holl, W. Schade, „Anti Personnel Mine Detection by Laser-Induced breakdown Spectroscopy“, CLEO-Conference (Photonic Applications Systems Technologies, PhAST), 2005
- [3] M: Reuter; B. Rosendo Valez, S. Harneit, “Moisture Effects in Soils Using a Frequency Domain Metal Detector“, World Automation Congress 2006 (WAC 2006), 6th International Symposium on Soft Computing for Industry (ISSCI), Budapest, Hungary, 2006.
- [4] S. Birkenfeld: “Self-organizing significance analysis on automatically generated training data for neural networks“, Proc. of World Automation Congress WAC 2014, 10th International Symposium on Soft Computing for Industry (ISSCI), TSI Press, Waikoloa, USA, 2014
- [5] S. Bohlmann, “Über einen neuen Ansatz für die Vorverarbeitung von Bilddaten mittels Umsetzung der retinalen Informationsweitergabe in ein potentialorientiertes Neurone-Model“, Promotionsschrift, TU-Clausthal, 2015
- [6] M. Reuter, S. Bohlmann, “Automatic Detection of Buried Utilities in Georeferenced Multi-Sensor Data with Neural Networks“, TOK, Izmir, Türkei, Aug. 2011.
- [7] M. Reuter: „Frequenzdifferenzspektren als „Preprocessing Verfahren“ für neuronale Netze und klassische akustische Identifikatoren/Klassifikatoren“, in: Fuzzy-Logik, Theorie und Praxis, Hrsg.: B. Reusch, Informatik aktuell, pp. 111-118, Springer, 1994

## **MarNet – Entwicklung eines schiffsübergreifenden Navigationsdatennetzwerkes und Bereitstellung der Daten auf der Brücke und auf weiteren Systemen**

Förderkennzeichen: 03SX322

Jan Luiken ter Haseborg, Helge Fielitz (TUHH)  
Stefan Strohschneider, Sarah Möckel, Michael Brenker (FSU-Jena)  
Sven Rohde (Raytheon Anschutz GmbH Kiel)  
Karl-Christian Ehrke (WSAM Hamburg)  
Hermann Hanneken, Christian Eilers, Frank Norda  
(MEYER WERFT Papenburg)

### **Zusammenfassung**

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Konzeptes für ein neuartiges schiffsweites redundantes Netzwerk. Es soll die Brücke mit den wichtigsten Stationen mit nautischem Bezug verbinden und in einem Demonstrator realisiert werden. In diesem Netzwerk sollen an beliebigen Stellen die unterschiedlichsten Informationen wie z.B. Überwachungs- und Kamerasignale sowie Steuer- und Sensorsignale eingespeist werden, verbunden mit der Möglichkeit der Schiff-Land-Kommunikation. Besonders hervorzuheben ist die Realisierung und Integration einer Notbrücke. Diese Notbrücke kann z.B. gemäß den Anforderungen im Rahmen der IMO-Forderung „Safe-Return-to-Port“ ausgelegt werden.

Dieses Konzept eröffnet die Option navigatorische Funktionen, die ursprünglich auf der Brücke angesiedelt und auf die Brücke begrenzt waren, in andere Bereiche des Schiffes zu verlagern und im Notfall zu aktivieren und von außerhalb der Brücke die Funktionen zu kontrollieren und zu bedienen. Damit wird ein entscheidender Beitrag zur Steigerung der Schiffssicherheit in kritischen Situationen geleistet.

### **Einleitung**

In dem Verbundforschungsvorhaben MarNet geht es u.a. um die Entwicklung und Realisierung eines schiffsweiten Netzwerkes, in das an beliebigen Stellen auf dem Schiff Signale aus dem Navigationsbereich sowie Sensorsignale eingekoppelt werden können. Bei dieser Aufgabenstellung soll die IMO-Forderung „Safe-Return-to-Port“ Berücksichtigung finden. Das Teilprojekt des Instituts für Messtechnik (EMV) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) im Rahmen von MarNet ist in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern MEYER WERFT (Kordinator),

Papenburg, Raytheon-Anschütz, Kiel, Wärtsilä (ehemals SAM), Hamburg und der Universität Jena bearbeitet worden.

Die im Rahmen dieser Zusammenarbeit von der TUHH bearbeiteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

- Schiff-Land-Datenkommunikation unter Berücksichtigung der Mehrwegeausbreitung und Frequenzdiversity
- Anbindung von Automations- und Navigationssystemen an das schiffsweite Netzwerk
- Passive Personenlokalisierung mit einem drahtlosen Sensornetzwerk

werden im Folgenden kurz dargestellt.

### **Schiff – Land – Datenkommunikation unter Berücksichtigung der Mehrwegeausbreitung und Frequenzdiversity**

In Umgebungen mit ausgedehnten metallischen Strukturen, z. B. Hafenanlagen mit Containerbrücken, Containern und Schiffen, treten komplexe Mehrwegeeffekte bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Signalen auf. Neben dem direkten Ausbreitungspfad zwischen Sender und Empfänger existiert mindestens ein weiterer, durch Reflexion an umliegenden Strukturen hervorgerufener Ausbreitungspfad. Am Empfänger überlagern sich diese Signalkopien, was durch Interferenz zu Auslöschungen führen kann. Im Rahmen des Projektes wurde ein Messsystem entwickelt und aufgebaut, mit dem die einzelnen Reflexionspfade aufgelöst nach der Laufzeit des Signals dargestellt werden können. Mehrere Messkampagnen im Hamburger Hafen haben eine gute Datenbasis für die Funkausbreitung in Hafengebieten geliefert. Basierend auf diesen Daten wurde ein Raytracing – Algorithmus entwickelt, mit dem die Funkausbreitung in beliebigen reflektiven Umgebungen am Computer simuliert werden kann. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer exemplarischen Messung. Um in dieser komplexen Ausbreitungsumgebung eine zuverlässige Datenübertragung zu realisieren, wurden zwei grundlegende Verfahren untersucht:

Das erste Verfahren basiert auf Frequenzdiversity. Die Information wird synchron auf zwei unterschiedlichen Frequenzen übertragen. Durch geeignete Wahl des Frequenzpaares kann ausgeschlossen werden, dass die Orte mit destruktiver Interferenz deckungsleich sind.

Das zweite Verfahren verwendet adaptive Richtantennen auf Sender – und Empfängerseite. In den Messkampagnen konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Richtantennen zu einer massiven Verbesserung der Übertra-

gungsleistung geführt hat. Die Datenrate der Übertragung konnte deutlich erhöht werden bei gleichzeitiger Reduzierung der Latenz der Verbindung. Da es sich bei der Datenübertragung zwischen Schiffen und Landstationen nicht um herkömmliche ortsfeste Richtfunkverbindungen handelt, müssen adaptive Antennenlösungen verwendet werden.



Abbildung 2: Messung im Hamburger Hafen

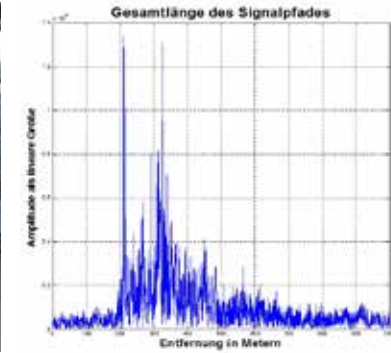


Abbildung 1: Ergebnis einer exemplarischen Messung

### **Anbindung von Automations – und Navigationssystemen an ein schiffsweites Netzwerk**

Die Automation moderner Schiffe ist weit vorangeschritten. Für unterschiedliche Aufgabenbereiche, z. B. die Steuerung von navigatorischer Beleuchtung, liefern die Hersteller Lösungen, die intern proprietäre Bussysteme zur Steuerung verwenden. Häufig ist dabei eine zentrale Architektur vorgegeben, d. h. es gibt ein Steuerpanel, über das die unterschiedlichen Geräte und Systeme angesteuert werden. Für eine Anwendung mit mehreren Bedienstellen, z. B. bei dem Einbau einer Notbrücke, ist diese Architektur nur bedingt geeignet. Eine Bereitstellung dieser Funktionalität in einem schiffsweiten Netzwerk, bei dem eine Ansteuerung unabhängig von fest installierten Konsolen möglich ist, bietet eine Lösung für dieses Problem. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Schnittstellenlösung konzipiert und aufgebaut, mit der diese in sich geschlossenen Systeme um eine Anbindung an das schiffsweite Netzwerk erweitert werden können.

### **Passive Personenlokalisierung mit einem drahtlosen Sensornetzwerk**

In klassischen Sensornetzwerken erfolgt eine drahtgebundene Anbindung der Sensoren an eine Basisstation, die eine Auswertung und Verarbeitung der Messdaten übernimmt. In Anwendungsbereichen, in denen eine Installation von Kabelstrecken nicht sinnvoll ist, können drahtlose Sensornetzwerke die Aufgaben der Messung und Übertragung der Daten übernehmen. Ein drahtloser Sensorknoten besteht dabei üblicherweise aus dem Sensor, ei-



nem Mikrocontroller zur Konditionierung des Messsignals und eines Funkmoduls. Die Funktion des Funkmoduls und der Datenverarbeitung können in einem Bauteil zusammengefasst werden. Über eine dem Einsatzzweck angepasste Energieversorgung wird der Sensorknoten gespeist. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die passive Personenlokalisierung mit Hilfe eines ggf. bereits vorhandenen drahtlosen Sensornetzwerkes untersucht. Das Funktionsprinzip basiert auf der Absorption von Hochfrequenzenergie durch den menschlichen Körper. Dazu baut das Sensornetzwerk zwischen den Knoten Funkstrecken auf und misst permanent die empfangene Signalstärke. Bei diesem passiven Lokalisationsverfahren muss die zu überwachende Person, im Gegensatz zu aktiven Verfahren, keine Geräte, z. B. Pager, mitführen. Ein maritimer Einsatz ist die Überwachung von besonders gefährlichen Schiffsbereichen, um z. B. Rettungskräfte gezielt an hilflose verunfallte Personen heranzuführen.

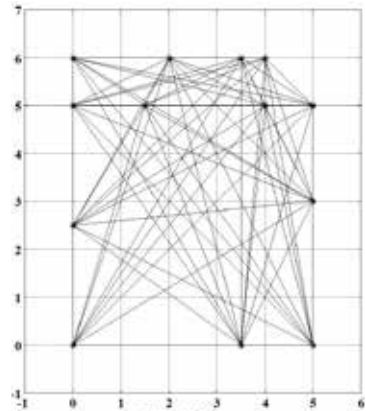


Abbildung 3: Mögliche Funkverbindungen zwischen drahtlosen Sensorknoten in einer experimentellen Messumgebung



Abbildung 4: Installation der drahtlosen Sensorknoten auf dem Windendeck des Demonstrators. Die Positionen zweier Sensorknoten sind rot markiert

## Navigationsdaten und Notbrückenbetrieb: Nutzeranforderungen und Kommunikation im Krisenfall

### Ziele des Teilprojekts

Das Teilprojekt der Forschungsstelle interkulturelle und komplexe Arbeitswelten (FinkA) der Friedrich-Schiller-Universität Jena beschäftigte sich im Rahmen des MarNet-Konsortiums mit Grundlagenforschung zur Ausstattung und Betrieb von Notbrücken („Safe-Return-To-Port“-Anforderungen des IMO) sowie, allgemeiner, mit Problemen der Kommunikation, die im Zuge der Entwicklung hin zu „remote navigation“ gelöst werden müssen. Dabei werden Brücken als komplexe soziotechnische Systeme betrachtet: Schiffssicherheit hängt nicht nur vom Vorhandensein umfassender und zuverlässiger Informationen auf der Brücke ab, sondern mehr noch vom reibungslosen Zusammenspiel zwischen Navigatoren und Brückenausstattung (sowie ggf. Lotsen und VTS). Ziele des Teilprojektes waren daher die Untersuchung der Nutzung von und des Umgangs mit Brückenequipment, die Untersuchung der notwendigen technischen Ausstattung von Notbrücken (die seitens der IMO nicht spezifiziert ist), eingehende Analysen des Kommunikationsverhaltens sowohl innerhalb von (multilingualen) Besatzungen als auch zwischen Schiff und Land sowie die Integration entsprechender Befunde in den Entwicklungsprozess und den Betrieb von Notbrücken. Dazu wurden Methoden der Sozial- und Verhaltenswissenschaften eingesetzt: Beobachtungen auf Brücken und in Simulatoren, quantitative Befragungen, Experteninterviews mit Lotsen und Navigatoren, Fokusgruppeninterviews sowie Einzelfallexperimente an Benutzeroberflächen. Die wesentlichen Befunde werden im Folgenden berichtet.

### Ausstattung und Anordnung von Notbrücken

Hinsichtlich der notwendigen Ausstattung von Notbrücken sind sich die Navigatoren erstaunlich einig: so simpel und schlicht wie möglich. Als unverzichtbar gelten lediglich die folgenden Informationen/Anzeigen:

- GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung und Seekarten,
- Radar,
- Kurs – und Geschwindigkeitsanzeige,
- VHF,

- Fenster für den Blick nach draußen,
- Wenn möglich: elektronische Seekarte (ECDIS).

Die Anbindung an das schiffsweite, redundante Datennetzwerk wurde im Rahmen des Projektes erprobt. Einen idealen Ort für die Notbrücke gibt es aus Sicht der Nautiker dagegen nicht. Lösungen, die für ein Szenario (z.B. Seeschlag) sinnvoll erscheinen, können für ein anderes (z.B. Brand im Maschinenkontrollraum) fatal sein.

### **Betrieb von Notbrücken**

Experimentelle Untersuchungen zu den physiologischen und psychologischen Konsequenzen des Notbrückenbetriebes konnten im Rahmen des Projektes aus ethischen Gründen nicht durchgeführt werden. Studien, die Interaktion und Entscheidungsfindung in „confined spaces“ in anderen Kontexten (Raumfahrt, Polarforschung) untersucht haben, lassen im Notbrückenbetrieb bereits nach kurzer Zeit erhebliche Probleme erwarten.

Unsere eigenen Untersuchungen gehen davon aus, dass im Seenotfall dem Aufbau eines gemeinsamen Lagebildes (zunächst vor allem an Bord, dann aber auch mit der see- und landseitigen Unterstützung) entscheidende Bedeutung zukommt. Dies geschieht durch verbale Kommunikation (Austausch und Abgleich der Interpretation von Informationen, Entwicklung von Handlungsoptionen, Abarbeiten von Checklisten, Koordination von Aktivitäten, usw.). Bei der Umsetzung dieser Anforderungen konnten wir erhebliche Schwierigkeiten beobachten:

- Die allgemein herrschende Vielsprachigkeit der Seefahrt führt im Nicht-Routinefall zu sehr großen Sprachschwierigkeiten. Dies gilt sowohl für die interne Kommunikation multinationaler Besatzungen als auch für die Kommunikation zwischen Schiff und Land, von Schiff zu Schiff sowie zwischen Navigatoren und Lotsen. Das geht so weit, dass kein gemeinsames Lagebild entstehen kann und technisch eigentlich vorliegende Informationen nicht adäquat wahrgenommen und verarbeitet werden können.
- Die eigentlich für diesen Zweck entwickelten Standard Maritime Communication Phrases (SMCP) werden in der Praxis nicht genutzt.
- Auf Brücken wird generell wenig kommuniziert. Das hat verschiedene Gründe (ua. Verlernen des verbalen Austauschs durch den Ein-Mann-Wachbetrieb, unterschiedliche Muttersprachen, negative Stereotype und Vorurteile), erschwert aber im Notfall das Umschalten in einen Modus hoher Kommunikationsdichte.

- Internationale Schiffsbesatzungen zerfallen oft in Subgruppen, die weder während der Arbeit noch in der Freizeit miteinander kommunizieren. Dies erschwert Kommunikation und Zusammenarbeit im Krisenfall.

### **Ship-to-Shore-Kommunikation**

Die ship-to-shore-Kommunikation wurde am Beispiel der Kommunikation zwischen Brückenbesatzungen und VTS-Operatoren in Verkehrsüberwachungsgebieten untersucht. Leitfrage war, wovon die Entstehung von Vertrauen – Voraussetzung für das Befolgen von Empfehlungen – in einem solchen Kontext abhängig ist. Dabei ergaben sich folgende wesentliche Befunde:

- Generell wird landseitiger Kommunikation eher wenig Vertrauen entgegengebracht, sie wird auf jeden Fall penibel kontrolliert.
- Die regionale Zugehörigkeit des VTS-Operators (z.B. Deutsche Bucht vs. Malakka-Straße) ist von eminenter Bedeutung.
- Der kommunikative Stil des VTS-Operators (Ansprache „auf Augenhöhe“; Angabe von Begründungen, ruhige und stressfreie Sprechweise) spielt ebenfalls eine wichtige Rolle.
- Gerade im Falle internationaler Kommunikation zwischen Schiff und Land, wird eine allein auf standardisierten Prozessen und Routinen beruhende Kommunikation häufig als nicht ausreichend wahrgenommen.

### **Fazit**

Unsere bisherigen Ergebnisse lassen uns am Konzept der Notbrücke, wie es im Rahmen von Safe-Return-to-Port diskutiert bzw. vorgeschrieben ist, grundlegend zweifeln: Die zum Einsatz der Notbrücke führenden Szenarien machen ein komplexes Notfallmanagement erforderlich von dem die Notbrücke bestenfalls einen Teil darstellen kann. Die Notbrücke selbst ist eine statische Antwort auf ein dynamisches Problem. Daneben stellt sich die Frage, ob es die optimale Ausstattung einer Notbrücke geben kann oder ob deren Benutzbarkeit stark von der gegebenen Situation sowie dem anwesenden Personal abhängig ist: Unsere Beobachtungen im Feld sowie im Simulator sprechen dafür, dass Schiffsoffiziere je nach Alter, Nationalität und Erfahrung andere Präferenzen der Informationssammlung und -verarbeitung an den Tag legen. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass die Evaluierung alternativer Konzepte zur Notbrücke vielversprechende Perspektiven bietet, insbe-

sondere hinsichtlich eines flexiblen Notfallmanagements an Bord. Mögliche Alternativen, die sich aus unserer Sicht ergeben sind unter anderem mobile Endgeräte.

## Verteilte Applikationen und Systeme in der Schiffsbrücke

### Motivation

Traditionell wurde die Software für die Arbeitsstationen einer Schiffsbrücke mit einer monolithischen Architektur realisiert (ARPA, ECDIS, Conning). Dies bedeutet, dass von der Verarbeitung der Sensorschnittstellen bis zur Visualisierung auf der grafischen Benutzerschnittstelle (HMI) alles in einer Anwendung zusammengefasst wurde.

Die Folge ist, dass viele gemeinsame Funktionen mehrfach in der Brücke umgesetzt sind und in der Folge die Datenkonsistenz über mehrere Arbeitsstationen nur schwer zu realisieren ist. Die Einführung der Netzwerktechnologie hat bisher nur dazu geführt, dass zur Realisierung von Integrierten Brückensystemen (IBS) in der Regel nur ein begrenzter Datenaustausch in die bestehenden Systemanwendungen implementiert wurde.

Neue durch die IMO geforderte Systemkonzepte wie die IEC 61924 (INS Performance Standard) verlangen eine neue Architektur der Anwendungen auf der Schiffsbrücke, damit u.a. folgende Konzepte sinnvoll realisiert werden können:

- Einheitliche Sensordatenverarbeitung im Consistent Common Reference System (CCRS)
- Einheitliches Targetmanagement für korrelierte ARPA und AIS Targets
- Einheitliches Handling von Alerts im Central Alert Management
- Einbindung weiterer Sensoren und Subsysteme über die klassische Navigation hinaus (z.B. Automation, CCTV)

### Konzepte für Architektur

Aus dieser Motivation sind in MarNet auf unterschiedlichen Ebenen Konzepte für neue Architekturen evaluiert worden. Dies waren Technologien für die Anbindung von funktionalen Komponenten an eine abgesetzte Benutzeroberfläche, für die Zerlegung der monolithischen Anwendungen zu einer ech-

ten vernetzten Applikation und Muster für die Anbindung von Subsystemen, die proprietäre Protokolle oder Schnittstellen eines anderen Standards nutzen (z.B. CAN-Bus, MODBUS, u.ä.).

### Abgesetzte Benutzeroberflächen (HMI)

Abgesetzte Benutzeroberflächen lassen sich grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen erreichen. Einmal kann das HMI mit einer funktionalen Komponente über ein definiertes Protokoll über das Netzwerk kommunizieren, in dem anderen Fall werden das Display und die Eingabegeräte eines Rechners über ein geeignetes Standardprotokoll zu einer Bedienstation exportiert.

Für den erstgenannten Fall wurde ein Ansatz gewählt, bei dem das HMI in einem HTML5-fähigen Webbrowser dargestellt wird. Dies hat den Vorteil, dass keine spezielle Software auf der Bedienstation installiert werden muss; sie wird als Webanwendung beim Aufruf im Browser durch die Serverkomponente ausgeliefert. Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für HMI-Anwendungen, die vor allem der Anzeige dienen und nur eine eingeschränkte Bedienung zulassen.

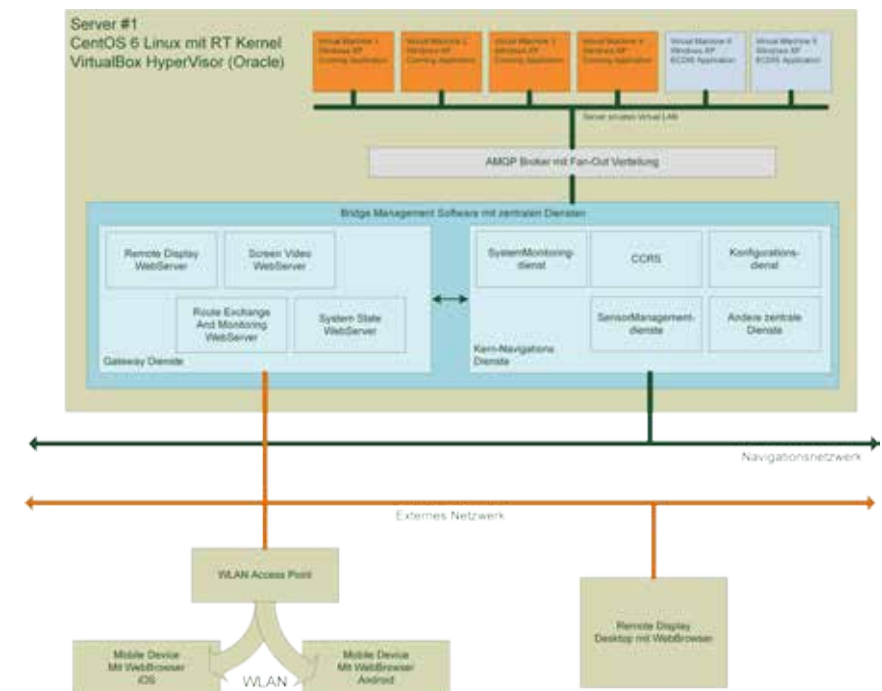


Abbildung 5: Architektur mit virtualisierten Anwendungen und Webservices

Der zweite Fall hätte grundsätzlich den Nachteil, dass hierfür zwei Rechner notwendig sind. Zudem lassen sich in der Regel nur 1:1-Verbindungen in diesem Szenario umsetzen, da nur das Display und die Eingabegeräte aus der Ferne bedient werden (z.B. über das Microsoft® Remote Desktop Protokoll). Als Lösung hierfür wurde das Konsolidieren mehrerer Rechner als virtuelle Maschinen auf einem Server erprobt. Diverse kommerzielle als auch Open Source Virtualisierungsprodukte stehen hier zur Wahl und wurden verglichen. Der Zugriff auf eine virtualisierte Arbeitsstation erfolgt dann üblicherweise über eine Remote Desktop Verbindung via RDP-Protokoll. Für anspruchsvolle Grafikanwendungen sehen einige Hersteller von Virtualisierungslösungen auch optimierte Verfahren vor (z.B. Horizon View® von VMWare).

Beide Architekturansätze lassen sich auch kombinieren, um einen idealen Kompromiss zwischen Flexibilität und Hardwareeinsatz zu finden.

### Vernetzte und verteilte Applikationen & Sensoren

Um die Architekturansätze aus dem vorangegangenen Abschnitt sinnvoll mit Leben zu füllen, ist es notwendig, die bisher monolithischen Anwendungen in Sammlungen von funktionalen Komponenten herunterzubrechen, die über klar definierte Datenschnittstellen verfügen. Da herkömmlichen Client/Server-Architekturen vor allem in Bezug auf Ausfallsicherheit hier schnell an Grenzen stossen, wird als Architekturmuster das sogenannte Publish/Subscribe-Pattern verwendet. Dies bildet eine strukturierte Datenwolke ab und macht den Datentransfer für die funktionalen Komponenten transparent. Im Rahmen von MarNet sind für dieses Architekturmuster unterschiedliche Middleware-Systeme wie AMQP, ZeroMQ und das standardisierte DDS erprobt worden. Soll zwischen Systemen unterschiedlicher Hersteller eine Kommunikation realisiert werden, bieten sich bestimmte Teile der neuen IEC 61162-450 an, die es erlaubt, vergleichbare Muster umzusetzen.

Eine solche Architektur erleichtert ebenfalls die Integration von Sensoren, die Daten- und Steuerschnittstellen bieten, die nicht den gängigen Standards von Navigationssystemen entsprechen, z.B. Navigationslichter, steuerbare CCTV-Kameras, Suchscheinwerfer, Scheibenwischsysteme. Die Integration soll unter anderem die Anzahl der unterschiedlichen Steuerpulte in den Brückenkonsolen reduzieren und auch durch die funktionale Integration mit dem Navigationssystem höherwertige Funktionen realisieren (z.B. automatisches Nachführen von Kameras und Suchscheinwerfern auf Landmarken über das HMI der ECDIS).

Kleine ausgelagerte Komponenten auf kleinen und günstigen Feldrechnern realisieren die hardwareseitige Anpassung der Schnittstelle und die logische

Interpretation des Protokolls. Von dort aus können dann Daten und Funktionen in der verteilten Navigationsanwendung bereitgestellt werden.

Für die MarNet Demonstration auf dem Neubau der MEYER WERFT „Anthem of the Seas“ wurde dies für die Navigationslichter, den Schiffsgong, die Suchscheinwerfer und zwei schwenkbare Kameras auf beiden Nocken gemeinschaftlich mit der TUHH realisiert.

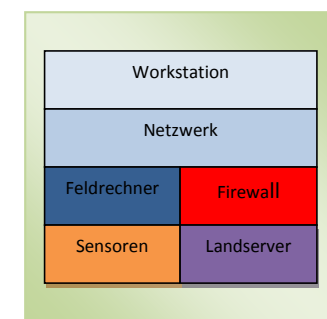
## Informationsmanagement

### Überblick

Dieses Arbeitspaket umfasste das Verarbeiten, Verteilen und Darstellen von nautischen Informationen an Bord. Die erste Verarbeitung erfolgt auf lokalen Feldrechnern. Danach werden die bewerteten Daten über das schiffsweite Netzwerk an alle Arbeitsplatzstationen verteilt. Weitere Daten von den Servern der Schifffahrts-Verwaltungen werden über Funk empfangen und ebenfalls verteilt. Die Darstellung erfolgt auf den Arbeitsplatzstationen der Brücke oder auch auf Notbrücke. Dabei wurde insbesondere eine ergonomische und taskorientierte Darstellung verfolgt. Die Anforderungen wurden anhand des e-Navigation Referenzmodells strukturiert und bewertet. Sie wurden anschließend exemplarisch für ausgewählte nautische Aufgaben in dem Demonstrator umgesetzt.

### Bewertung der Anforderungen

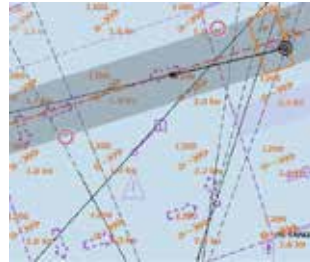
Im ersten Schritt wurden die bisherigen Ergebnisse aus den IMO Arbeiten zum e-Navigation Konzept in ein Referenzmodell übertragen. Anforderungen der Uni Jena zur Instrumentierung der Notbrücke wurden ergänzt. Aus diesen Schritten wurde das Konzept für MarNet entwickelt und anschliessend im Demonstrator exemplarisch umgesetzt





## Verarbeiten der Information

Tide-, Eis und Strömungsdaten können sehr umfangreich sein und rasch mehrere Gigabyte für einen Flusslauf wie z.B. die Elbe umfassen. Das ist für eine Funkverbindung zu viel. Deshalb wurden aus den Nutzeranforderungen Abfragemodelle entwickelt, die es erlauben, die Daten nur für eine bestimmte Position oder für einen Fahrtverlauf zu erhalten.



## Verteilen der Information

Die Navigationssensoren an Bord liefern Daten im IEC 61162 Protokoll und können leicht angeschlossen werden. Die Daten stehen an jeder Workstation im Netz zur Verfügung. Für Zusatzdaten von Land, wie Tide, Eis und Strömung, wurde eine vergleichbare Lösung entwickelt. Sie basiert auf einer Firewall, die mit dem Code einer SIM-Karte einen gesicherten VPN Tunnel zu einem Landserver aufbaut. Der Zugang dort erfolgt über einen weiteren VPN-Tunnel. Damit wird das Netzwerk an Bord zuverlässig geschützt.



## Darstellen der Information

In dem nebenstehend gezeigten Bildausschnitt ist eine der im Verlauf des Projektes erarbeiteten Darstellungen zu sehen. Bei dieser Lösung wird die sicher befahrbare Wasserfläche in der ECDIS dargestellt. Die Randlinien der Fläche werden als stark reduzierter Datensatz vom Tideserver an Land empfangen. Die gleiche Darstellung wird auch auf der Notbrücke verwendet.



## Demonstrator

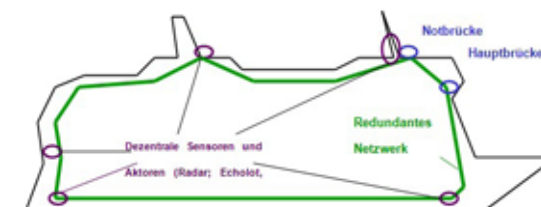
Um näher an der Praxis zu sein, wurde ein Schiff gesucht welches in flachen Gewässern operiert. Die Wahl fiel auf das MZS Neuwerk. Mit den Anwendern wurde der Anlagenumfang bestimmt. Um mehrere e-Navigation Aspekte abbilden zu können wurden zusätzlich zur vorhandenen Brücke drei ECDIS-Arbeitsplätze für Routenplanung und Monitoring eingebaut. Sie sind für den Anschluss über die Firewall und GSM an das Landnetz vorbereitet. Die Versuche mit dem BSH-Landserver beginnen in 2016.



## Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für Navigationszwecke auf Basis eines offenen Netzwerkkonzeptes

### Überblick

Die erhöhten Anforderungen an die Navigationssysteme unter anderem durch die Einführung der IMO nach „Safe Return to Port (SRtP)“ für Passagierschiffe erfordert ein hohes Maß an Redundanzen und einem neuen Sicherheitskonzept für die Navigation. Der benötigte zusätzliche Aufwand ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit für Schiffbauer wie auch Betreiber zu minimieren. Zu diesem Zwecke wurde ein Sicherheitskonzept auf Basis eines offenen Netzwerkes entwickelt. In der Grundidee führt ein redundantes Netzwerk die Daten verschiedenster Sensoren und Aktoren mit navigatorischem Bezug auf dem ganzen Schiff zusammen und stellt diese den Navigationssystemen auf der Brücke und an weiteren Orten zur Verfügung.



## Sicherheitskonzept

Im Grundsatz gilt es neben der Brücke einen weiteren Raum zu schaffen, von dem aus das Schiff bei Ausfall der Brücke z.B. durch Feuer oder Wassereintrich sicher navigiert werden kann. Dazu ergeben sich folgende Anforderungen an den Raum und dessen Ausstattung:



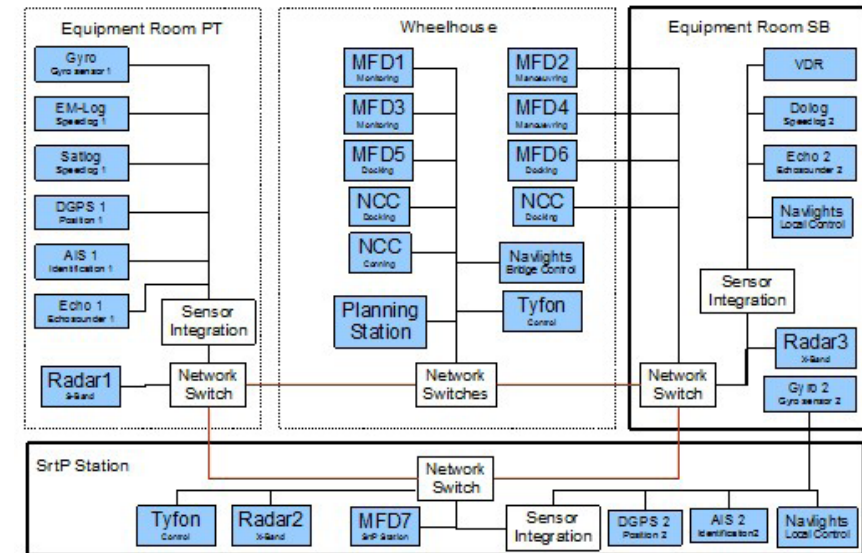
- Getrennter Raum, mindestens A0 Schottung
- Informationen von: Radar, ECDIS, AIS, Position, Kurs, Geschwindigkeit, Wassertiefe,
- Externe Kommunikation über VHF und Satcom
- Interne Kommunikation über Telefon, GA/PA bzw. UHF Walki-Talki
- Klimatisierung und Sicht nach aussen
- Redundante Verteilung von Sensorik von der Brücke auf mehrere Räume, auch weitere technische Equipmenträume mit A0 Trennung von der Brücke
- Signalverteilung in die Räume und zwischen den Räumen über Netzwerk.

Bei großen Passagierschiffen hat sich dafür ein Raum in der Nähe des Radarmastes als geeignet erwiesen. Bei kleineren Schiffen mit weniger Möglichkeiten wurde dafür z.B. die Kapitänskabine genutzt.

In beiden Räumlichkeiten sind nun navigatorische Informationen auf Multifunktionsanzeigen verfügbar.

## Systemarchitektur

Sensorik wie auch systemrelevante Komponenten sind lokal an ein Netzwerk angebunden, welches durch seine Ringstruktur über verschiedene Räume jederzeit die Informationen an den verschiedenen Orten zur Verfügung stellt. Ebenso ist eine Einbindung externer Sensoren und Datenquellen, wie bei E-Nav angedacht, einfach möglich. Das Netzwerk ist so ausgelegt, dass verschiedene Netzwerkprotokolle und Standards der Anlagenhersteller genutzt werden können. Für die funktionelle Einbindung in überge-



ordnete Multifunktionssysteme werden entsprechende Applikationen entwickelt um z.B. die Navigationslaternen oder CCTV-Kameras aus dem Conning heraus zu steuern. Damit das Netzwerk unter allen Umständen stabil funktioniert sind einige Kriterien zu erfüllen:

- gemanagter Switches für: Netzwerkfehler isolierung, Datenmengen begrenzung, Portisolierung gegen Fremdzugriff
- Kalkulation der Datenmengen/ Raten, Netzwerkanalyse und Latenzzeitkalkulation durch einen Systemadministrator

Latenzzeiten sind ein zu beachtendes Kriterium für regelnde Anwendungen z.B. Suchscheinwerfer. Dabei zeigt ein konventionelles IP basierendes industrial Ethernet ausreichend Potential um allen Anforderungen gerecht zu werden.

## Danksagung

Das MarNet - Konsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und beim Projektträger Jülich für die Förderung des Vorhabens mit dem FKZ: 03SX322

## Entwicklung von Methoden zum Berechnen des dynamischen Positionierens in der Entwurfsphase

Förderkennzeichen: 03SX326

Adele Lübcke (TU Hamburg-Harburg),  
Kay Martinsen (Flensburger Schiffbau- Gesellschaft),  
Sebastian Walter (Meyer Werft)

### 1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende in Deutschland wurde beschlossen, Windenergie künftig auch auf hoher See zu nutzen und damit den Ausbau von Offshore-Windkraftanlagen voranzutreiben. Mit diesem Ziel ist der Bereich der Offshore-Technik in den letzten Jahren enorm gewachsen. Folglich hat auch die deutsche Schiffbauindustrie ihren Fokus dahingehend erweitert, Schiffe speziell für Offshore-Operationen zu entwickeln und zu bauen. Als Beispiele sind unter anderem Wind-Service-Schiffe, Errichterschiffe und Schwergutschiffe mit ausreichender Krankkapazität zu nennen. Um die Wartung, Installation und Inbetriebnahme der Windkraftanlagen zu ermöglichen, benötigen diese Schiffstypen ein System zum dynamischen Positionieren (DP), um den Kurswinkel und die Position des Schiffes trotz äußerer Lasten mit dem eigenen Propulsionssystem zu halten. Für einen erfolgreichen Entwurf solcher Schiffe hat somit die Fähigkeit des dynamischen Positionierens als neuer elementarer Aspekt in der Projektphase von Schiffen an Bedeutung gewonnen. Dieser Punkt kann die Wahl des Antriebskonzeptes und auch den Leistungsbedarf an Bord erheblich beeinflussen und maßgebend sein.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden Verfahren vorgestellt, um die Fähigkeit des dynamischen Positionierens zu untersuchen. Dabei unterscheidet man eine statische und zeitliche Betrachtung, die in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden. Für die äußeren Lasten - Wind, Seegang und Strömung - werden für den Schiffsentwurf geeignete Verfahren mit kurzen Rechenzeiten verwendet, die ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

Für ein besseres Verständnis der DP-Operation ist die Betrachtung der Interaktionseffekte nötig, die durch die Beeinflussung der Komponenten des Propulsionssystems zueinander, zum Rumpf und zur Umwelt entstehen und zu einer erheblichen Reduzierung oder auch Verstärkung der Schübe der einzelnen Propulsionskomponenten führen. Umfangreiche Ergebnisse von Modellversuchen verdeutlichen den Einfluss von Wechselwirkungen auf das dynamische Positionieren.

Weitere Interaktionen der Propulsionskomponenten sind durch seitliche Begrenzungen, wie bei Anlegemanövern an Plattformen, zu erwarten. Auch das kann als eine Fragestellung des dynamischen Positionierens aufgefasst werden. Beispielsweise wird das Verhalten der Querstrahlanlagen durch eine seitliche Begrenzung erheblich beeinflusst. Die Ergebnisse zu einem zugehörigen Modellversuch werden ebenfalls präsentiert und fließen bei Betrachtung eines solchen Manövers in die Berechnungen ein.

Im nächsten Schritt werden die vorgestellten Verfahren an einem Beispiel angewendet und mögliche Entwurfsvariationen und deren Einfluss auf die DP-Fähigkeit aufgezeigt. In die Untersuchung werden verschiedener Antriebskonzepte und die Form des Überwasserschiffes verglichen.

## 2 Methoden zur Untersuchung von DP-Manövern

Dynamisches Positionieren beschreibt den Vorgang, dass äußere Lasten durch die Kräfte des Propulsionssystems ausgeglichen werden, um die Position und den Kurswinkel des Schiffes konstant zu halten. Die äußeren Kräfte bestehen typischerweise aus Wind, Wellen und Strömung. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Kraftanteile aus derselben Richtung wirken und zu einer resultierenden Kraft und einem Moment zusammengefasst werden. Eine vereinfachte Darstellung des DP-Problems ist in Abb. 1 gegeben. In den folgenden Abschnitten werden zwei Methoden beschrieben, die zur Beantwortung aller Fragen für den Entwurf von Interesse sind.

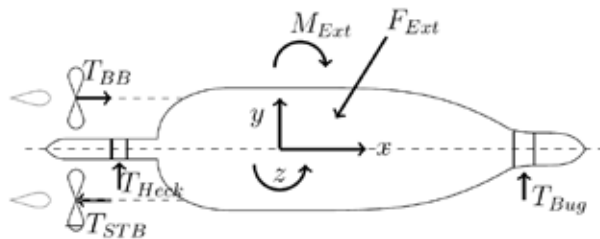


Abbildung 1. Vereinfachte Darstellung eines Schiffes bei einer DP-Operation und verwendetes Koordinatensystem.

### 2.1 Statische Herangehensweise

Bei der statischen Herangehensweise wird ein Gleichgewicht zwischen den konstant angenommenen äußeren Lasten, beschrieben durch je eine Kraft in Schiffs-längs- und Querrichtung und ein Moment um die Hochachse des Schiffes, und den Schüben des Propulsionssystems bestimmt. Da in den

meisten Fällen das Schiff mit den Propulsionskomponenten ein überbestimmtes System darstellt, wird für die Berechnungen ein Optimierungsverfahren verwendet, welches in [10], [14] und [16] beschrieben ist. Für die Berechnung wird die äußere Last vorgegeben und dazu die entsprechend benötigten Kräfte des Propulsionssystems ermittelt. Anschließend wird überprüft, ob die Ergebnisse die installierte Leistung des Propulsionssystems nicht überschreiten. Mit dieser Betrachtungsweise können die zwei wesentlichen Fragestellungen beantwortet werden:

- Bestimmung der maximal zulässigen Umweltlast eines gegebenen Antriebskonzeptes
- Berechnung der benötigten Schübe aller Propulsionskomponenten für eine gegebene Umweltsituation

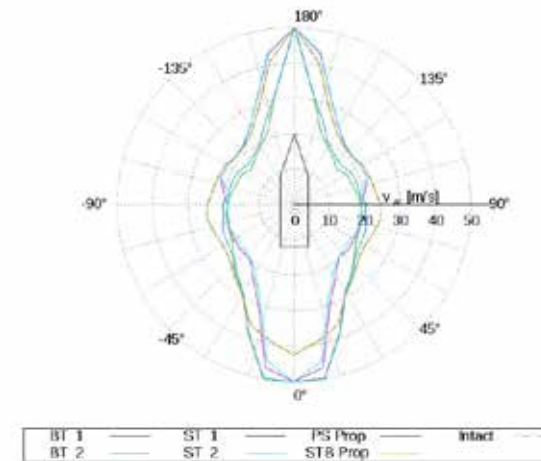


Abbildung 2. Darstellung der DP-Fähigkeit.

Die maximal zulässige Umweltlast für jede Richtung wird in einem sogenannten DP-Fähigkeits-Plot (Abb. 2) mithilfe der Windgeschwindigkeit dargestellt. Da der Seegang mit der Windgeschwindigkeit gekoppelt ist, lassen sich die Angaben des Seegangs daraus ableiten. Der Zusammenhang wird von der IMCA [7] oder dem DNV [10] gegeben. Mit der Angabe der Windgeschwindigkeit wird auch die sogenannte ERN (Environmental Regularity Number) ermittelt. Diese Kennzahl ermöglicht einen Vergleich verschiedener Schiffe und hat sich bei der Klassifizierung von DP-Systemen etabliert. Mit dieser Methode ist es auch möglich, die Auswirkungen des Ausfalls einzelner Komponenten zu bestimmen, was in Abb. 2 dargestellt ist. Weiterhin ist die Darstellung der Kräfte für eine gegebene Umweltsituation hilfreich, um das DP-System zu beurteilen. In Abb. 3 ist eine DP-Operation mit allen Kraftkomponenten gezeigt.



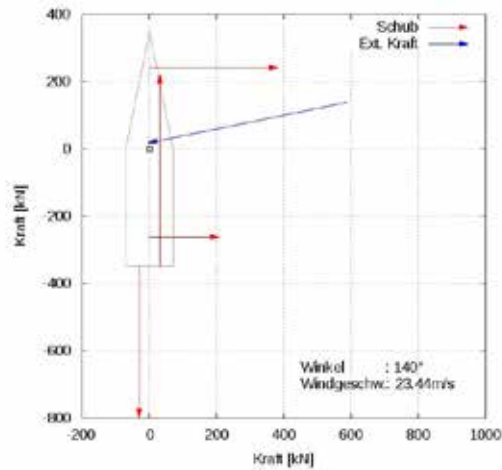


Abbildung 3. Darstellung der Kräfte bei einem DP-Manöver für eine gegebene Situation.

Mit diesen Methoden ist es möglich, in der Phase des frühen Schiffsentwurfs schnell und effizient verschiedene Antriebskonzepte miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse ermöglichen lediglich eine qualitative Bewertung, da durch die Vereinfachung der äußeren Lasten die dynamischen Effekte vernachlässigt werden.

## 2.2 Betrachtung im Zeitbereich

Bei der Betrachtung des DP-Problems im Zeitbereich wird im Gegensatz zur statischen Herangehensweise keine Vereinfachung bei der Abbildung der DP-Operation vorgenommen. Die Umweltlasten werden durch zeitlich schwankende Kräfte dargestellt, die im nächsten Kapitel für die einzelnen Komponenten - Wind, Welle und Strömung - vorgestellt werden. Weiterhin werden nicht nur die maximalen Schübe und die zugehörigen Leistungen berechnet, sondern auch die Maschinendynamik berücksichtigt.

Mit diesem Modell wird die Bewegung des Schiffes für eine gegebene Umweltsituation realistisch abgebildet. Damit ist es möglich, auch eine quantitative Aussage zum Verhalten des Schiffes zu treffen. Dies beinhaltet zum einen die Abweichungen der Position und des Kurswinkels. Zum anderen ist es möglich, durch schrittweise Erhöhung der Umweltlast den Grenzwert zu bestimmen, bei dem die zulässigen Abweichungen der Position und des Kurswinkels nicht überschritten werden.

Das Vorgehen ist in beiden Fällen gleich. Zunächst werden die Umweltlasten im Zeitbereich bestimmt und mit der gemittelten Last die Startbedingung des Propulsionssystems erzeugt. Eine gewöhnliche Differentialgleichung wird aufgestellt, um das Problem im Zeitbereich zu lösen. Als Integrationsverfahren wird das Euler-Verfahren verwendet. Die Berechnungen basieren auf dem Kraftmodell von Söding [15] und Krüger [11] und wurden für Geschwin-

digkeiten ohne Vorausfahrt erweitert. Zusätzlich erfolgt die Regelung der Position und des Kurswinkels durch eine Verstellung der Sollwerte der Maschinencharakteristik, was in [14] beschrieben und in Abb. 4 dargestellt ist.

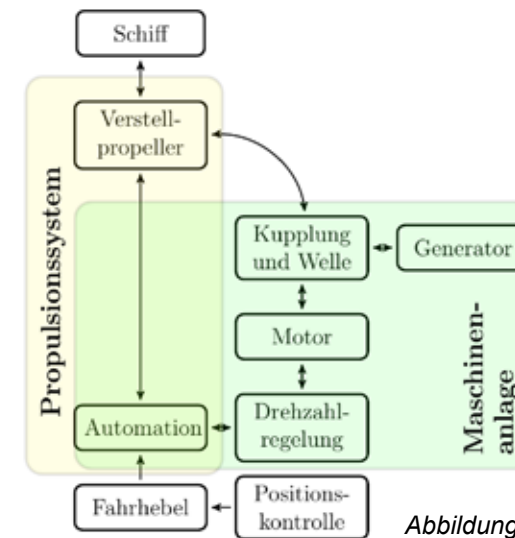


Abbildung 4. Kraftmodell.

## 3 Umweltlasten

Für die Bestimmung der DP-Fähigkeit wird eine Beschreibung der Umweltlasten benötigt. Speziell in der frühen Schiffsentwurfsphase werden Konzepte benötigt, die keine Modellversuche oder lange Rechenzeiten erfordern. In den folgenden Abschnitten werden die Umweltlasten - Wind, Welle und Strömung - vorgestellt. Weitere Kräfte sind durchaus denkbar. Diese werden im Folgenden nicht beschrieben, da sie keine entwurfsrelevanten Parameter darstellen.

### 3.1 Wind

Windwiderstände von Schiffen sind bereits in den 1990er von Blendermann [2] in Windkanalversuchen umfangreich untersucht worden. Die Ergebnisse sind in einer Datenbank frei zugänglich, sodass man abhängig vom Schiffstyp auf passende Daten zugreifen kann. Dieses Vorgehen hat sich in der Schiffbau- und Offshore-Branche bereits etabliert, sodass die berechneten Kräfte verwendet werden können und eine erneute Validierung nicht notwendig ist. Bei Schiffen, die nicht in der Datenbank vorhanden sind, empfiehlt es sich, Berechnungen oder Modellversuche durchzuführen.

Auf Grundlage dieser Kräfte werden Zeitreihen der Windlasten bestimmt, indem die konstante Windgeschwindigkeit und -richtung durch ein Zeitsignal ersetzt wird. Für die zeitlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit wird

auf ein Energiespektrum zurückgegriffen, welches ursprünglich auf Messungen von Davenport [6] beruht. Mit Vergleichen von Langzeitmessungen der Windgeschwindigkeit an Bord [13] konnte nachgewiesen werden, dass das Spektrum auch realen Bedingungen entspricht. In Abb. 5 ist das Spektrum der Windgeschwindigkeit beispielhaft für Windgeschwindigkeiten von 2 bis 14 m/s dargestellt. Für die Schwankungen der Windrichtung wurde ein Spektrum aus den Langzeitmessungen abhängig von der mittleren Windgeschwindigkeit entwickelt, welches in [13] beschrieben ist.

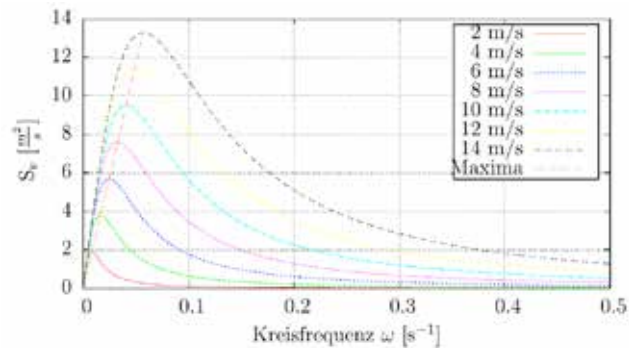


Abbildung 5. Spektrum der Windgeschwindigkeit. [13]

### 3.2 Wellen

Wenn im Zusammenhang mit dynamischem Positionieren von Wellenkräften gesprochen wird, meint dies in jedem Fall die Wellenkräfte zweiter Ordnung, die auch Driftkräfte genannt werden. Im Gegensatz zu den Wellenkräften erster Ordnung ist der Mittelwert der Driftkräfte nicht null. Diese Lasten hängen von dem vorherrschenden Seegang ab, der, wie bereits erwähnt, mit der Windgeschwindigkeit gekoppelt ist. Dieser Zusammenhang wird aus den Regeln des DNV [7] oder den Empfehlungen der IMCA [10] entnommen.

Da die Methoden zur Bestimmung der DP-Fähigkeit kurze Rechenzeiten im Entwurfsprozess erfordern, wird auf eine Streifenmethode zurückgegriffen, die nach Augener [1] dahingehend erweitert wurde, Driftkräfte zu bestimmen. Die Längs- und Querkraft und das Moment setzen sich jeweils aus zwei Komponenten zusammen. Der erste Teil berücksichtigt den mittleren Druck auf den Rumpf unterhalb der mittleren Glattwasserlinie. Die zweite Komponente beschreibt die Kraft auf das Schiff verursacht durch die Relativbewegung zwischen dem Rumpf und der Wasseroberfläche. Das Moment wird noch korrigiert, um den Abstand zwischen dem Gewichtsschwerpunkt und dem Koordinatenursprung zu berücksichtigen.

Aus dem zeitlichen Signal der Wellenerhebung wird die Zeitreihe der Wellenkräfte zweiter Ordnung bestimmt, die als Eingangsgröße in die DP-Betrachtung im Zeitbereich eingeht. Weiterhin wird das Zeitsignal der Driftkräfte ge-

mittelt, um die Last für die statische Herangehensweise zu berechnen.

### 3.3 Strömungskräfte

Die Strömungskraft wird bei DP-Operationen bei beiden Herangehensweisen als konstant angenommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kräfte maßgeblich durch den Querwiderstand der einzelnen Spanten bestimmt werden. Daher wurde das Verfahren entwickelt, den Querwiderstand als 2D-Problem aufzufassen und für verschiedene Spantformen RANSE-Rechnungen durchzuführen [4], die Ergebnisse zu den verschiedenen Geometrien anhand von Parametern zu analysieren und daraus eine Datenbank zu entwickeln.

Zunächst bestand die Idee, die Spantformen zwischen dem Vorschiffsbereich, also v-förmigen Spanten mit charakteristischem Winkel am Bodeneinlauf, dem Hauptspant mit gegebenem Kimmradius und Spanten im Hinterschiff mit charakteristischem Verhältnis von Totholzhöhe zu Tiefgang unterschieden. Bei der weiteren Analyse zeigte sich, dass für alle Spantformen ein linearer Zusammenhang zwischen dem Querwiderstandsbeiwert und dem Flächenverhältnis von der Spantfläche zum umschreibenden Rechteck besteht. In Abb. 4 sind die Ergebnisse für die untersuchten Spantformen dargestellt. Auf der Grundlage dieser Werte wird der Gesamtquerwiderstand des Schiffes bestimmt.

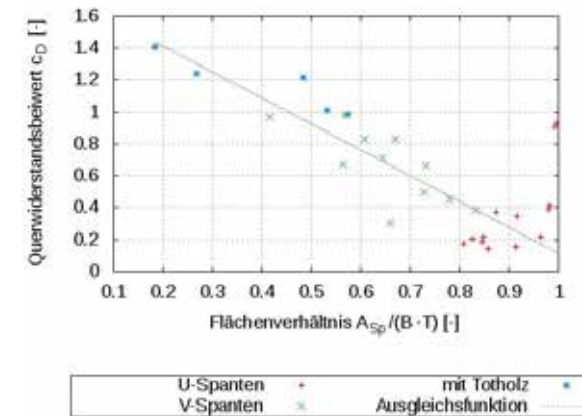


Abbildung 6. Querwiderstandsbeiwerte für verschiedene Spantgeometrien.

## 4 Modellversuche und Großausführungsmessungen

Im Rahmen der Analyse des Verhaltens eines Schiffes beim dynamischen Positionieren ist die Berücksichtigung der Interaktionseffekte des Rumpfes und des Propulsionssystems von Bedeutung. Mithilfe von Modellversuchen

ist eine Untersuchung dieser Effekte möglich. Daraus entstand die Idee, folgende Aspekte näher zu betrachten:

- Vergleich des Querwiderstandes aus Modellversuchen mit den bereits vorgestellten Berechnungen
- Veränderung des resultierenden Schubes aller Propulsionsorgane bei Interaktion mit Strömung
- Beeinflussung der Schübe bei seitlicher Begrenzung des Schiffes

In den folgenden Abschnitten werden Ausschnitte der umfangreichen Messungen vorgestellt, die den Einfluss auf das DP-Verhalten repräsentieren. Insgesamt wurden die unterschiedlichen Versuche mit drei gefesselten Modellen sowie mit zwei Großausführungsschiffen durchgeführt. In der Tabelle 1 sind die Hauptabmessungen und das Propulsionssystem dargestellt. Der Versuch wurde mit der CPMC-Anlage der HSVA (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt) realisiert, bei der die Längs-, Quer- und Gierbewegung vorgegeben wird. Die Tauch-, Stampf- und Rollbewegung sind frei. Bei den Versuchen wurden die Kräfte in Längs- und Querrichtung und das Giermoment gemessen. Bei allen Versuchen mit Antriebssystemen wurden die entsprechenden Parameter wie Drehzahl, Drehmoment und Leistung zusätzlich gemessen. Die Ergebnisse werden mithilfe von dimensionslosen Kennzahlen dargestellt, die aus dem Staudruck und der Unterwasserlateralfäche oder einer Referenzkraft berechnet werden. [9]

Tabelle 1 Hauptabmessungen der Modellschiffe.

	Modell 1	Modell 2	Modell 3
Länge zw. d. L.	111,45 m	154,00 m	291,00 m
Breite	19,20 m	27,66 m	37,00 m
Entwurfstiefgang	4,80 m	5,75 m	8,32 m
Propulsionskonzept	-	-	2 Festpropeller 2 Flossenruder 2 Bugstrahler 2 Heckstrahler

#### 4.1 Querwiderstand von Schiffen

Die erste Versuchsreihe beinhaltet Schrägschleppversuche, bei denen die Modelle 1 und 2 jeweils bei einer konstanten Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Driftwinkeln geführt wurden. Die Driftwinkel sind von 0° bis 180° in 30°-Schritten variiert. Um eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu

untersuchen, wurden die Versuche bei 1kn, 2kn und 5kn durchgeführt.

Mit den Messungen bei einem Driftwinkel von 90° wird zunächst die Bestimmung des Querwiderstandes aus 2D-Spannen, wie sie in Abschnitt 3.3 vorgestellt, validiert. In Abb. 7 sind die Ergebnisse der 2D-Berechnungen mit dem zugehörigen Mittelwert in rot und die Messung in blau dargestellt. Daraus geht hervor, dass die maximale Abweichung 7 % beträgt, was für den Entwurfsprozess in einem akzeptablen Bereich liegt.

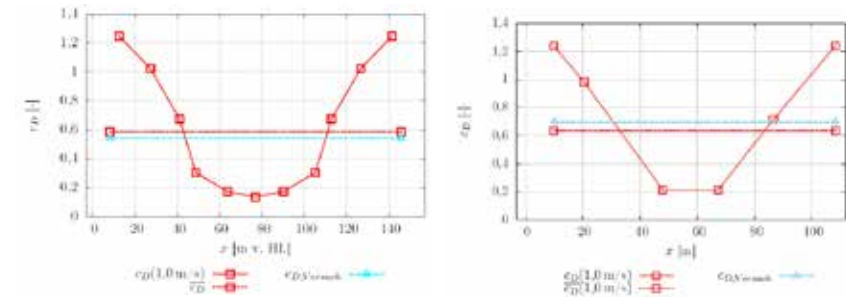


Abbildung 7. Vergleich der Querwiderstandsbeiwerte zwischen Berechnung und Versuch für Modell 1 (links) und Modell 2 (rechts). [4]

Auf der Grundlage der ersten Auswertung werden die Widerstandsbeiwerte in Querrichtung aus den Modellversuchen mit den berechneten Ergebnissen für alle Driftwinkel verglichen. In Abb. 8 sind die Werte dargestellt. Auch hier geht aus dem Vergleich hervor, dass die verwendete Methode zur Bestimmung der Querwiderstandsbeiwerte die Querkraft gut abbildet.

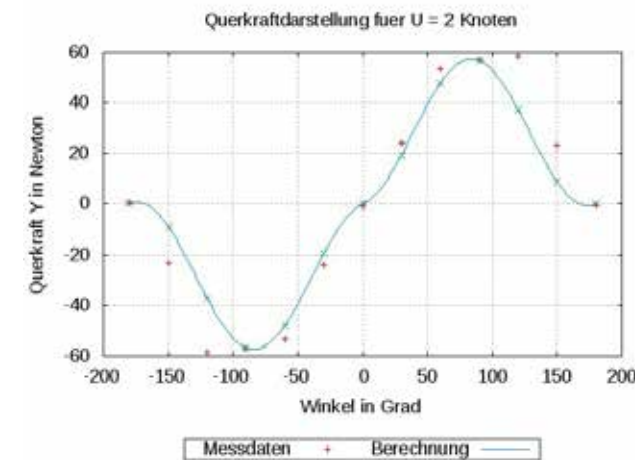


Abbildung 8. Vergleich der Querkraft für alle Driftwinkel.

Ähnliche Ergebnisse sind aus der Untersuchung des Giermoments hervorgegangen. Folglich wird davon ausgegangen, dass die verwendete Berechnungsmethode zur Bestimmung des Strömungswiderstandes für den Entwurfsprozess geeignet ist und realistische Ergebnisse liefert.

#### 4.2 Interaktion des Propulsionssystems mit Strömung

Um die Interaktion des Propulsionssystems mit Strömung zu analysieren, wurde in einer weiteren Versuchsreihe das Modell 3, welches mit allen in Tabelle 1 genannten Komponenten ausgestattet war, mit einer Geschwindigkeit von 2 kn bei verschiedenen Driftwinkel durch den Versuchstank geschleppt. Dabei waren die Komponenten des Propulsionssystems einzeln und in verschiedenen Kombinationen bei unterschiedlichen Betriebszuständen im Einsatz. Die Auswertung erfolgt über das Verhältnis der gemessenen Kräfte mit und ohne Strömung.

Aus der Literatur [3] geht hervor, dass speziell die Strömung in Schiffslängsrichtung einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Querkraft der Tunnelstrahler hat. In Abb. 9 sind die gemessenen Werte und Ergebnisse aus der Literatur dargestellt. Die Referenz aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Werten. Für DP-Operationen wird eine lineare Reduzierung der Kraft durch die Querstrahler angenommen, was auch aus den Werten der Literatur eine zulässige Annahme darstellt.

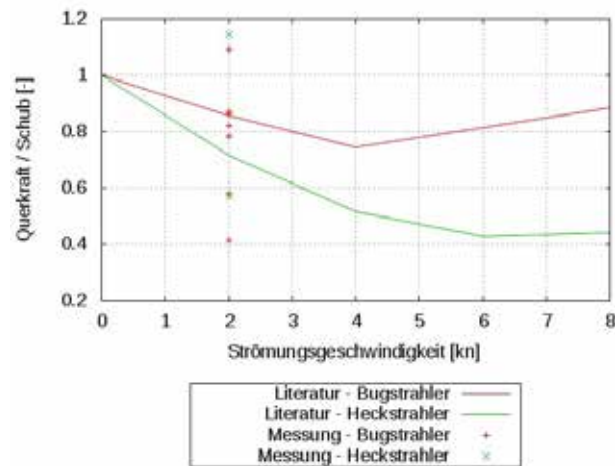


Abbildung 9. Interaktion der Querstrahler mit Strömung. [3]

Aus den weiteren Versuchsergebnissen konnte kein Zusammenhang zwischen der Strömung und dem Schub der Propeller oder der Querkraft der Ruder abgeleitet werden. Daher werden diese Auswertungen nicht weiter aufgeführt.

#### 4.3 Anlegemanöver

Die dritte Versuchsreihe wurde ebenfalls mit dem Modell 3 durchgeführt und beinhaltete den Vergleich der Kräfte der Propulsionskomponenten mit und ohne seitliche Begrenzung, welches ein Anlegemanöver oder einer DP-Operation bei seitlicher Begrenzung widerspiegelt. Dieser Vorgang ist nicht zwingend ein Entwurfstreiber, da nicht jedes Schiff bei seitlicher Begrenzung operiert. Falls das Einsatzgebiet diesen Betriebszustand regelmäßig fordert, sollte zumindest ein Verständnis für die Effekte vorhanden sein. Die Versuche wurden bei unterschiedlichen Wandabständen (0,1B; 0,2B, 0,4B und ohne Begrenzung) mit den Komponenten des Propulsionssystems einzeln und in verschiedenen Kombinationen bei unterschiedlichen Betriebszuständen durchgeführt.

In Abb. 10 ist die normierte Querkraft über den Wandabstand für verschiedene Propulsionszustände dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Querkraft der Querstrahler bei Anlegemanövern verstärkt und bei Ablegemanövern reduziert wird.

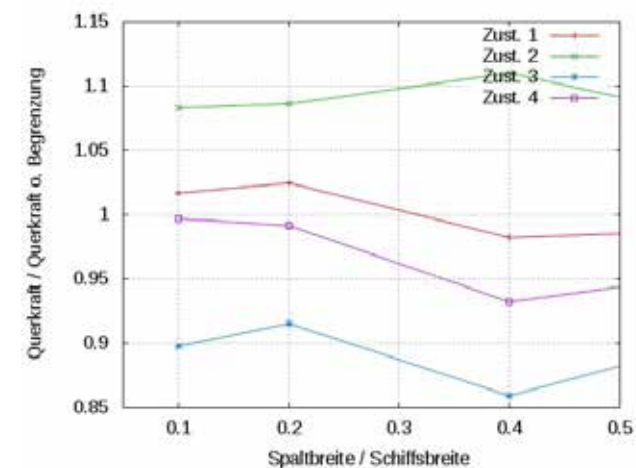


Abbildung 11. Normierte Querkraft der Bugstrahler bei unterschiedlichen Wandabständen.

#### 5 Anwendungsbeispiel im Schiffsentwurf

Um die Möglichkeiten der Methoden zu verdeutlichen, wird ein Anwendungsbeispiel vorgestellt, welches für den Bereich Offshore-Service und -Unterkunft projektiert ist. In Tabelle 2 sind die Hauptabmessungen des Schiffes dargestellt. Im ersten Entwurfskonzept ist das Schiff mit drei Querstrahlern im Bugbereich und zwei Azimut-Antrieben ausgerüstet. Dabei sind die Hauptantriebe bereits mit einer Leistung von jeweils 2000 kW festgelegt.



Tabelle 2 Hauptabmessungen

Länge über Alles	80,00 m
Länge zw. den Loten	72,20 m
Breite auf Spanten	18,00 m
Entwurfstiefgang	5,70 m

Beim Entwurf des DP-Systems ist darauf zu achten, dass die geforderten Einsatzbedingungen eingehalten werden. Der Seegang ist mit einer signifikanten Wellenhöhe von 3,0 m und einer Wellenperiode von 9,0 s spezifiziert. Die Strömung beträgt 1,0 m/s. Das System soll mit DP-2 und einer ERN von 99,99,99,95 klassifiziert werden.

Um die Möglichkeiten der vorgestellten Methoden darzulegen, werden drei Aspekte untersucht:

- Anordnung des Überwasserschiffes
- Einfluss des Propulsionskonzept
- Operationsfähigkeit unter realen Bedingungen

In den folgenden Abschnitten werden die ersten beiden Punkte mithilfe der vorgestellten statischen Herangehensweise untersucht. Abschließend soll auch die Operationsfähigkeit unter realen Bedingungen überprüft werden, um auch eine qualitative Aussage über das Verhalten des Schiffes während des dynamischen Positionierens treffen zu können. Da das Schiff seitlich mit einer Gangway ausgestattet ist, ist für dieses Schiff speziell die Querbewegung relevant, um einen sicheren Übergang zu den Windkraftanlagen, Plattformen oder anderen Schiffen zu gewährleisten.

### 5.1 Einfluss des Überwasserschiffes

In der frühen Entwurfsphase kann die Position des Deckshauses ein Parameter sein, der zeitnah festgelegt werden muss. Mit dieser Entscheidung werden die Form der Windlateralfäche und damit auch die Windlasten maßgeblich beeinflusst. Die Veränderung von äußeren Kräften wirkt sich auf die DP-Fähigkeit aus. Da die Vorgaben für dieses Projekt die Lage des Deckshauses nicht festlegt, wird der Vergleich einer Anordnung mit Deckshaus hinten (Variante I) und vorne (Variante II) vorgenommen. In Abb. 11 (rechts) sind die Varianten dargestellt.

Aus den Berechnungen ergibt sich, dass für die Variante I mit dem Deckshaus hinten der Leistungsbedarf bei 1000 kW pro Querstrahler (Abb. 11,

links, blau) liegt, um die Forderungen einzuhalten. Um mit Variante II (Abb. 11, links, grün) die gleiche DP-Fähigkeit zu erreichen, wird eine Leistung von 1100 kW pro Querstrahler benötigt. Trotz der zusätzlichen Leistung wird nicht die gleichen Einsatzgrenzen bei Kräften von schräg vorne erreicht. Folglich ist eine Einsparung von insgesamt 300 kW Leistung bei einer besseren DP-Fähigkeit möglich.

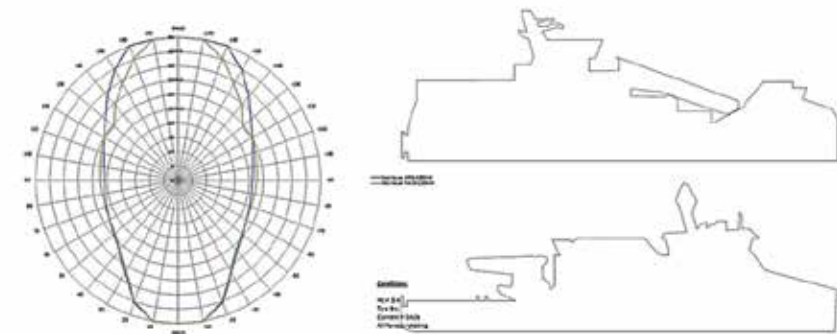


Abbildung 11. Einfluss der Überwasserlateralfäche auf die DP-Fähigkeit

Da das DP-System jedoch nie der einzige Entwurfstreiber ist, ist eine ganzheitliche Betrachtung der Anordnung notwendig. Beispielsweise ist die Fläche des Arbeitsdecks im Heckbereich besser zu maximieren, wenn das Deckshaus vorne (Variante II) angeordnet wird. Weiterhin ist auch die Integration der Gangway ein sehr relevanter Aspekt für dieses Projekt. Abschließend sind die Vor- und Nachteile gegenüberzustellen und die Bedürfnisse des Kunden optimal zu erfüllen, um einen erfolgreichen Projektabschluss zu gewährleisten. Eine finale Lösung soll an dieser Stelle nicht präsentiert werden, da es nicht möglich ist, eine pauschale Entscheidung anzugeben.

### 5.2 Einfluss des Propulsionskonzepts

Als Alternative zu dem bisher genannten Propulsionskonzept wird eine konventionelle Zwei-Propeller-Anlage mit zwei zusätzlichen Heckstrahlern gegenüber gestellt. Diese weist geringere Wartungs- und Anschaffungskosten auf.

Aus den Ergebnissen in Abb. 12 geht hervor, dass eine vergleichbare DP-Fähigkeit erzielt werden kann. Speziell unter Einsatz der Ruder, die allerdings nicht in die ERN-Berechnung im Intaktfall mit eingehen dürfen, zeigt die konventionelle Anlage bei Richtungen von schräg vorne ihre Vorteile. Hierbei ist wieder abzuwägen, was technisch sinnvoll ist, da beide Propulsionskonzepte ihre Daseinsberechtigung haben.

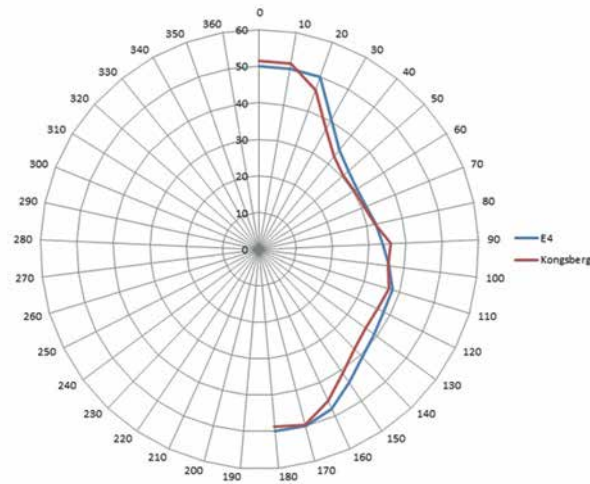


Abbildung 12. Einfluss des Propulsionskonzepts.

### 5.3 Beurteilung der DP-Operation unter realen Bedingungen

Die realen Bedingungen werden mithilfe der Zeitreihe der Umweltlasten berücksichtigt, die im Maximum deutlich höhere Kräfte als durch die Mittelung der Kräfte aufweisen. Daher ist zu untersuchen, ob die verbleibende Leistung der Maschinenanlage diese Schwankungen abfangen. Ein weiterer limitierender Faktor ist die Maschinendynamik, die in entsprechend kurzer Zeit auf die veränderten Bedingungen reagieren können muss. In Abb. 13 sind die Schwankungen der Querkraft von Wind, Welle und Strömung und die Reaktion der Querstrahler dargestellt. In Summe wirken für dieses Projekt unter den gewählten Umweltbedingungen mit einer Windgeschwindigkeit von 12m/s, einer signifikanten Wellenhöhe von 3,0m und einer Wellenperiode von 9,6s Kräfte, die doppelt so groß sind, wie die gemittelten Werte. Daraus ergibt sich ein maximaler Querversatz von bis zu 1,8m. Dieser Wert liegt im Bereich der zulässigen Abweichung

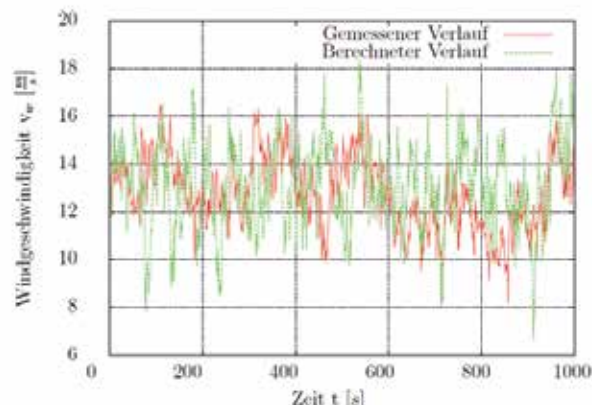


Abbildung 13. Zeitliche Schwankungen von Umweltgrößen beim dynamischen Positionieren

## 6 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag hat die Problematik aufgegriffen, dass im Zuge der Energiewende neue Schiffstypen benötigt werden. Für die Umsetzung der neu entstandenen Aufgaben hat die Fähigkeit des dynamischen Positionierens im Entwurf dieser Schiffe an Bedeutung gewonnen hat. Dafür werden Verfahren benötigt, die die Bewertung des Propulsionssystems hinsichtlich dieser Eigenschaft ermöglichen. Die qualitative Beurteilung wird mit einem statischen Verfahren vorgenommen und die quantitative Beurteilung erfolgt mit einer Berechnung im Zeitbereich. Die Beschreibung der Umweltlasten wurde für beide Methoden vorgestellt.

Mithilfe von Modellversuchen wurden verschiedene Aspekte im Rahmen von DP-Vorgängen untersucht. Die Methode zur Berechnung des Strömungswiderstandes konnte validiert werden. Weiterhin gaben die Messungen Aufschluss über die Interaktion zwischen den Komponenten des Antriebskonzeptes und der Strömung. Weiterhin wurde der Effekt durch eine seitliche Begrenzung wie bei einem Anlegemanöver untersucht.

Abschließend wird mit der Verwendung des entwickelten Verfahrens die Möglichkeit für den Entwurfsprozess anhand eines Anwendungsbeispiels verdeutlicht. Dabei ist der Einfluss des Antriebkonzeptes und der Form des Überwasserschiffes untersucht worden. Auch das Verhalten des Schiffes unter realen Bedingungen kann damit abgeschätzt werden.

Als nächster Schritt ist die Validierung der Methoden zu nennen, wobei hierfür zunächst ein Verfahren entwickelt werden muss. Weiterhin wird die Anwendung in der Projektphase fehlende Aspekte darlegen, um die Methoden für den praktischen Betrieb weiter zu verbessern.

### Literatur

- 1 Augener, P., Krüger, S. (2014): Computation of Drift Forces for Dynamic Positioning within the Very Early Design Stage of Offshore Wind Farm Installation Vessels. Proceedings of the OMAE 2014, San Francisco, USA.
- 2 Blendermann, W. (1993): Schiffsform und Windlast- Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell. Bericht Nr. 533. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg
- 3 Brix, J. (1993): Manoeuvring Technical Manual. Seehafen Verlag.
- 4 Brütt, L. (2015): Strömungskräfte auf Schiffsquerschnitte beim Manövrieren. Master's Thesis, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany.

- 5 Clauss, G., Lehmann, E., Østergaard, C. (1994): Offshore Structures Volume II: Strength and Safety for Structural Design. Springer-Verlag, London, UK.
- 6 Davenport, A. G. (1960): The Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in High Winds. Tech. Rep. 3, Dept. of Civil Engineering, University of Bristol, UK.
- 7 DNV (July 2013): Dynamic Positioning Systems. Rules For Classification of Ships. Det Norske Veritas.
- 8 Haack, T. (2006): Simulation des Manövrierverhaltens von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung der Antriebsanlage. Dissertation, Hamburg University of Technology, Hamburg.
- 9 HSVA (2015): DP-Versuche an drei gefesselten Modellen (Bericht Man 334/15), Hamburg, Germany.
- 10 IMCA (2000): Specification for DP Capability Plots. The International Marine Contractors Association.
- 11 Krüger, S. (1998): Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Manövriersimulation auf der Basis von Großausführungsmessungen. Seite 541–551.
- 12 Krüger, S., Vorhölter, H. (2012): Design Considerations of DP-Systems for Windpark Installation Vessels. Proceedings of IMDC 2012, Glasgow, UK.
- 13 Lübcke, A. (2012): Modellierung von Windkräften im Zeitbereich. Report A-23, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany.
- 14 Lübcke, A., Krüger, S., Christiansen, J. (2015): Calculation of the Dynamic Positioning Capability in Time Domain in Early Design Stages. Proceedings of the IMDC 2015, Tokyo, Japan.
- 15 Söding, H. (1984): Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft - Bewertung der Manövriereigenschaften im Entwurfsstadium (Seite 179–204).
- 16 Viallon, M. (2014): Estimating Dynamic Positioning Capability in Early Design Stages. Master's Thesis, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany.

## PROSPER – Produktivitätsmanagement in der schiffbaulichen Produktion ermöglichen

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding,  
 Dr.-Ing. Axel Friedewald,  
 Philipp Halata, Florian Tietze,  
 Fedor Titov  
 (Institut für Produktionsmanagement und -technik der TU Hamburg-Harburg)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX337 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

### Einleitung

Die maritime Branche in Deutschland ist weltweit technologisch führend und hat national eine herausragende wirtschaftliche Bedeutung. Allerdings steht sie in einem intensiven Wettbewerb insbesondere mit asiatischen Marktteilnehmern. Dieser Wettbewerb wird sich weiter verschärfen; es ist absehbar, dass asiatische Unternehmen zunehmend in den Spezialschiffbau drängen und dort ihre Lohnkosten- und Größenvorteile ausspielen werden. Daher benötigt die deutsche maritime Industrie auf absehbare Zeit überdurchschnittlich hohe Produktivitätssteigerungen [1].

Gängige Verbesserungsmethoden zur Produktivitätssteigerung sind im Kontext der Lean-Bewegung entstanden und führen dort zu hohen Produktivitätssteigerungen. Gleichzeitig belegen Untersuchungen in mehreren schiffbaulichen Produktionen, dass Werker – anders als in der Serienfertigung – große Anteile der bezahlten Arbeitszeit für informatorische Tätigkeiten benötigen (Abb. 1). Zusätzlich nimmt die Bedeutung von Umbaumaßnahmen für deutsche Werften und Zulieferer zu und führen zu neuen Herausforderungen. Daher fehlt es an Methoden und Hilfsmitteln, die:

- Transparenz über die Zeitanteile von Mitarbeitern schaffen,
- die Produktivität durch kontextspezifische Bereitstellung von Informationen drastisch verkürzen und
- Umbaumaßnahmen optimal ermöglichen.

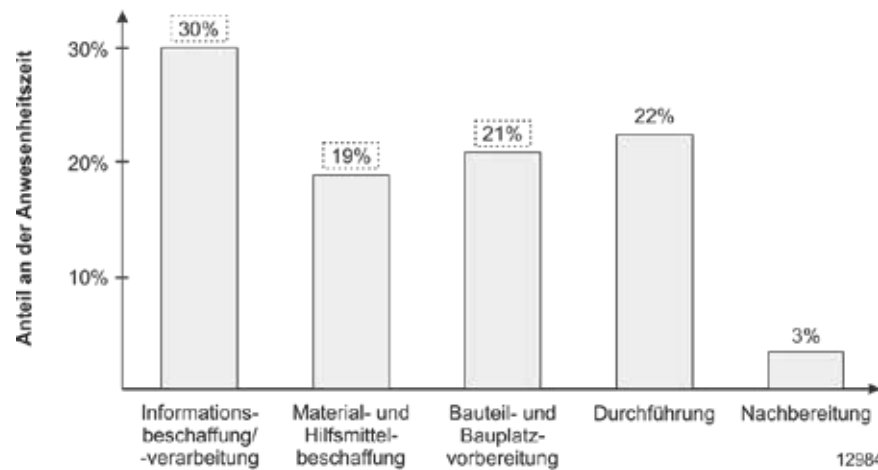


Abbildung 1: Potenziale im Schiffbau (Auswertung von zwölf Werftbereichen) [2]

Im Verbundprojekt PROSPER haben dazu die beteiligten Unternehmen zusammen mit dem Institut für Produktionsmanagement und -technik der TUHH neue Methoden und Demonstratoren entwickelt: Die Fr. Lürssen Werft modellierte eine einheitliche Produktivitätsanalyse für Werften. Die MEYER WERFT und die Flensburger Schiffbaugesellschaft setzten mobile Endgeräte für eine kontextbezogene Informationsbereitstellung ein und die MAN Turbo und Diesel reduzierte den Aufwand für komplexe Umbaumaßnahmen durch einen IT-gestützten Prozess.

### Produktivitätsmanagement im Schiffbau

Wie in Abb. 1 ersichtlich, erfordert ein erfolgreiches Produktivitätsmanagement im Schiffbau zunächst eine Produktivitätsanalyse, die einheitlich Transparenz über die Potenziale aufdeckt. Angereichert mit weiteren Kennzahlen, z. B. in einem Produktionscockpit, erhalten Werften somit einen guten Überblick, um die Produktivität zielgerichtet zu steigern.

### Produktivitätsanalysen

Die Arbeitsabläufe in der schiffbaulichen Produktion sind geprägt durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Aufgaben, einer hohen Autonomie und Flexibilität der Werker sowie hohen Anteilen an Nebenzeiten. Dadurch sind die Arbeitsabläufe nur zu einem geringen Grad standardisiert, was ein einheitliches Vorgehen, um Transparenz über die Tätigkeiten zu erlangen erschwert. Ein generischer Arbeitszyklus bildet die Grundlage, um in der maritimen Industrie wiederholbare Abläufe zu definieren und repetitive Produktivitäts-

gewinne zu ermöglichen. Abb. 2 stellt sowohl für die direkten als auch für die indirekten Bereiche einen generischen Arbeitszyklus dar.

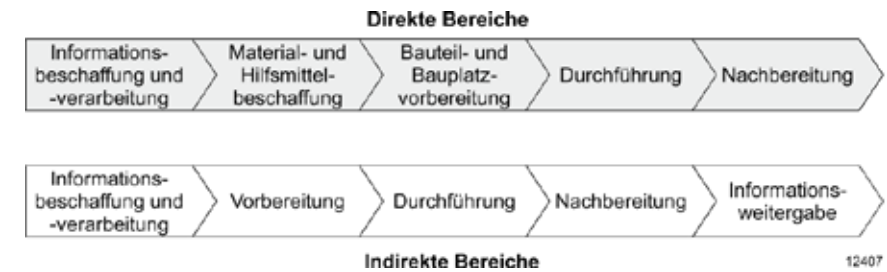


Abbildung 2: Generische Arbeitszyklen für direkte und indirekte Bereiche [3]

Jeder Phase lassen sich spezifische Tätigkeiten zuordnen. Kombiniert man diese Tätigkeiten mit einer Objekthierarchie, entstehen Mitarbeiterzustände, mit denen sich die Arbeitszeit einheitlich und vollständig beschreiben lässt [4]. Das Ergebnis ist in Form einer Tätigkeits-Objekt-Matrix in Abb. 3 dargestellt.

		Informationsbeschaffung und -verarbeitung				Material- und Hilfsmittelbeschaffung			Bauteil- und Bauplatz-vorbereitung			...	
		lesen	betrachten	sprechen mit	...	transportieren	beladen	entladen	...	rüsten	auspacken	handhaben	...
Personal	Konstrukteur			x									
	Fertigungsing.			x									
	Meister			x									
	...			x									
Arbeitsunterlagen	3D-Viewer	x								x			
	Stückliste	x								x			
	Zeichnung	x								x			
	...	x								x			
...	...												

Abbildung 3: Beispiel einer Tätigkeits-Objekt-Matrix [5]



Aufgrund der großflächigen Fertigungsbereiche sind in der maritimen Industrie vor allem Multimomentaufnahmen geeignet, die Mitarbeiterzustände zu erfassen. Das Verfahren wurde im Forschungsprojekt PROSPER zu einer mehrdimensionalen Aufnahme weiterentwickelt. Der Aufwandaufwand wurde mit einer eigenen Applikationen für mobile Endgeräte reduziert.

Neben den Darstellungen über die Phasen des generischen Arbeitszyklus sind auch detailliertere Auswertungen möglich. Mit Hilfe von Ranglisten erhalten Unternehmen der maritimen Industrie somit Transparenz über die häufigsten Tätigkeiten der Mitarbeiter, die am meisten verwendeten Objekte und die Mitarbeiterzustände mit dem größten Verbesserungspotenzial. Unabhängig von den Eigenschaften der verschiedenen Bereiche können die Werften in einer gemeinsamen Sprache die Bestandteile der bezahlten Arbeitszeit erfassen, aufschlüsseln und bereichsübergreifend analysieren. Auf Basis der Ergebnisse lassen sich Verbesserungsmaßnahmen zielgerichtet aufgrund ihrer Produktivitätspotenziale auswählen. Ebenfalls erhalten die Werften Hinweise auf Entwicklungsbedarf von Verbesserungsmethoden, die teilweise im Forschungsprojekt PROSPER entwickelt wurden [5].

### Produktionscockpit

Neben den Produktivitätsanalysen sind vor allem zeitliche Kennzahlen und Qualitätsgrößen für die maritime Industrie bedeutend. Im Forschungsprojekt wurde ein Produktionscockpit entwickelt, das diese drei Dimensionen darstellt. Zentrale Kennzahlen sind die Termintreue, die Mitarbeiterproduktivität und die Nacharbeitsquote. Mehrere Darstellungen wurden neu entwickelt, um besonders zeitliche Rückstände oder Produktivitätsverluste schnell zu erkennen. In Abb. 4 ist das Status-Diagramm dargestellt, welches den Rückstand von Arbeitspaketen zum aktuellen Zeitpunkt darstellt. Zusammen mit standardisierten Verzögerungs- und Mehraufwandsursachen können die Termintreue und Produktivität nachhaltig verbessert werden.

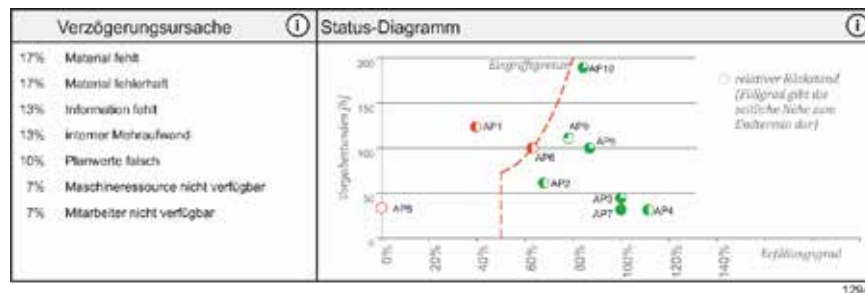


Abbildung 4: Element des Produktionscockpits

### Zeichnungsfreie Informationsversorgung

Im Rahmen des Projekts durchgeführte Multimomentaufnahmen in der maritimen Produktion zeigen, dass Mitarbeiter der Fertigungsbereiche rund 30 Prozent ihrer bezahlten Arbeitszeit mit Informationstätigkeiten verbringen. Befragungen der Werker mehrerer Werften nach der Häufigkeit der Nutzung und dem Aufwand für die Beschaffung der einzelnen Informationen ergaben, dass die Mitarbeiter vor allem komplexe Informationen, die sich nicht zweidimensional auf Papierzeichnungen darstellen lassen, sowie Zusatzdokumente, die Mitarbeiter aufgrund des Umfangs nicht mit sich führen können, vermissen (siehe Abb. 5). Ein Teilziel des Projektes war es, diese Informationen durch die Verwendung von verschiedenen Technologien (Markierungen auf dem Schiffsstahl, mobile Endgeräte, Augmented Reality) für die Werker besser verfügbar zu machen und greifbarer darzustellen.

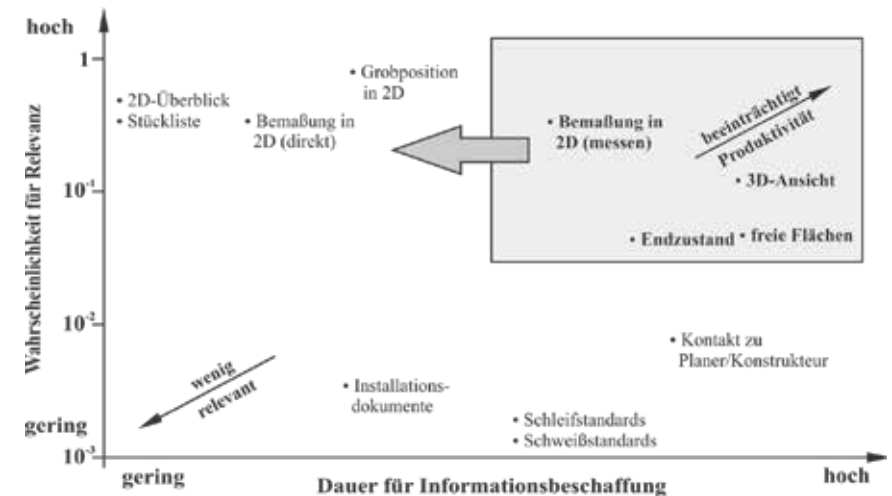


Abbildung 5: Aufwand und Häufigkeit für die Beschaffung von Informationen [6]

### Markierungssystematik

Das Brennen von Markierungen für die Positionierung von Ausrüstungsteilen auf den Schiffsstahl soll über die Informationstätigkeiten hinaus auch die Mitarbeiterzustände Messen und Anzeichnen reduzieren. Hierzu wurden standardisierte Markierungen entworfen, die mit einer Brenmmaschine auf den Stahl gebracht werden und alle für den Verbau des jeweiligen Teils relevanten Informationen enthalten. Abb. 6 zeigt eine Auswahl an Markierungssymbolen für Bauteile, die durch ihre Anzahl besonders hohes Potenzial für Zeiteinsparungen bieten. In mehreren Evaluationen im Praxis Einsatz zeigte sich, dass die Mitarbeiter ohne zu messen und anzuzeichnen die Bauteile mit Hilfe der Markierungen verbauen konnten. Simulationsläufe zeigten, dass die zu-

sätzlichen Markierungsvorgänge keine signifikant höhere Last für die Brennmachines erzeugen. In unikat- und kleinserienfertigen Werften besteht das Potenzial der Markierungssystematik allerdings hauptsächlich beim Bau von Schwesterschiffen, da die Konstruktion der zu markierenden Ausrüstungsteile beim Prototypenbau in der Regel erst nach dem Brennzeitpunkt des Schiffstahls stattfindet.

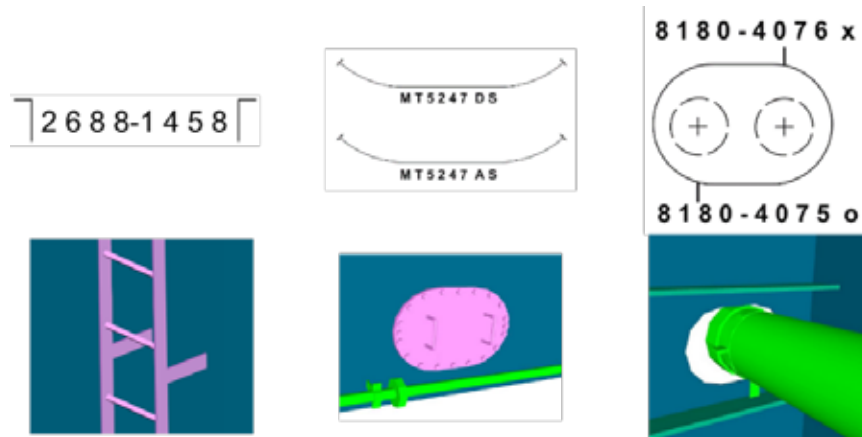


Abbildung 6 : Markierungen (oben) und entsprechende CAD-Modelle (unten) für Leitern, Mannlöcher und Rohrdurchführungen (von links) [Flensburger Schiffbaugesellschaft]

### Mobile Informationsversorgung

Um vor allem die Verfügbarkeit und die Verständlichkeit der Informationen für die Mitarbeiter der Fertigung zu optimieren, wurden mobile Geräte wie bspw. Tablet-Computer als geeignetes Werkzeug identifiziert, um die bisher verwendeten Papierzeichnungen ersetzen. Vor allem benötigen die Mitarbeiter 3D-Ansichten und Zugriff auf Dokumente wie Einbauanleitungen. Herkömmliche Anwendungen wie CAD-Viewer sind dafür nicht geeignet, da sie weder die produktive Bedienung der Geräte unter rauen Produktionsbedingungen (Handschuhe etc.) ermöglichen noch eine Integration der Planungsdaten (Reihenfolgen, Arbeitspakete etc.) vorsehen. Für einen produktiven Einsatz mobiler Arbeitsunterlagen wurde von der FSG ein Bedienkonzept entwickelt das eine aktivitätenspezifische Informationsversorgung unterstützt und die Informationen für den Werker arbeitsschrittgerecht selektiert, aufbereitet und anzeigt. Dieses setzt auf der Autodesk-Software Navisworks auf.

Für eine tagesaktuelle Bereitstellung der Daten wurden Schnittstellen entwickelt, über die die für den Werker relevanten Arbeitspakete zusammengestellt und auf die Geräte übertragen werden. Mitarbeiter der Fertigung setz-

ten die Lösung in einem Workshop ein, um mehrere Aufgaben der Informationsbeschaffung zu bearbeiten. Dabei zeigte sich die Praxistauglichkeit und Akzeptanz der Mitarbeiter für mobile Arbeitsunterlagen. Ein breiter Einsatz der mobilen Geräte zur Informationsversorgung ist in Vorbereitung.

### Augmented-Reality-gestützte Arbeitsunterlagen

Um komplexe geometrische Informationen wie Rohr-Kreuzungsbereiche möglichst verständlich darzustellen, eignet sich Augmented Reality (AR), das Einblenden virtueller Informationen in die Realität. Das Forschungsprojekt PROSPER entwickelte einen Prototyp, der Informationen arbeitsschrittgerecht und situativ mit AR darstellt. Zusätzlich kann diese digitale Arbeitsunterlage in einer CAD-Ansicht verwendet werden und erfüllt damit die zuvor beschriebenen Aufgaben der mobilen Arbeitsunterlagen. Der Aufbau der AR-gestützten Arbeitsunterlage ist in Abb. 7 dargestellt.

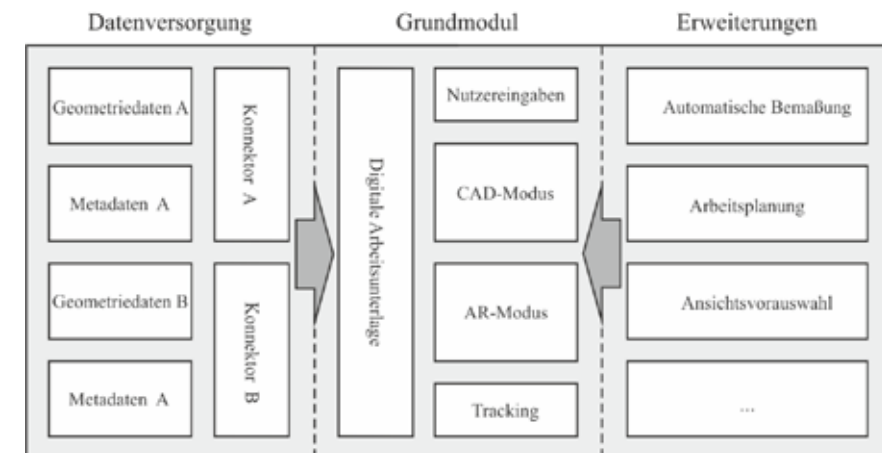


Abbildung 7: Übersicht über den Aufbau der AR-gestützten Arbeitsunterlage [7]

Die AR-gestützte Arbeitsunterlage [7] besteht aus mehreren Modulen: Die Datenversorgung kann über Konnektoren Daten aus unterschiedlichen Quellen laden; das Grundmodul enthält die Hauptbestandteile zur situationsgerechten Anzeige der Fertigungsinformationen und die Benutzerschnittstelle; Erweiterungen sind Werkzeuge zur effizienten Nutzung der digitalen Arbeitsunterlage. Eine Montageansicht der Anwendung im AR-Modus ist in Abb. 8 zu sehen. Der Ansichtsbereich, in dem das Kamerabild mit eingeblendeter Geometrie dargestellt wird, nimmt den Hauptteil des Bildschirms ein, um dem Werker einen möglichst guten Überblick zu geben.

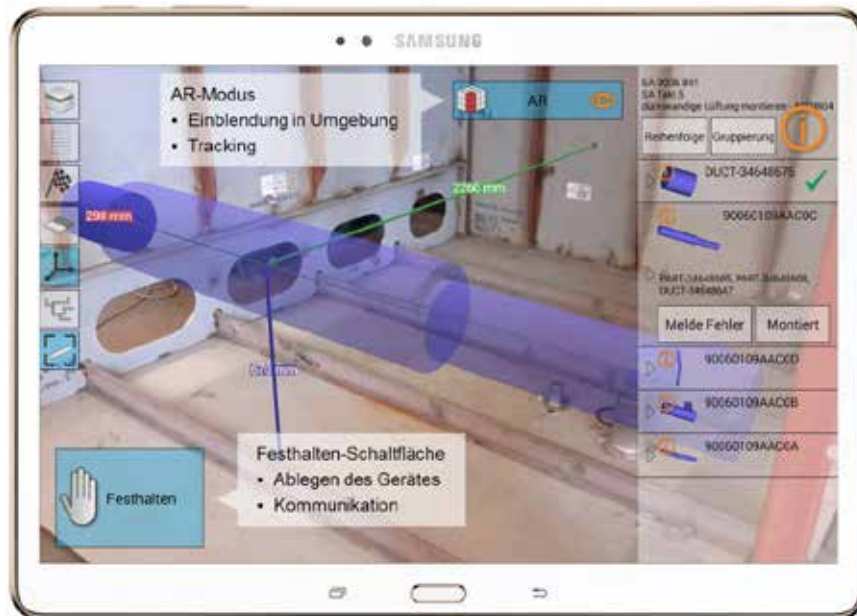


Abbildung 8: Montagefall im AR-Modus

Die Bauteilliste erlaubt die Selektion von Bauteilen, die mit AR in die Umgebung eingeblendet werden. Pro Bauteil lassen sich Zusatzinformationen, wie bspw. Rohrdurchmesser, Material oder Einbauanleitungen, aufrufen. Bauteile können als fehlerhaft gemeldet oder als eingebaut bestätigt werden. Über die Inhaltsauswahl lassen sich bspw. alle weiteren zu verbauenden Teile oder das gesamte Arbeitspaket einblenden. Über eine Schaltfläche lässt sich die aktuelle Ansicht festhalten, um das Gerät abzulegen.

Der CAD-Modus (Abb. 9) ermöglicht die Informationsbeschaffung auch außerhalb oder an einer anderen Stelle in der Arbeitsumgebung oder zum Gewinnen eines Überblicks ohne Einblendung in die Umgebung. Die Betrachtungsperspektive wird händisch eingestellt, entweder über vordefinierte Ansichten aus den sechs Blickrichtungen der Koordinatenachsen, über Touch-Gesten, mit denen sich die Szene verschieben, verdrehen oder vergrößern bzw. verkleinern lässt oder automatisch über die Bauteilerauswahl.

Mehrere Erweiterungen ermöglichen einen produktiven Umgang mit der AR-gestützten Arbeitsunterlage.



Abbildung 9: Montagefall im CAD-Modus

**Interaktive Bauteilliste:** Um die Informationen in der digitalen Arbeitsunterlage arbeitsschrittsspezifisch darzustellen, muss die Reihenfolge der Arbeitsschritte, d. h. die Verbaureihenfolge der Teile, bekannt sein. Der Werker kann diese interaktiv in der Bauteilliste planen, wodurch ein Zusatzaufwand in der Arbeitsvorbereitung vermieden wird. Hierzu gibt der Werker Parameter wie bspw. die Verbaurationg eines Rohrstranges vor. Zusätzlich lassen sich Bauteile gruppieren, sodass der Arbeitsinhalt organisiert werden kann.

**Automatische Bemaßung:** Für die Montage werden Maße zwischen dem aktuell zu verbauenden Bauteil und fixen Referenzbauteilen benötigt. Messen erfolgt senkrecht zwischen Bauteil und Referenz. So eignet sich der Boden, um in Richtung der Höhenachse zu messen, Wände und Spanten dienen als Referenz für Maßangaben in Richtung der horizontalen Achsen. Um dem Werker möglichst nur aussagekräftige Messstellen einzublenden, werden pro Messrichtung die jeweils längsten parallel verlaufenden Abstände zwischen Bauteil und Referenz automatisch berechnet und für eine einfache Unterscheidung entsprechend der Messrichtung eingefärbt angezeigt.

**Ansichtsauswahl:** Um die Interaktion zum Auswählen der Ansicht auf ein Minimum zu beschränken, kann die Anwendung so eingestellt werden, dass sie die optimale Betrachtungsposition automatisch auswählt und für eine einfache Orientierung aus der aktuellen Ansicht in die berechnete Ansicht fliegt. Die optimale Ansicht wird so ausgewählt, dass sie nach Möglichkeit der realen Betrachtungsposition entspricht (1,70 m über der Boden-Referenz).



Um die digitale Arbeitsunterlage zu evaluieren, installierten Werker und Auszubildende Ausrüstungsgegenstände wie Rohre und Lüftungsschächte in einer Testumgebung (siehe Abb. 10), die an die reale Fertigung angelehnt war. Drei Testgruppen montierten dabei die jeweils gleichen Bauteile: Werker mit Papierzeichnungen, Auszubildende mit digitaler Arbeitsunterlage und Werker mit digitaler Arbeitsunterlage. Videokameras zeichneten den Montageprozess für die spätere Auswertung auf. In einer anschließenden Befragung zeigte sich, dass sowohl die Werker als auch die Auszubildenden die digitale Arbeitsunterlage als große Unterstützung bei der Informationsbeschaffung empfanden und vor allem komplexe Geometrien besser erfassen konnten als in Papierzeichnungen. Beide Gruppen hielten es für möglich, diese vollständig durch digitale Arbeitsunterlagen zu ersetzen. Im Vergleich zur Referenzgruppe, die mit Papierzeichnungen arbeitete, ließ sich mit der digitalen Arbeitsunterlage der Aufwand für die Informationsbeschaffung bei den Werkern um 19% senken



Abbildung 10: Anwendung der AR-gestützten Arbeitsunterlage: (a) Marker zur Orientierung; (b) Soll-Ist-Abgleich mit AR; (c) Detailansicht des Tablets

## Retrofit

Immer strengere Umweltvorschriften zwingen Reeder dazu, Verbesserungen an bestehenden Schiffen vorzunehmen [8]. Die dafür benötigten Umbaumaßnahmen (Retrofit) erfordern die Integration neuer Komponenten in die vorhandene Umgebung und verändern dadurch in der Regel die Eigenschaften des Schiffes: Reduzierung der Nutzlast, Gewichtszunahme oder markante Aufbauten sind typische Probleme. Unabhängig von der gewählten Technologie zur Erfüllung der Emissionsrichtwerte sind umfassende Umbaumaßnahmen am Schiff erforderlich. Da die Komponenten einen hohen Individualisierungsgrad aufweisen, ist es notwendig den Nachrüstprozess detailliert zu planen [9]. Dafür beauftragt der Reeder häufig einen Generalauftragnehmer. Ein wichtiger Bestandteil der Planung ist die Angebotserstellung. Abb. 11 stellt die Aufwandsverteilung eines Umbauprozesses dar.

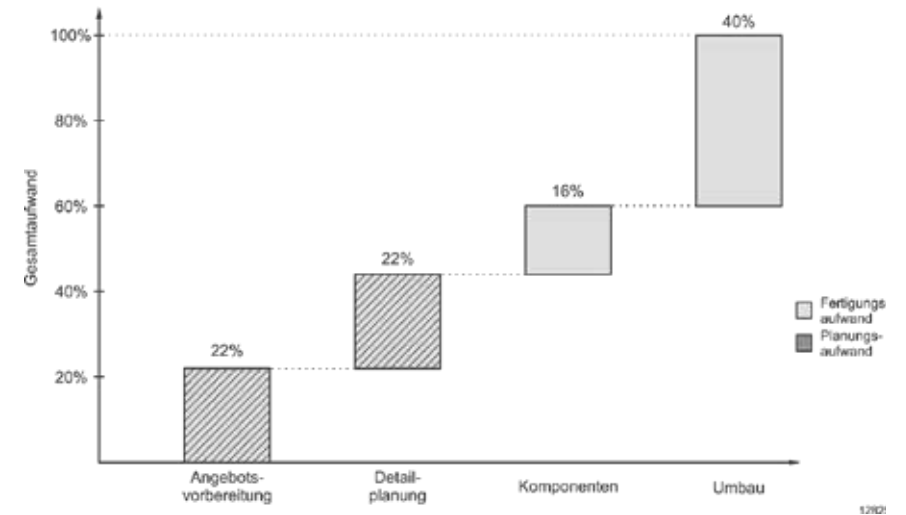


Abbildung 11: Aufwandsverteilung eines Umbauprozesses [10]

Eine durchschnittliche Auftragswahrscheinlichkeit von 32% bei Umbauprozessen [11] und der dargestellte hohe Aufwand der Angebotserstellung erfordern einen produktiven Angebotsprozess mit einer hohen Qualität.

## Angebotserstellungsprozess

Der Angebotserstellungsprozess ist er in drei Phasen unterteilt: die Datenaufbereitung, die Lösungsfindung und die Ergebnisbereitstellung (Abb. 12).

In der Datenaufbereitung erfasst der Generalauftragnehmer alle vorhandenen Informationen über das Schiff, das Fahrtgebiet und weitere Rahmenbedingungen wie bspw. die angestrebte Umbauwerft oder die Docktermine. Zusätzlich ist eine Erfassung der Geometrie für eine anschließende Planung der Retrofit-Maßnahmen notwendig. Der Generalauftragnehmer vermisst das Schiff und erzeugt ein Planungsmodell durch Rekonstruieren der relevanten Bereiche.

In der nächsten Phase integriert der Generalauftragnehmer die neuen Systeme in das vorhandene Schiff. Die dafür möglichen Varianten diskutiert er gemeinsam mit dem Kunden und erarbeitet die finale Lösung. Dieses Vorgehen schafft Transparenz über das Vorgehen und die späteren Veränderungen und erhöht damit die Auftragswahrscheinlichkeit. Neben der technischen Konstruktion bereitet der Generalauftragnehmer die betriebswirtschaftliche Auslegung vor und kalkuliert die Maßnahmen.





Abbildung 12: Angebotserstellungsprozess für Retrofit-Maßnahmen [12]

Die Ergebnisbereitstellung dient der Finalisierung des Angebots und der Dokumentation. Der Generalauftragnehmer erfasst dafür standardisierte Kennzahlen und benutzt diese für die Angebotserstellung weiterer Projekte.

### Unterstützende Werkzeuge

Im Projekt wurden unterschiedliche Werkzeuge entwickelt, um die Ziele der Angebotserstellung zu erfüllen und eine hohe Produktivität zu gewährleisten. Die Vermessung der Geometrie wurde als wesentliche zeitaufwändige Tätigkeit in dem Angebotserstellungsprozess identifiziert. Verschiedene Technologien, bspw. Laserscanning oder die Photogrammetrie, liefern Rohdaten, die Dienstleister nachträglich aufwendig aufbereiten und ein Planungsmodell erzeugen. Diese Technologien wurden im Projekt verglichen und ein produktives, mehrstufiges Vorgehen für den Einsatz in der Praxis entwickelt:

- Festlegen und Klassifizieren der Untersuchungsbereiche,
- Abschätzen und Vergleichen des Aufnahme- und Nachbereitungsaufwands abhängig von der Technologie,
- Aufnahme der Ist-Geometrie,
- Aufbereitung der Rohdaten.

Eine Technologie, die bereits parallel zur Aufnahme die Daten weiterverarbeitet, ist die Geometrieerfassung mit 3D-Kameras. Die Aufnahme erfolgt über einen angepassten Algorithmus für die Aufnahme großer Umgebungen [12] [13]. Dafür berechnet die Kinect aus einer Sequenz von aufgenommenen Bildern farbige Oberflächenmodelle. Das entstandene Model lässt sich mit CAD-Programmen begutachten und verarbeiten. Durch die Entkopplung der Kamera von der Recheneinheit wird eine freie Bewegung auf dem Schiff ermöglicht. Der entwickelte Algorithmus ermöglicht weiterhin ein sequentielles Auslagern der Geometriedaten in den Speicher und erlaubt damit eine zusammenhängende Aufnahme großer Umgebungen.

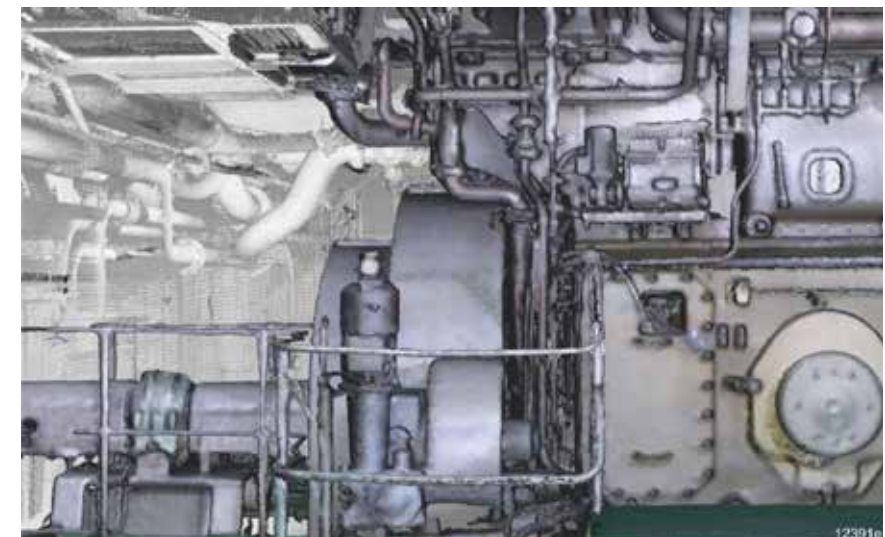


Abbildung 13: Integration einer Kinect-Aufnahme in einem Laserscan [12]

Das Projekt hat gezeigt, dass die Kombination aus unterschiedlichen Aufnahmetechnologien den produktivsten Einsatz ermöglicht. Die entwickelten Werkzeuge unterstützen den Benutzer dabei, diese Kombination zu ermitteln. Abb. 13 stellt einen mit der MS Kinect aufgenommenen Motor in einer durch Laserscanner erzeugten Punktwolkenumgebung dar.

Als zweite wesentliche Herausforderung der Angebotserstellung wurde die frühe Integration des Kunden in den Entscheidungsprozess identifiziert. Diese hilft Fehler und damit Nacharbeit zu vermeiden und steigert gleichzeitig die Auftragswahrscheinlichkeit. Ein AR-System zur Visualisierung und Planung von Einbauvarianten stellt die Maßnahmen direkt am Objekt dar und ermöglicht damit eine gemeinsame Sprache zwischen Dienstleister und Kunden (Abb. 14). Verschiedene Interaktionsmöglichkeiten die Komponenten



Abbildung 14 : Variantenplanung

manipulieren und unterschiedliche Varianten speichern, erlauben einen produktiven Einsatz vor Ort.

## Fazit

Das Verbundvorhaben PROSPER hatte zum Ziel, die Transparenz über die Mitarbeiterzeit zu erhöhen, die Produktivität der Werker zu steigern und Umbaumaßnahmen optimal zu planen.

Das entwickelte Verfahren zur Produktivitätsanalyse ermöglicht erstmals die vielfältigen Arbeitsabläufe verschiedener Werften einheitlich zu erfassen und zu bewerten. Die hohe Praxistauglichkeit hat sich durch die Anwendung in verschiedenen Werftbereichen erwiesen. Die aufgedeckten Potenziale decken sich mit den Zielen der zeichnungsfreien Informationsversorgung. Die entwickelten Konzepte und Lösungen für eine digitale Arbeitsunterlage befähigen die maritime Industrie die ambitionierten Visionen einer Werft 4.0 zu erreichen. Die innovativen Demonstratoren setzen auf diesem Weg Maßstä-

be und konnten bereits während des Projekts die hohen Erwartungen an die Produktivitätssteigerung erfüllen. Weiterhin konnte die Produktivität von Umbaumaßnahmen durch weiterentwickelte Methoden und technologiegestützte Werkzeuge maßgeblich gesteigert werden.

Das Projekt leistet aus Sicht aller Beteiligten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schiffbaus.

## Literatur

- [1] BMWi-Förderprogramm: Maritime Technologien der nächsten Generation – Das Forschungsprogramm für Schiffbau, Schifffahrt und Meerestechnik. [www.BMWi.de](http://www.BMWi.de), Berlin, 2011.
- [2] Lödding, H.; Friedewald, A.: Produktivität – Eine Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Wirtschaft. In: Forschungsschwerpunkt Maritime System. TUHH (Hrsg.), Hamburg, 2014.
- [3] Tietze, F.; Lödding, H.: Analyse der Arbeitsproduktivität in Arbeitsvorbereitung und Produktion von Unikaten. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Corporate Capability Management. HAB, HAB-Forschungsbericht 26, GITO-Verlag, Berlin 2013, S. 185-210.
- [4] Schmidt, G.: Methode und Techniken der Organisation. 13. Auflage, Eigenverlag, Giessen, 2003.
- [5] Tietze, F.; Lödding, H.: Produktivitätsanalyse in der Unikatfertigung mit mobilen Endgeräten. In: Forschungsschwerpunkt Maritime Systeme der TUHH (Hrsg.): 5. Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme, Tagungsband, Hamburg 2014, S. 1-3.
- [6] Halata, P. S.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Augmented Reality Supported Information Gathering in One-of-a-kind Production. In: Bertram, V. (Hrsg.): 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT ,14), Proceedings, Redworth 2014, S. 489-503.
- [7] Halata, P. S.; Friedewald, A.: Augmented-Reality-gestützte Arbeitsunterlagen für die Unikatfertigung. In: Lukas, U. v. et al. (Hrsg.): Go-3D 2015 – Computergraphik für die Praxis. Tagungsband, Rostock 2015, S. 65-79.
- [8] International Maritime Organization: Marpol Annex VI: Regulations for the prevention of air pollution from ships. 2005.
- [9] Lödding, H.; Friedewald, A.; Titov, F.: Augmented Reality zur kundenintegrierten Variantenplanung. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie intelligente Vernetzung und kognitive

Systeme unsere Arbeit verändern. HAB, GITO-Verlag, Berlin 2014, S. 297-316.

- [10] Titov, F.; Friedewald, A.; Loedding, H.: Improving the tender quality for retrofit projects. In: 15th Int. Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR15). Proceedings, Banff, 2015.
- [11] Dietzel, A.: Vertriebscontrolling optimieren – Grundlagen und Praxis. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [12] Friedewald, A.; Titov, F.; Halata, P. S.; Lödding, H.: An Efficient Retrofit Planning Workflow. In: RINA (Hrsg.): 16th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2013). Papers Volume I, Busan 2013, S. 7-15.
- [13] Halata, P. S.; Titov, F.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Systematische 3D-Ist-Daten-Aufnahme großer und komplexer Umgebungen. In: Paul, L.; Stanke, G.; Heuwold, N.; Pochanke, M. (Hrsg.): 3D-NordOst 2013: 16. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. Tagungsband, Berlin 2013, S. 135-145.

## Schriftenreihe Projektträger Jülich

1. **Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie**  
Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung  
hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-006-7
7. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-104-0

